TU WIEN

Abteilung Austauschbau und Messtechnik AUM

O. Univ. Prof. Dr. Dr.h.c P.H. OSANNA

Technische Universität Wien
Institut für Fertigungstechnik
Abteilung Austauschbau und Messtechnik
Karlsplatz 13/3113 1040 Wien
Tel: 58801-31105 Fax: 58801-31196
E-mail: aum@mail.ift.tuwien.ac.at
Internet: http://aum.ift.tuwien.ac.at/

MESSTECHNIK

1 Messtechnik - Übersicht
2 Einführung in die Messtechnik
3 Einführung in die elektrische Messtechnik für Maschinenbauer
4 Messwertaufnehmer und Sensoren
5 Rechnergestützte Messtechnik

SS 2003

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

1 M E S S T E C H N I K - Ü B E R S I C H T

1.1 AUFGABEN DER MESSTECHNIK

1.2 MESSMETHODEN UND MESSVERFAHREN IN PROZESSNÄHE

1.3 DIE INSTRUMENTIERUNG VON PROZESSEN

2 E I N F Ü H R U N G I N D I E M E S S T E C H N I K

2.1 GRUNDBEGRIFFE

2.1.1 Einleitung
2.1.2 Gliederung der Meßtechnik
2.1.2.1 Gliederung nach Methoden und Einsatz
2.1.2.1.1 Präzisionsmeßtechnik
2.1.2.1.2 Labormeßtechnik
2.1.2.1.3 Fertigungs- und Betriebsmeßtechnik
2.1.2.1.4 Meßtechnik für Sondergebiete
2.1.2.2 Gliederung nach Einsatzgebieten
2.1.2.2.1 Elektrische Meßtechnik
2.1.2.2.2 Pneumatische Meßtechnik
2.1.3 Gerätetechnik und Meßwertverarbeitung
2.1.4 Messung und Meßvorgänge
2.1.5 Meßbare Eigenschaften
2.1.6 Einheiten

2.2 DEFINITION

2.2.1 Messen und Prüfen
2.2.2 Maßliches Prüfen
2.2.2.1 Prüfen im engeren Sinn
2.2.2.2 Messen
2.2.3. Nicht maßliches Prüfen
2.2.4 Einfache Beispiele
2.2.4.1 Messen
2.2.4.2 Prüfen mittels Lehren
2.2.4.3 Nicht maßliches Prüfen
2.2.5. Tätigkeiten
2.2.5.1 Vorbereitung von Messungen
2.2.5.2 Durchführung von Messungen
2.2.5.3 Auswertung von Messungen

2.2.5.4 Richtighalten von Meßmitteln
2.2.6. Kenngrößen
2.2.6.1 Statische Kenngrößen
2.2.6.2 Einige statische Kenngrößen
2.2.6.2.1 Anzeigebereich
2.2.6.2.2 Meßbereich
2.2.6.2.3 Meßgrenze
2.2.6.2.4 Meßbereichsumfang oder Meßspanne
2.2.6.2.5 Belastungsbereich
2.2.6.2.6 Übertragungsfaktor
2.2.6.3 Dynamische Kenngrößen
2.2.6.3.1 Beschreibung des Übertragungsverhaltens durch die Differentialgleichung
2.2.6.3.2 Beschreibung des Übertragungsverhaltens durch Antwortfunktionen (Zeitfunktionen)
2.2.6.3.3 Beschreibung des Übertragungsverhaltens durch die Übertragungsfunktion bzw. den Frequenzgang

2.3 MESSFEHLER

2.3.1 Ursachen
2.3.2 Allgemeine Defintion des Meßfehlers
2.3.3 Fehlerangaben und Fehlerbegriffe
2.3.3.1 Absoluter Fehler
2.3.3.2 Relativer Fehler
2.3.3.3 Reduzierter Fehler
2.3.4 Gliederung der Meßfehler

2.4 STATISCHE MESSFEHLER

2.4.1 Fehlerarten
2.4.1.1 Grobe Fehler
2.4.1.2 Systematische Fehler
2.4.1.2.1 Erfaßbare systematische Fehler
2.4.1.2.2 Nicht erfaßbare systematische Fehler
2.4.1.3 Zufällige Fehler
2.4.2 Gegenüberstellung
2.4.3 Allgemeines zur Fehlereliminierung
2.4.4 Statistische Grundlagen

2.5 DYNAMISCHE MESSFEHLER

2.5.1 Auswirkungen des dynamischen Fehlers auf analoge

und digitale Meßgeräte
2.5.2 Definition des dynamischen Meßfehlers
2.5.3 Vermeidung und Korrektur dynamischer Fehler
2.5.4 Dynamische Störwirkungen

2.6 MESSMETHODEN UND MESSVERFAHREN

2.6.1 Analoge und digitale Messung
2.6.1.1 Analoge Meßverfahren
2.6.1.2 Digitale Meßverfahren
2.6.1.3 Beispiele für analoge und digitale Längenmeßsysteme
2.6.1.4 Analoge und digitale Meßwertausgabe
2.6.1.5 Vergleich analoger und digitaler Meßmethoden
2.6.2. Gliederung der Meßmethoden
2.6.3 Unterscheidung zwischen direkten und indirekten Meßmethoden
2.6.4 Indirekte Meßmethoden
2.6.5 Direkte Meßmethoden
2.6.5.1 Ausschlagmethode
2.6.5.2 Differenzmethode
2.6.5.2.1 Abweichungsmethode
2.6.5.2.2 Kompensationsmethode
2.6.5.2.3 Nachführmethode
2.6.5.3 Verhältnismethode
2.6.5.3.1 Substitutionsmethode
2.6.5.3.2 Vertauschungsmethode
2.6.6 Meßverfahren
2.6.6.1 Messung geometrischer Größen
2.6.6.2 Messung mechanischer Größen
2.6.6.3 Messungen in der Akustik
2.6.6.4 Mengenmessung
2.6.6.5 Messung thermischer Größen
2.6.6.6 Elektrische Meßtechnik
2.6.6.7 Optische Messungen
2.6.6.8 Pneumatische Messungen
2.6.6.9 Messung von Stoffeigenschaften
2.6.6.10 Messung von Zählgrößen und Grenzwerten

3 EINFÜHRUNG IN DIE ELEKTRISCHE MESSTECHNIK FÜR MASCHINENBAUER

3.1 ELEKTRISCHE HILFSMITTEL

3.1.1 Bauelemente elektrischer Prüfinstrumente
3.1.1.1 Lagerung
3.1.1.2 Rückstellelemente
3.1.2 Meßwertanzeige
3.1.2.1 Zeiger
3.1.2.2 Lichtzeiger
3.1.3. Registriereinrichtungen
3.1.4 Anzeigeinstrumente und Meßwerke
3.1.4.1 Drehspulmeßgeräte
3.1.4.2 Galvanometer
3.1.4.3 Lichtstrahloszillografen
3.1.5. Widerstände
3.1.5.1 Ohmsche Widerstände
3.1.5.2 Induktivitäten
3.1.5.3 Kapazitäten
3.1.6 Meßwandler
3.1.6.1 Strom- und Spannungswandler
3.1.6.2 Stromwandler
3.1.6.3 Spannungswandler
3.1.6.4 Spannungsteiler
3.1.7 Meßverstärker
3.1.7.1 Gleichspannungsverstärker
3.1.7.2 Wechselspannungsverstärker
3.1.7.3 Meßverstärker für Gleich- und Wechselspannungen
3.1.7.4 Mehrstufige Verstärker
3.1.8 Meßumsetzer
3.1.9 Meßumformer
3.1.10 Filter
3.1.11 Störeinflüsse und ihre Ausschaltung
3.1.11.1 Temperatur
3.1.11.2 Schirmung
3.1.11.3 Astasierung

3.2 ELEKTRISCHE MESSVERFAHREN

3.2.1 Gleichrichterschaltungen
3.2.1.1 Halbleitergleichrichter

3.2.1.2 Meßgleichrichter-Schaltungen
3.2.2 Gleichstrommeßbrücken
3.2.3 Wechselstrommeßbrücken

3.3 ELEKTRONISCHE HILFSMITTEL

3.3.1 Halbleiterdioden
3.3.1.1 Dioden für Gleichrichterzwecke
3.3.1.2 Lichtemissionsdioden
3.3.1.3 Laserdioden
3.3.1.4 Zener-Dioden
3.3.2 Transistoren
3.3.2.1 Bipolartransistoren
3.3.2.2 Feldeffekt-Transistoren (FET)
3.3.3 Spannungsstabilisatoren
3.3.4. Stromstabilisatoren
3.3.5 Geregelte Speisegeräte
3.3.6 Mikroprozessoren

3.4 ELEKTRONISCHE MESSGERÄTE

3.4.1. Allgemeines
3.4.2 Erdung in Meßschaltungen
3.4.3 Kapazitive und induktive Entkopplung
3.4.4 Verbindungsleitungen
3.4.5 Meßumsetzer und signalstrukturändernde Meßumformer
3.4.5.1 Digital-Analog-Umsetzer
3.4.5.2 Analog-Digital-Umsetzer
3.4.6 Voltmeter
3.4.6.1 Vielfachmeßgeräte
3.4.6.2 Digitalvoltmeter
3.4.7 Elektronenstrahloszilloskope
3.4.7.1 Elektronenstrahlröhre
3.4.7.2 Standardoszilloskope
3.4.7.3 Zweistrahloszilloskop
3.4.7.4 Speicheroszilloskope
3.4.7.5 Digitale Speicheroszilloskope
3.4.7.6 Sampling-Oszilloskope
3.4.8 Meßgeräte für spezielle Größen
3.4.8.1 Frequenzmesser
3.4.8.2 Phasenmesser
3.4.8.3 Zähler

4 M E S S W E R T A U F N E H M E R U N D S E N S O R I K

4.1 EINLEITUNG

4.2 MESSFÜHLER UND SENSOREN

4.2.1 Allgemeine Begriffe
4.2.2 Sensorsignalverarbeitung
4.2.3 Beispiele für Sensoren durch Nutzung physikalischer Effekte
4.2.4 Unterscheidung
4.2.4.1 Rezeptive Sensoren
4.2.4.2 Bearbeitende Sensoren

4.3 EINIGE GRUNDLEGENDE BAUFORMEN VON WEGAUFNEHMERN

4.3.1 Potentiometeraufnehmer
4.3.2. Kapazitive Aufnehmer
4.3.3 Induktive Aufnehmer

4.4 KRAFT-UND DRUCKSENSOREN

4.4.1 Piezowiderstandseffekt
4.4.1.1 Allgemeines
4.4.1.2 Dehnungsmeßstreifen (DMS)
4.4.1.2.1 Metall-Dehnungsmeßstreifen
4.4.1.2.2 Halbleiter-DMS
4.4.1.2.3 Keramische Dehnungsmeßstreifen
4.4.1.2.4 Anwendungen
4.4.2 Piezoelektrizität
4.4.2.1 Piezoelektrischer Effekt
4.4.2.2 Materialien
4.4.2.3 Anwendungen

4.5 TEMPERATURSENSOREN

4.5.1 Thermoelemente
4.5.2 Heißleiter (NTC-Widerstand)
4.5.3 Kaltleiter (PTC-Widerstand)
4.5.4 Pyroelektrizität
4.5.4.1 Pyroelektrischer Effekt
4.5.4.2 Materialien
4.5.4.3 Anwendungen

4.6 MAGNETSENSOREN

4.6.1 Halleffekt-Sensoren

4.6.2 Anwendungen des Hall-Effektes

5 R E C H N E R G E S T Ü T Z T E M E S S T E C H N I K

5.1 PERSONAL COMPUTER

5.2 MEßTECHNISCHE HARDWARE-ERWEITERUNGEN FÜR PCs

5.2.1 Zusatzkarten im PC

5.2.2 Personal-Instrumentation-Box (PIB)

5.2.3 PC-Meßgeräte

5.3 MEßWERTAUSGABE DURCH PERSONAL COMPUTER

5.4 DATENÜBERTRAGUNGSSYSTEME

5.4.1 Verbindungsstrukturen bei Meßsystemen

5.4.2 Grundlagen von Bus-Systemen

5.4.3 IEC-Bus-Systeme

5.4.3.1 Strukturen von Meßsystemen mit IEC-Bus

5.4.4 Die RS232/V.24-Schnittstelle

5.5 SOFTWARE-PROGRAMME

5.6 ZUSAMMENFASSUNG

ANHANG

2.4.5 Fehlerfortpflanzung

2.4.5.1 Fortpflanzung der systematischen Meßfehler

2.4.5.2 Fortpflanzung der zufälligen Meßfehler

2.4.5.3 Beispiel zur Fehlerfortpflanzung

6 L I T E R A T U R

1 MESSTECHNIK - ÜBERSICHT

1.1 AUFGABEN DER MESSTECHNIK

Die Technik und Naturwissenschaft sind ohne Meßtechnik nicht mehr vorstellbar. Durch Versuche und Experimente werden heute wissenschaftliche Fragestellungen behandelt und gewonnene Erkenntnisse noch stärker als bisher rechnerisch durchdrungen. Die Ergebnisse solcher Experimente werden nur in Form von objektiv gewonnenen, reproduzierbaren Daten akzeptiert.
Die Aufgabe der Meßtechnik ist es nun, objektivierte Versuchsergebnisse bereitzustellen. Eine Theorie wird nur dann angenommen, wenn sich die Meßergebnisse aus den Versuchen widerspruchsfrei in den vorgegebenen Rahmen fügen lassen. Fortschritte auf dem Gebiet der Meßtechnik brachten oft neue wissenschaftliche Erkenntnisse und waren damit Auslöser für erweiterte oder gar neue Theorien. Mit Hilfe eines verfeinerten Meßverfahrens wurde schon manche Hypothese zur gesicherten Theorie.

Neben der wissenschaftlichen Meßtechnik hat in den letzten Jahrzehnten die Meßtechnik in Prozeß- und Produktionsnähe immer mehr an Bedeutung erlangt, sodaß deren wirtschaftliches Gewicht heute bereits um mehrere Zehnerpotenzen über dem der wissenschaftlichen Meßtechnik anzusetzen ist. Sie ist vor allem bei Prozessen der Verfahrenstechnik und in einem noch größeren Maß in der Fertigungsindustrie zu finden.
In der Produktion liefert sie bessere Kenntnisse für die Gestaltung und Durchführung von Prozessen, wodurch eine

(1) optimale Prozeßführung,
(2) Verbesserung der Qualität,
(3) Erhöhung der Sicherheit und
(4) Steigerung der Produktivität

ermöglicht werden. Durch das Vorhandensein einer immer größeren Fülle neuer Aufgabenstellungen werden laufend neue Lösungsvorschläge und -wege angeboten.

Seit Mitte der siebziger Jahre wurde durch die **Automatisierung** die Bedeutung der Meßtechnik noch weiter gesteigert und es erweist sich als notwendig, Meßaufgaben automatisch auszuführen. Die herkömmliche Automatisierung wird durch eine flexible und computerintergrierte Automatisierung in immer stärkerem Maße abgelöst. Eine wesentliche Stütze bzw. Voraussetzung dabei ist die Interaktion mit Rechnersystemen unterschiedlicher Leistungsfähigkeit. Ferner ist die Beurteilung sehr komplexer Systeme erforderlich.
Auch die Umwelteinflüsse müssen bei der Durchführung von Meßaufgaben berücksichtigt werden, wobei Fragen der Betriebsstabilität unter stark schwankenden Umweltbedingungen als besondere Problematik der Meßtechnik anzusehen sind.

Es ist international der Trend zu beobachten, daß die von den Kunden und Kosumenten gestellten Anforderungen bezüglich der *Qualität von Erzeugnissen* und Produkten beständig steigen. Nur durch fortlaufende Verbesserungen ist eine hohe Leistungsfähigkeit zu erreichen und aufrecht zu erhalten. Die Qualität der Produkte kann als grundlegender Faktor für die Leistungsfähigkeit eines Unternehmens angesehen werden.
Die extrem hohen *Genauigkeitsansprüche von Produkten*, besonders bei hochentwickelten Geräten der Unterhaltungselektronik bzw. in der Sensortechnik im Automobilbau, erfordern die Herstellung extrem kleiner Teile mit Toleranzen im Nanometerbereich. Zur Erzielung dieser Herstellgenauigkeiten erfolgt in weiten Bereichen der Technik der Übergang von der Mikrotechnologie zur Nanotechnologie.

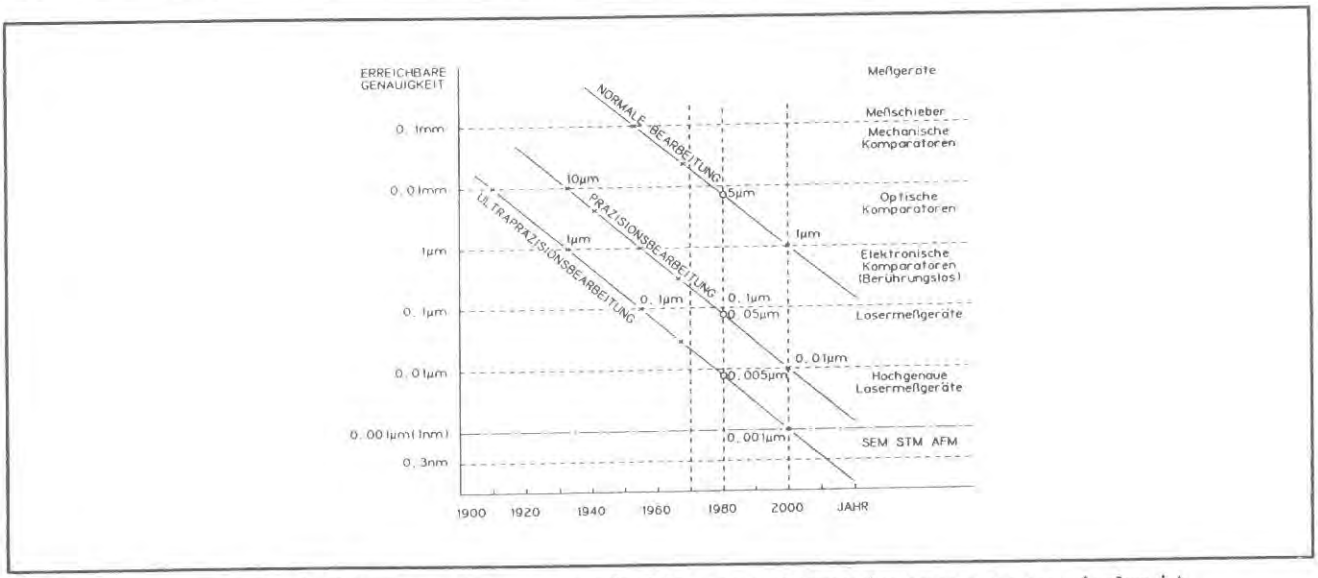


Bild 1.1 *Entwicklung der erreichbaren Fertigungsgenauigkeit*

Wesentliche Weiterentwicklungen sind deshalb in der Meßtechnik im Nano- und Subnanometerbereich in nächster Zukunft durchaus zu erwarten.

Damit in Zusammenhang sind unmittelbar die Aspekte von **Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung** zu sehen. Diese umfassen sehr komplexe Aufgaben, die auf das gesamte betriebliche und wirtschaftliche Geschehen einwirken, was durch das Modell des sogenannten *Qualitätskreises* anschaulich dargelegt wird (*Bild 1.2*).

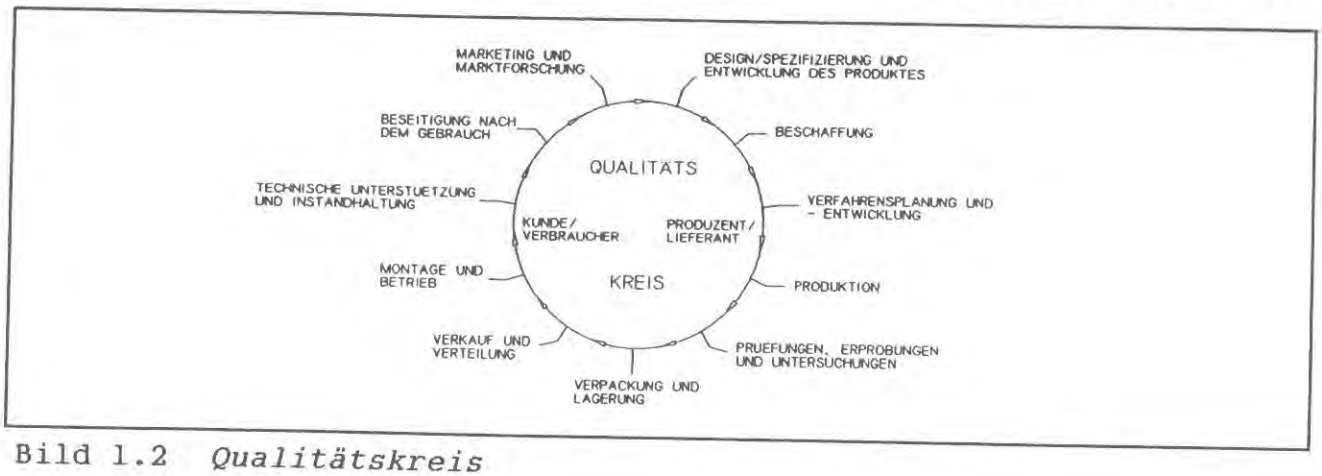


Bild 1.2 *Qualitätskreis*

So wird etwa das Produkt von der Marktforschung bzw. der Konzeption bis zum Einsatz beim Verbraucher sowie zur Beseitigung nach dem Gebrauch durch entsprechende Maßnahmen und Tätigkeiten begleitet.

Qualitätssicherung ist zwar sicher mehr als Meßtechnik, aber ohne Meßtechnik ist Qualitätssicherung von Produkten nicht nur unmöglich, sondern die Meßtechnik ist eine wesentliche Stütze und einer der Hauptteile jedes Qualitätssicherungssystems im Zusammenhang mit der Herstellung unterschiedlicher Erzeugnisse.

Weiters sei noch auf den Aspekt der *Prüfmittelüberwachung* hingewiesen, die als wesentliche Komponente in jedes produktbezogene Qualitätssicherungssystem einbezogen werden muß. Die daraus entstehende Fülle von Aufgabenstellungen müssen aus wirtschaftlicher Notwendigkeit einer Lösung zugeführt werden.

Die dabei **wichtigsten Aufgaben** der Meßtechnik lassen sich in folgender Weise zusammenfassen:

(1) Erfassen der **Quantität** und **Qualität** von Stoffen, Energien und auch Informationen überall dort, wo diese geliefert, übergeben

oder verkauft werden.

(2) Diese Aufgaben sind in allen **industriellen Prozessen** auszuführen. Im Rahmen der Automatisierungstechnik werden industrielle Prozesse entsprechend den betrieblichen Zielen möglichst selbsttätig geführt.

(3) Neben der **Produktion** gehört die **Überwachung** von Systemen und Anlagen zu den Aufgaben der Automatisierungstechnik. Die Meßtechnik liefert dazu alle Informationen, die für den Schutz der Anlage und die Sicherheit der Menschen sowie der Umwelt notwendig sind.

(4) Weiter sollen durch die Überwachung die **Zuverlässigkeit**, die **Betriebssicherheit** und die **Verfügbarkeit** der Anlagen erhöht werden.

Nicht nur die technische Entwicklung beeinflußt die Produktqualität, sondern auch politische, rechtliche und ökologische Einflüsse wirken sich merklich auf das Produkt aus.
Dabei sind insbesondere auch Aspekte der **Umwelt** und des **Umweltschutzes** zu beachten. Dadurch werden Konzepte der Entsorgung sowie der Wiederverwertung von Produkten mit in Betracht gezogen. Umweltschutz erfolgt aber auch durch Verringerung des Verbrauches an Energie und Rohstoffen. Die Automatisierung und Rationalisierung leisten dazu einen ganz erheblichen Beitrag.
Meß- und Automatisierungstechnik hat unter Beachtung der geschlossenen Kreisläufe der Natur und Umwelt zu erfolgen. Ebenso sind sie bei der Durchführung wirkungsvoller Maßnahmen des Umweltschutzes von wesentlicher Bedeutung. Nur so lassen sich eine schonende Nutzung der Natur sowie eine ökologieorientierte Überwachung und Regelung technischer Prozesse und Anlagen realisieren. Dadurch ergeben sich auch Aufgabenstellungen aus der Erfassung von Umweltverhältnissen und Emissionsquellen sowie um Erkenntnisse über die Wirkungsweisen in der Natur zu erhalten.

1.2 MESSMETHODEN UND MESSVERFAHREN IN PROZESSNÄHE

Die Entwicklung der Meßtechnik wird durch ständig steigende Anforderungen und immer schnelleres Umsetzen in Geräteneuentwicklungen bestimmt.
Die Menge der zu verarbeitenden Informationen für die Meßwertermittlung und zur Auswertung der Meßergebnisse ist etwa auf das Zehntausendfache angestiegen. Produktivität, Meßgenauigkeit und Meßgeschwindigkeit erhöhen sich um den Faktor 100, während zu untersuchende Meßbereiche auf das mehr als Zehnfache gesteigert wurden. Etwa in der gleichen Größenordnung konnte die Zuverlässigkeit der Meßgeräte, insbesondere durch die zunehmende Anwendung der Mikroelektronik, angehoben werden.
Die beständig fortschreitende Automatisierung fordert die Entwicklung von Geräten und Systemen, die sich mit maximaler Produktivität und Leistungsqualität beim Anwender in technologische Prozesse integrieren bzw. fertigungsnah einsetzen lassen.
Von der Entwicklung bis zur Fertigung und zum Vertrieb sind *Meßtechnik und Produktionstechnik* immer stärker verflochten. Sowohl die Aktualität als auch die Zuverlässigkeit und Aussagekraft von Meßergebnissen beeinflussen über die Steuerung der Fertigungseinrichtungen die Effektivität der Produktion. Dadurch kann die Effizienz und Effektivität des gesamten Unternehmens wesentlich gesteigert werden.

Das **Anforderungsprofil** der Prozeßmeßtechnik betrifft dabei vorallem folgende Punkte:

(1) Nicht nur die absolute Meßgenauigkeit, sondern besonders auch die **Reproduzierbarkeit** der Meßergebnisse ist für industrielle Anwendungen von Bedeutung. Kennlinien der Meßgeräte sollten auch über längere Zeiträume hinweg möglichst stabil bleiben.

(2) Der Meßvorgang soll in vielen Fällen vollständig **selbsttätig** erfolgen. Eingriffe oder Korrekturen durch den Menschen sind nicht vorgesehen.

(3) Die Messungen sollen nicht durch Überlast und andere Störungen gefährdet werden. Daher muß die **Verfügbarkeit** und die

Zuverlässigkeit von Betriebsmeßgeräten außerordentlich hoch sein.

(4) Diese Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Meßgeräten soll bei möglichst niedrigem **Pflege-, Wartungs- und Justierungsaufwand** gewährleistet sein.

(5) Geräte der Prozeßmeßtechnik sind meistens in der Anlage montiert und müssen deshalb auch unter **schwierigen Umweltbedingungen** wie stark schwankende Temperaturen, Staub, korrosive Gase, Erschütterungen, elektromagnetische Einstreuungen zuverlässig arbeiten.

Durch die steigenden Anforderungen an die Produkte werden immer engere Toleranzen und damit genauere Messungen verlangt. Garantie- und Haftbedingungen machen die Protokollierung der Qualität notwendig. Zunehmende Typvielfalt sowie der Wunsch nach hundertprozentiger Prüfung verlangen kurze Prüfzeiten und somit rationelle Meßverfahren. Durch den steigenden Konkurrenzdruck werden die Erzeuger gezwungen, qualitativ hochwertige Produkte zu angemessenen Preisen anzubieten.

So ist die *Meßtechnik* zu einem umfassenden Wissensgebiet geworden. Die bereits zur Verfügung stehenden Verfahren, Geräte und Methoden können kaum noch in seinem Umfang und in den Möglichkeiten für konkrete Anwendungen zur Gänze überblickt werden.
Durch computerunterstütztes Abfragen einschlägigen Datenmaterials kann der praktisch Arbeitende, der vor neuen meßtechnischen Aufgaben steht, entsprechende Hilfeleistung durch anderweitig angebotene Lösungen erhalten.
Durch die rasche Entwicklung des leistungsfähigen PC-Bereichs, und durch das Aufkommen von Rechnernetzwerken ist es nunmehr möglich, entsprechende komfortable Anwendungen von **Datenbanken** auf Personalcomputern zu installieren.

Signale von Geräten der Meßtechnik können in EDV-Anlagen, etwa Prozeßrechnern, Kleincomputern oder dezentralen Automatisierungs-Systemen praktisch in unbeschränktem Umfang und nach jedem Wunsch verarbeitet werden. In diesem Zusammenhang und bei der Lösung der oben stehenden Aufgaben entstehen Wünsche nach mehr flexiblen

Meßgeräten, die auch andere Meßgrößen erfassen. Neue Materialien und neue Technologien bei der Herstellung ermöglichen kleinere, billigere und allgemein bessere Aufnehmer, während neue Prinzipien oder neue Meßeffekte doch die Ausnahme sind.

1.3 DIE INSTRUMENTIERUNG VON PROZESSEN

Zwischen *elektrischen und nichtelektrischen Meßgeräten* zu unterscheiden, ist heute in vielen Fällen nicht möglich und auch im allgemeinen gar nicht sinnvoll. Die Geräte sind als Vereinigung unterschiedlicher Systeme konzipiert, wobei die elektronische Meßwertverarbeitung sich als unabdingbarer Bestandteil erweist, deren Vorteile gegenüber direkten Verfahren und Geräten mit nichtelektrischer *Hilfsenergie* so augenscheinlich sind, daß sich kaum Alternativen finden lassen.
Nur in der chemischen Industrie werden heute noch zahlreiche Meßgeräte mit pneumatischer Hilfsenergie eingesetzt, bei denen der Explosionsschutz gegeben ist.

Früher übliche Meßverfahren wurden allgemein als direkte Verfahren ohne Hilfsenergie durchgeführt. Beispielsweise erfaßt eine gewöhnliche Handeslwaage das Gewicht mit einer Unsicherheit von weniger als 0,001.

Die **Vorteile elektrischer Meßgeräte** gegenüber den direkten Verfahren und Geräten mit nichtelektrischer Hilfsenergie sind vor allem:

(1) Elektrische Signale lassen sich vielfältig verarbeiten.

(2) Die Übertragung über größere Entfernungen, etwa in weitläufigen Produktionsanlagen, ist problemlos.

(3) Elektrische Meßgeräte besitzen meist eher kleine Abmessungen.

(4) Manche Meßgrößen, im allgemeinen Analysen-Größen, lassen sich nur auf elektrischem Wege ohne langwierige Laborarbeit automatisch erfassen.

Die *Automatisierungstechnik* umfaßt alle Verfahren und Methoden zur Führung von Prozessen und deren Ausrüstung mit Geräten. Die klassische Instrumentierung eines Prozesses mit Geräten der Automatisierungstechnik zeigt *Bild 1.3*

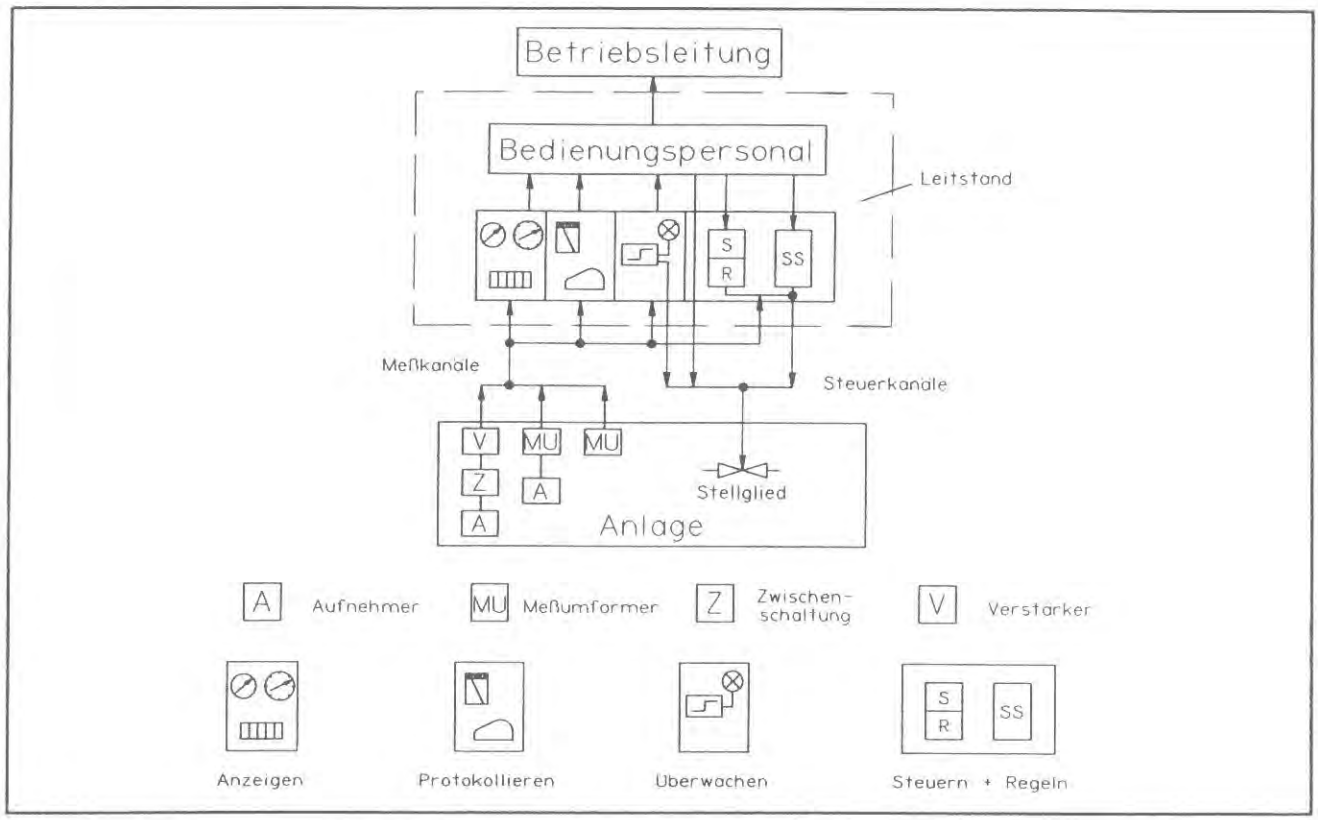


Bild 1.3 *Klassische Instrumentierung eines Prozesses in der Automatisierungstechnik*

Bild 1.4 zeigt eine *total parallele Prozeßautomatisierung*. Für jede Automatisierungsfunktion ist ein eigenes Instrument vorhanden. Bei Ausfall eines Gliedes fällt nur der betreffende Zweig aus.

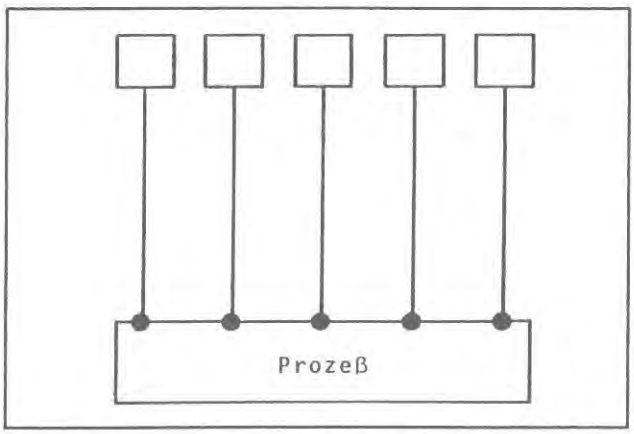


Bild 1.4 *Total parallele Prozeßautomatisierung*

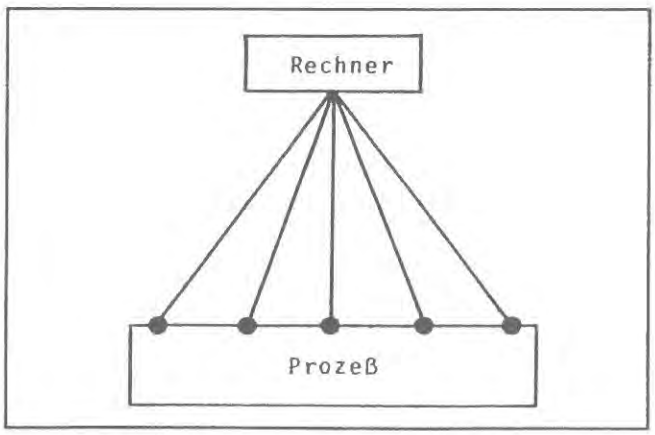


Bild 1.5 *Total zentrale Prozeßautomatisierung*

Mit dem Einssatz von Prozeßrechnern wurde eine fast *totale zentrale Prozeßautomatisierung* versucht (*Bild 1.5*). Alle Automatisierungsfunktionen werden in einem Automatisierungssystem realisiert. Der Rechnerausfall bringt aber das gesamte System zum Erliegen.

Mehrfach-Rechner-Systeme oder ein zweites konventionelles Leitsystem (back-up-System) brachte Abhilfe. Heute geht der Trend eindeutig zu *dezentralen hierarchischen Automatisierungssystemen* (*Bild 1.6*). Teilprozesse werden autonom von Leitsystemen a_i auf der Prozeßnahen-Ebene geführt. Die Führungsgrößen dazu werden aus dem Prozeß oder aus der Koordinierungsebene mit den Leitsystemen A ... N an die Prozeßnahe-Ebene übergeben. Der Prozeß wird im Normalfall von der Leitebene geführt.
Der Prozeß und nicht das Leitsystem soll die Struktur des Leitsystems bestimmen.

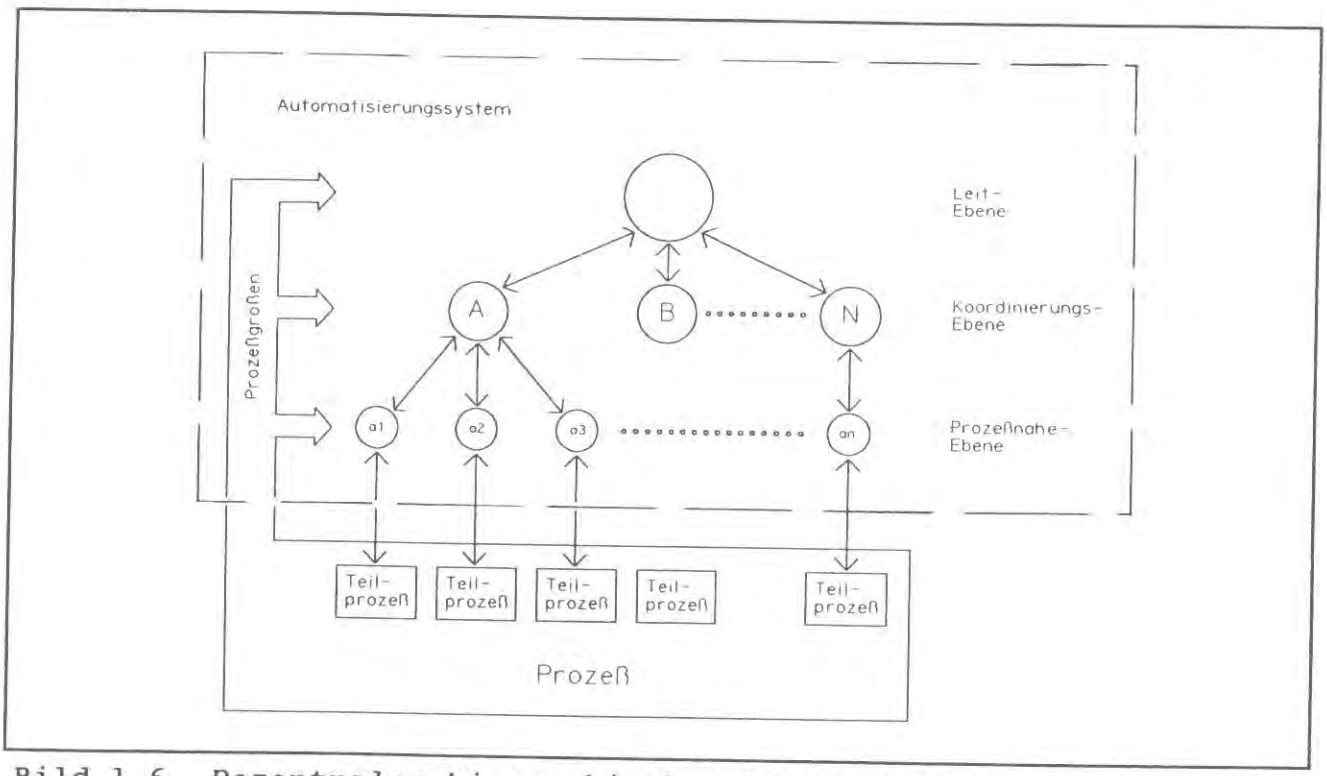


Bild 1.6 *Dezentrales hierarchisches Automatisierungssystem*

Bild 1.7 zeigt die Struktur eines *dezentralen Automatisierungssystems*. Die Rolle der Bus-Technik wird in diesem Bild besonders deutlich.

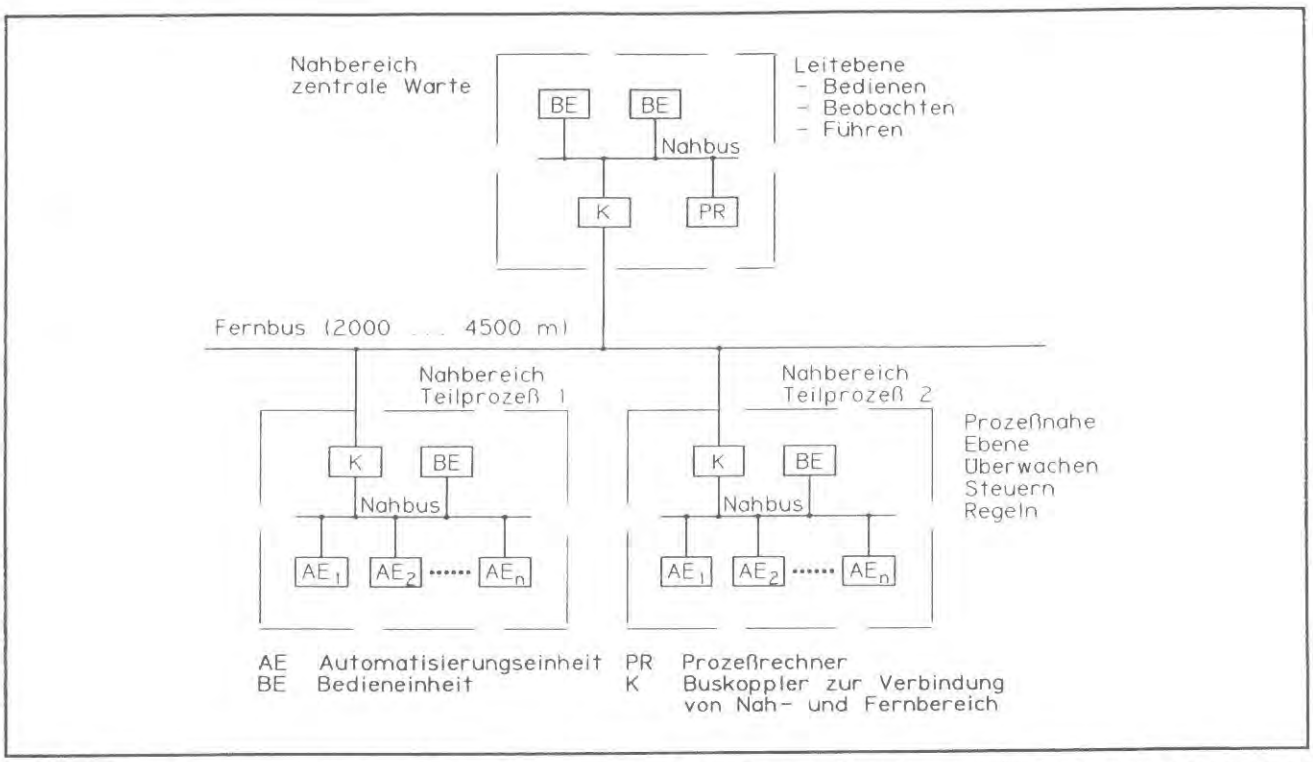


Bild 1.7 *Struktur eines dezentralen Prozeßautomatisierungssystems*

2 EINFÜHRUNG IN DIE MESSTECHNIK

2.1 GRUNDBEGRIFFE

2.1.1 Einleitung

Allgemein muß überall dort gemessen werden, wo quantitative Aussagen über Eigenschaften im weitesten Sinne gebraucht werden. Die Meßtechnik ist folglich ein entscheidendes Mittel zur Gewinnung von Ergebnissen, besonders im Bereich der Technik. Ferner wird sie in der Produktion benötigt, um bestimmte Erzeugniseigenschaften quantitativ zu überprüfen, um Produktionsbedingungen zu kontrollieren usw.

In allen Bereichen der Technik erkennt man generell den Trend, daß gewonnene Erkenntnisse noch stärker als bisher rechnerisch durchdrungen werden. Auf die Produktion übertragen, bedeuted das eine Ablösung der Empirie bei der Gestaltung und Durchführung von Prozessen durch Zugrundelegung quantisierbarer Gesetzmäßigkeiten.

Dieses Suchen nach quantitativ angebbaren Zusammenhängen vergrößert die Bedeutung der Meßtechnik bei der Gewinnung von Zahlenwerten zur Beschreibung von Zuständen, Vorgängen und Ereignissen.

Die Meßtechnik beschränkt sich nicht nur auf Technik und Produktion als Einsatzgebiete, sondern sie ist heute in nahezu allen Lebensbereichen anzutreffen. So etwa auch in der Ökonomie, wo man durch Messen, Zählen und Bewerten zu quantitativen Aussagen vorzustoßen versucht. Aber auch im täglichen Leben umgeben uns Meßgeräte (Uhren, Thermometer, Waagen, Blutdruckmesser, Hohlmaße usw.). So ist die Meßtechnik zu einem umfassenden Wissensgebiet geworden, das in seiner Bedeutung gar nicht hoch genug eingeschätzt werden kann und in seinem Umfang kaum noch zu übersehen ist. Trotz der gewaltigen Ausdehnung, die die Meßtechnik heute erreicht hat, soll versucht werden, durch eine zweckmäßige Gliederung eine gewisse Übersicht zu schaffen.

2.1.2 Gliederung der Meßtechnik

2.1.2.1 Gliederung nach Methoden und Einsatz

Am zweckmäßigsten ist eine *Gliederung der Meßtechnik*, die sowohl einsatz- als auch methodenorientiert ist (*Bild 2.1*). Die strichliert gezeichneten Querverbindungen lassen erkennen, daß sich die Gebiete häufig überschneiden und somit eine scharfe Trennung kaum möglich machen.

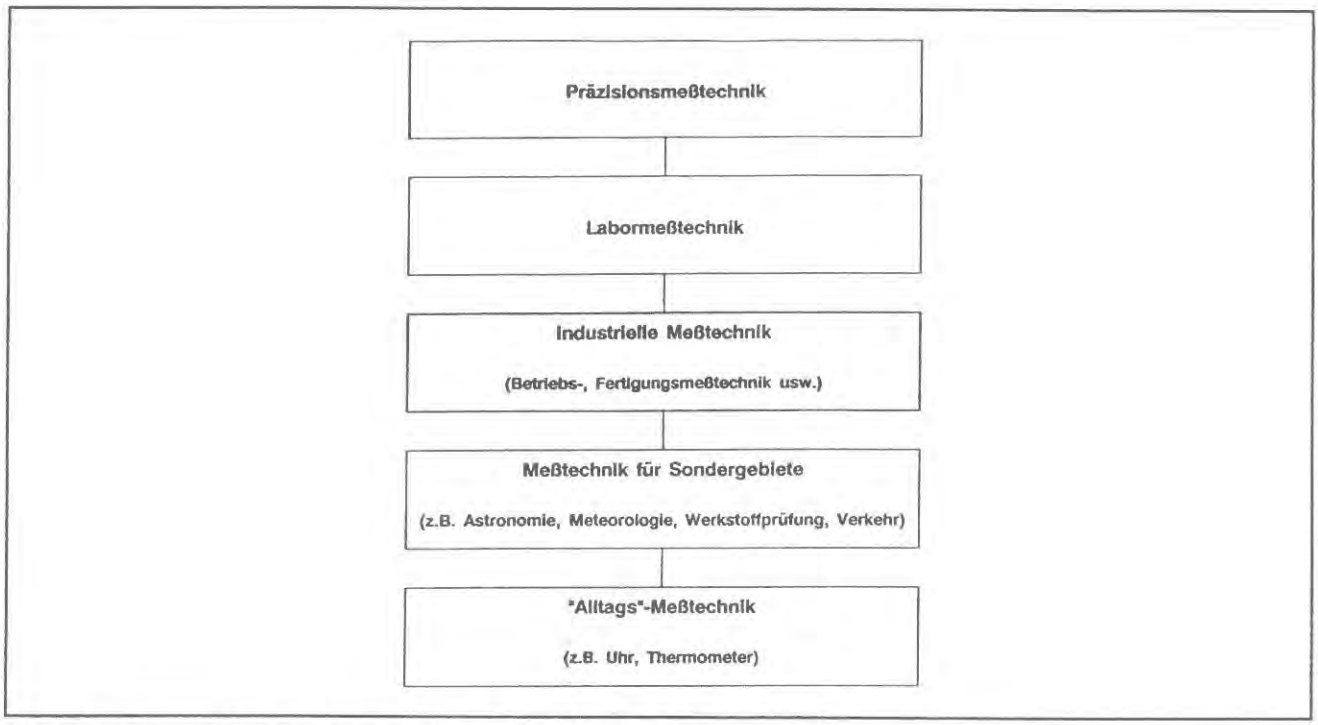


Bild 2.1 *Gliederung der Meßtechnik*

2.1.2.1.1 Präzisionsmeßtechnik

Mit Präzisionsmeßtechnik soll die Meßtechnik bezeichnet werden, die das experimentelle Tätigkeitsgebiet der metrologischen Staatsinstitute darstellt. Hierzu gehören vor allem Entwicklung und Vervollkommnung von Meßverfahren zur Darstellung und Weitergabe von Einheiten und die möglichst genaue Bestimmung von Naturkonstanten.

2.1.2.1.2 Labormeßtechnik

Unter Labormeßtechnik im weitesten Sinne kann man diejenige Tätigkeit aller experimentell Arbeitenden verstehen, die auf die quantitative Bestimmung solcher Größen hinzielt, die vorrangig der Forschung dienen.

2.1.2.1.3 Fertigungs- und Betriebsmeßtechnik

Zur Fertigungs- und Betriebsmeßtechnik gehören im Unterschied dazu alle jene Gebiete der Meßtechnik, die mit dem Produktionsprozeß im weitesten Sinne zusammenhängen. Sie wird zum Teil diskontinuierlich betrieben: Kontrollmessungen in Betriebslabors, viele Verfahren der Fertigungsmeßtechnik, Prüftechnologie. Daneben ist für die Betriebsmeßtechnik jedoch auch kontinuierliche Betriebsweise möglich.

2.1.2.1.4 Meßtechnik für Sondergebiete

Was unter Meßtechnik für Sondergebiete zu verstehen ist, dürfte aus den in *Bild 2.1* angeführten Beispielen verständlich werden. Es handelt sich um spezifische, für das betreffende Gebiet charakteristische Messungen und Meßmittel. Dabei ist es unwesentlich, ob die benutzten Meßverfahren in anderen Gebieten ebenfalls angewendet werden.

2.1.2.2 Gliederung nach Einsatzgebieten

Eine Aufgliederung der Meßtechnik nach Einsatzgebieten (elektrische, chemische, physikalische Meßtechnik usw.) hat zwei Nachteile. Einerseits kommt man mit diesem Gliederungsprinzip bei der großen Anzahl der betroffenen Wissensgebiete infolge zunehmender Überschneidungen sehr bald an natürliche Grenzen, andererseits sind auch die Benennungen zweideutig; es kann darunter sowohl das *Einsatzgebiet* als auch die *Art des Meßverfahrens* verstanden werden.

In dieser Weise gewählte Bezeichnungen dienen deshalb vorzugsweise zur fachlichen Abgrenzung für Lehr- und Publikationszwecke sowie zur Kennzeichnung von Tätigkeitsbereichen, z. B. im kommerziellen Bereich.

2.1.2.2.1 Elektrische Meßtechnik

Mit dem Begriff elektrische Meßtechnik bezeichnet man nicht nur die in der Elektrotechnik angewandte Meßtechnik, sondern auch die Meßverfahren, die sich elektrischer Hilfsenergie bedienen (z. B. elektrische Messungen nichtelektrischer Größen).

2.1.2.2.2 Pneumatische Meßtechnik

Unter pneumatischer Meßtechnik versteht man sogar ausschließlich die *Meßverfahren mit pneumatischer Hilfsenergie* und nicht die Messung von Luftdrücken, die zur Druckmessung (Manometrie) gehört.
Die pneumatische Technik bietet mit ihrer Luftspülung einen natürlichen Korrosionsschutz, wobei bei pneumatischen Anlagen von vornherein der Explosionsschutz gegeben ist.

2.1.3 Gerätetechnik und Meßwertverarbeitung

Für jede Messung ist eine *Maßverkörperung* erforderlich, d. h. ein Gegenstand, eine Einrichtung oder ein Vorgang, durch den eine festgelegte Einheit verkörpert wird. Der eigentliche Meßprozeß, das Vergleichen, ist nur in den seltensten Fällen so einfach, wie bei der Längenmessung mit einem Lineal. Die Meßgröße muß erst oft, teilweise über mehrere Zwischenschritte, vergleichbar gemacht werden.

Die technischen Hilfsmittel, mit denen die Messung durchgeführt wird oder in denen sich der eigentliche Meßvorgang abspielt, bezeichnet man als **Meßgerät**. Das Meßgerät ist somit eine Baueinheit, welche Teil oder Ganzes der Meßeinrichtung sein kann. Soweit Meßgeräte nicht einen eigenen Namen haben (z. B. Waage, Uhr, Thermometer), werden sie zweckmäßigerweise nach der Meßgröße benannt. Weniger empfehlenswert ist die Benennung nach Einheiten (beispielsweise ist Spannungsmeßgerät besser als Voltmeter).

Für kompliziertere Meßvorgänge ist häufig ein größerer gerätetechnischer Aufwand notwendig. Die entsprechenden technischen Einrichtungen bestehen dann aus mehreren Baugruppen, oft in Form

separater Einzelgeräte.
Die Gesamtheit der zum Zweck der Messung benutzten Gerätebausteine bilden die **Meßeinrichtung.** Darin sind Fühler zur Erfassung der Meßgröße, Verstärker, Rechengeräte und die Ausgabegeräte zur Darstellung der angezeigten Größe sowie eventuell weitere Bausteine miteingeschlossen.

Von **Meßgerätesystemen** spricht man, wenn verschiedene Geräte (Primär- und Sekundärgeräte) in ihren konstruktiven und Anschlußparametern so vereinheitlicht sind, daß sie beliebig zusammengeschaltet werden können.

Schließlich werden für viele Messungen noch zusätzliche Hilfsgeräte benötigt, z. B. zur Bereitstellung der Hilfsenergie, zur Signalwandlung usw.
Maßverkörperungen, Meß- und Anzeigegeräte, Meßeinrichtungen sowie Hilfsgeräte faßt man unter der Bezeichnung **Meßmittel** zusammen.

Jedes Meßgerät kann als Wandler betrachtet werden, der die Aufgabe hat, die Meßgröße X zu quantifizieren, d. h. ihren Zahlenwert zu ermitteln und das Resultat in einer für den Menschen wahrnehmbaren Form wiederzugeben.

Die *charakteristischen Merkmale des Meßvorganges* lassen sich zunächst unabhängig von der gerätetechnischen Ausführung in einem idealisierten Blockschaltbild darstellen.

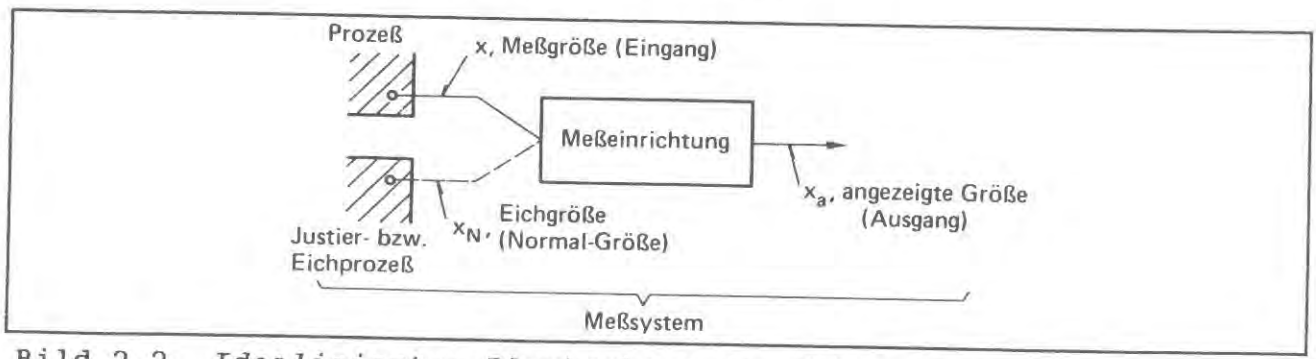


Bild 2.2 *Idealisiertes Blockschema des Meßsystems*

Das *Bild 2.2* zeigt die Struktur eines Übertragungssystems mit einseitig gerichtetem Signalfluß. Die Information über die einem Prozeß angehörende Meßgröße wird durch die Meßeinrichtung auf die Anzeige übertragen.

Dieses Blockschaltbild verdeutlicht zunächst den Aspekt des Erfassens und des Wieder-zur-Darstellung-Bringens von Größen. Der charakterisierende Vorgang des Messens, das *Normieren*, wird durch die in die Meßeinrichtung eingebrachte Information bezüglich des Normals symbolisiert.
Störeinflüsse irgendwelcher Art sind in dieser Betrachtung zunächst vernachlässigt. Die Idealisierung bedeutet, daß der Meßvorgang nur durch die Meßgröße einerseits und das Normal andererseits beeinflußt wird.

Ausgehend von *Bild 2.2* und in Anlehnung an die Normen, seien noch folgende Begriffe definiert:

Das **Meßobjekt** ist derjenige Teil eines physischen Systems, der Träger der Meßgröße ist.

Das **Meßsystem** umfaßt neben der Meßeinrichtung auch diejenigen Bereiche des das Meßobjekt enthaltenden physischen Systems, welche durch den Meßvorgang beeinflußt werden.

Zusammenfassend sind eine Reihe von Gründen angeführt, warum Meßgeräte verwendet werden und man ohne Meßmittel praktisch nicht messen kann:

(1) die meisten Größen sind den Sinnesorganen nicht zugänglich,
(2) unseren Sinnesorganen fehlt der objektive Maßstab, d. h. die geeignete Maßverkörperung, sofern sie für bestimmte Größen empfindlich sind. Dadurch kommt es leicht zu "Fehlmessungen" (vor allem hinsichtlich des Absolutwertes einer Meßgröße),
(3) uns fehlt das Vorstellungsvermögen für extreme Größenordnungen (beispielsweise für die Abmessungen kosmischer oder atomarer Objekte),
(4) die Änderungsgeschwindigkeit einer Meßgröße ist oft so hoch, das unsere Sinne diesen Änderungen nicht zu folgen vermögen,
(5) der Meßort ist für den Menschen häufig nicht zugänglich,
(6) die Messung kann mit Gefahren für den Menschen verbunden sein,
(7) durch Geräte, die auch automatisierbar sind, kann Arbeitskraft eingespart werden,

(8) Messungen müssen oft über sehr lange Zeiten laufen, was mit Menschenkraft nur schwer oder gar nicht zu bewerkstelligen ist,

(9) bei manchen Messungen ist eine Zuverlässigkeit erforderlich, die von Menschen nicht erreicht werden kann.

2.1.4 Messung und Meßvorgänge

Allgemein ist der *Zweck einer Messung*, durch das Meßgerät den Wert der Meßgröße zu erfassen und proportional in eine vom Messenden wahrnehmbare Größe umzuwandeln. In *Bild 2.3* stellen dick gezeichnete Pfeile den eigentlichen Meßvorgang dar. Das Meßgerät ist hierbei gleichzeitig Meßwertbildender und Ausgabegerät.

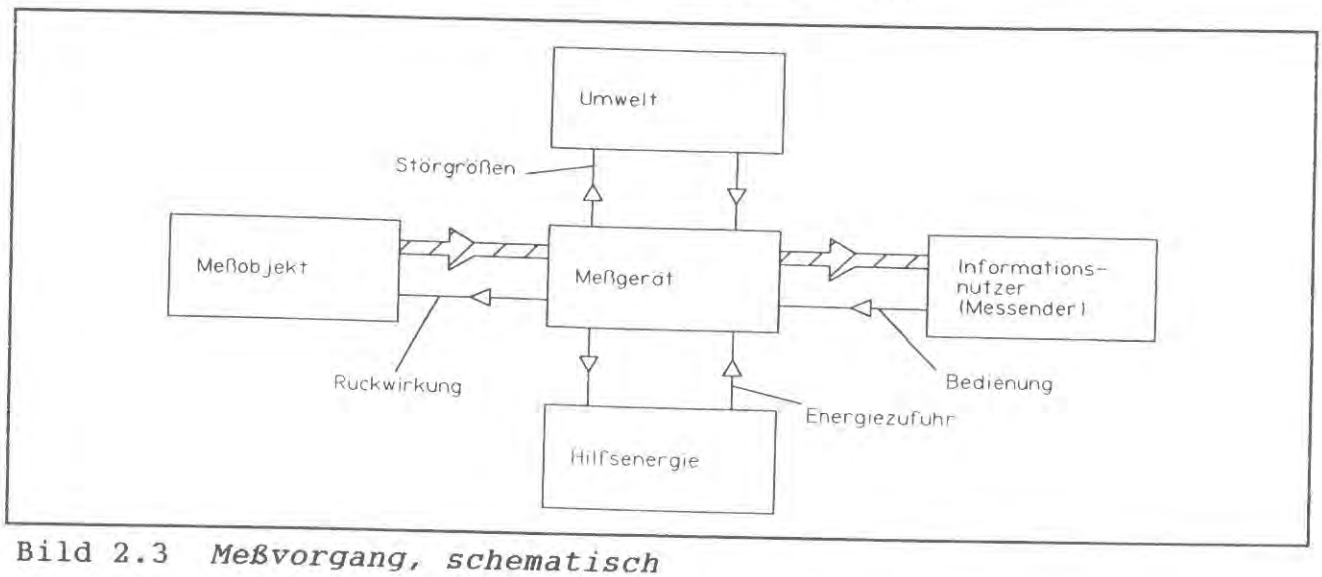


Bild 2.3 *Meßvorgang, schematisch*

Beim *Meßvorgang* werden vom Bediener im allgemeinen unterschiedliche Tätigkeiten gefordert, etwa Anschließen und Einschalten des Gerätes, Einstellen des Meßbereiches usw. Nur in seltenen Fällen kann sich die Tätigkeit des Messenden allein auf das Ablesen beschränken. Weiters können Probleme, die mit der Verwendung von Hilfsenergie zusammenhängen, auftreten. Die Wechselwirkungen des Meßgerätes mit seiner Umwelt ergeben einen Teil der möglichen Fehlerquellen.

Die **Meßwertbildung** ist kein Vorgang, der nur in einer Richtung verläuft, sondern das Meßgerät tritt bei der Messung mit dem Meßobjekt in Wechselwirkung und entzieht dem Meßobjekt in vielen Fällen Energie. Dadurch kann der Wert der Meßgröße verändert werden. Diese Beeinflussung der Meßgröße durch die Messung ist die *Rückwirkung*.

Von wenigen Ausnahmefällen abgesehen, tritt bei jedem Meßvorgang eine Rückwirkung auf. Es ist lediglich die Frage, wie groß diese Rückwirkung ist, d. h., ob sie sich im Resultat der Messung auswirkt oder nicht. Oft wird man sie unberücksichtigt lassen, ohne daß größere Ungenauigkeiten zu erwarten sind.

Die **Rückwirkung** ist eine allgemeine Erscheinung der Meßtechnik. Inwieweit sie von Einfluß auf das Resultat einer Messung ist, wird durch bestimmte Relationen zwischen Meßgröße und Meßmittelparametern bestimmt. Bei elektrischen Messungen sind die Rückwirkungen vielfach zu groß, um sie vernachlässigen zu können. Hier sei nur an die Verkleinerung einer Stromstärke durch den Innenwiderstand eines Strommeßgerätes erinnert, das zusätzlich in den Stromkreis gelegt wird.

Allgemein kommt eine Messung dadurch zu Stande, daß eine Änderung der Meßgröße *(URSACHE)* eine definierte Änderung der Abbildungsgröße *(WIRKUNG)* hervorruft. Jede definierte, eindeutige und reproduzierbare Wirkung, die durch eine Meßgrößenänderung verursacht wird, läßt sich prinzipiell zur Messung dieser Größe ausnutzen. Aufgrund des allgemeinen Zusammenhanges vieler physikalischer Erscheinungen hat die Änderung einer Größe *(URSACHE)* meist verschiedene Wirkungen. Für die Messung einer Größe lassen sich deshalb oft verschiedene Prinzipien ausnutzen.

Infolge der Vielfalt der Wirkungen, die durch die Änderung einer Meßgröße hervorgerufen werden können, und angesichts der Vielzahl möglicher Meßgrößen ist die Anzahl der für Meßzwecke ausnutzbaren physikalischen Erscheinungen bzw. Effekte (Meßprinzipien) sehr groß. Oft bietet jedes dieser Prinzipien bei der technischen Realisierung in einem Meßverfahren ganz spezifische Vorteile, die es zweckmäßig erscheinen lassen, für die Messung der gleichen Größenart unter verschiedenen Meßbedingungen unterschiedliche physikalische Prinzipien heranzuziehen.
Die Wirkungsweisen und damit auch die Ausführungsformen der Meßfühler sind demzufolge sehr unterschiedlich. Daraus folgt, daß:

- die Auswahl verfügbarer bzw. noch zu entwickelnder Meßfühler sehr groß ist, sodaß es für nahezu jedes Meßproblem einen geeigneten Meßfühler gibt, und

- Meßfühler sich eher schwer vereinheitlichen bzw. durch Normen festlegen lassen.

Abschließend sei hier noch die Grundregel der Meßtechnik wiedergegeben:

Es ist nicht so genau wie möglich, sondern so genau wie notwendig zu messen.

Natürlich sind die begründeten Genauigkeitsanforderungen für eine Meßaufgabe nur dann erfüllbar, wenn es die technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten zulassen.

Es sei darauf hingewiesen, daß der Begriff **Meßgenauigkeit** nicht definiert ist und deshalb im Zusammenhang mit Zahlenangaben nicht benutzt werden soll. Der kleinere Zahlenwert entspräche nämlich der größeren Genauigkeit (z. B. wäre 0,1 % genauer als 0,5 %). Diese Schwierigkeit wird umgangen, wenn man bei Zahlenangaben ausschließlich den Begriff Fehler und davon abgeleitete Bezeichnungen verwendet. Allgemein gehaltene Angaben der Art "*dieses Gerät ist genauer als jenes*" sind dagegen unmißverständlich, und gegen sie ist nichts einzuwenden.

2.1.5 Meßbare Eigenschaften

Im Prinzip sind die meisten Eigenschaften von Objekten (Gegenständen, Substanzen usw.) sowie viele Eigenschaften von Zuständen und Vorgängen meßbar. Es kommt nur darauf an, sie durch Wahl eines geeigneten "Maßstabes" *quantifizierbar zu machen.* Viele Eigenschaften sind direkt quantifizierbar, z. B. geometrische Abmessungen, Masse, Dichte, Temperatur usw., andere nur auf Umwegen, wie beispielsweise die Farbe einer Lichtstrahlung über die in ihr auftretenden Wellenlängen. Einige wenige Eigenschaften, wie behaglich, intelligent, werden wohl für immer unquantifizierbar bleiben.

Diese mengenmäßig festlegbaren Eigenschaften, denen das Interesse der Meßtechnik gilt, bezeichnet man als Größen (vorwiegend physikalische Größen) und, wenn sie gemessen werden oder gemessen werden sollen, als *Meßgrößen*.

Die Rolle des für die Quantifizierung einer bestimmten Eigenschaft benötigten Maßstabes übernehmen die *Einheiten*. Ist für die interessierende Eigenschaft eine Einheit festgelegt, so läßt sich diese Eigenschaft als Größe G in der Form eines Produktes aus Zahlenwert und Einheit angeben:

$$\text{Größe } G = (\text{Zahlenwert}) \cdot [\text{Einheit}]$$

Da man mit den Faktoren Zahlenwert und Einheit formal wie mit jedem anderen Produkt rechnen kann, ist also der Zahlenwert der Größe G:

$$(\text{Zahlenwert}) = \frac{\text{Größe } G}{[\text{Einheit}]}$$

Ist eine Eigenschaft nicht direkt meßbar oder nicht als Größe definiert, so braucht dies noch nicht zu bedeuten, daß man über diese Eigenschaften keine quantitativen Aussagen machen kann. Es genügt, daß die betreffende Eigenschaft mit einer meßbaren Größe in einem bekannten, gesetzmäßigen Zusammenhang steht. Dann kann diese Größe als Maß für die gesuchte Eigenschaft dienen.

Das Objekt, dessen Eigenschaften bestimmt werden sollen, heißt **Meßgegenstand** oder **Meßobjekt**. Meßobjekte ohne definierte geometrische Formen, wie Gase, Flüssigkeiten oder Schüttgüter, nennt man *Meßgüter*, *Meßmedien* oder *Meßsubstanzen*. Bei Meßgütern großen Umfanges ist es oft zweckmäßig oder überhaupt unmöglich, die Gesamtmenge zu untersuchen. Dann entnimmt man eine Teilmenge, die Meßprobe. Die Probeentnahme oder Probenahme wirft eine Reihe von Problemen auf.
Als Resultat einer Messung erhält man bei festgelegter Einheit einen Zahlenwert. Dieses Resultat (zusammen mit der festgelegten Einheit) heißt **Meßwert**. Benötigt man zur quantitativen Bestimmung einer Größe mehrere Meßwerte, die dann durch eine mathematische Operation miteinander verknüpft werden, so spricht man vom **Meßergebnis**.

Es kommt vor, daß der Wert einer bestimmten Größe interessiert, diese Größe aber entweder nicht zugänglich ist, für sie kein geeignetes Meßverfahren existiert oder ihre unmittelbare Messung zwar möglich, jedoch mit zu hohem Aufwand verbunden ist. Dann bemüht man sich im allgemeinen, eine andere, aber besser meßbare Größe zu finden, die mit der gesuchten Größe in einem bekannten, reproduzierbaren Zusammenhang steht. Diese Größe verwendet man dann als Meßgröße anstelle der gesuchten Aufgabengröße.

Das Ersetzen einer vorgegebenen Aufgabengröße durch eine leichter zu bestimmende Meßgröße, die nicht notwendigerweise von gleicher Art sein muß wie die Meßgröße, ist an die Voraussetzung geknüpft, daß der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen mit ausreichender Genauigkeit bekannt und konstant ist.

Die Unterscheidung von Meßgröße und Aufgabengröße ist in der Praxis oft wichtig und darf nicht übersehen werden. Die Anforderungen an eine Messung können nur dann sachlich begründet und dementsprechend präzisiert werden, wenn aus der Aufgabenstellung auch die Aufgabengröße klar hervorgeht. Beschränkt man sich von vornherein auf die Angabe einer bestimmten Meßgröße, so können wesentliche meßtechnische Möglichkeiten für eine optimale Lösung der Aufgabe übersehen werden.

2.1.6 Einheiten

Seit 1960 existiert im Système International d'Unités (*Internationales Einheitensystem*; in allen Sprachen "**SI**" abgekürzt) ein Einheitensystem, das sicherlich einmal international allgemein angewendet werden wird.

Das internationale Einheitensystem SI gründet sich auf 7 Basiseinheiten, die in *Tabelle 2.1* wiedergegeben sind.

Die Frage, wie die Basiseinheiten definiert sind, ist zwar interessant, aber für ihre praktische Anwendung kaum von Bedeutung. Da Basiseinheiten nicht aus anderen Einheiten abgeleitet werden können, müssen sie durch Meßvorschriften in Form einer Aussage

festgelegt werden. Dabei geht das Bestreben dahin, möglichst jederzeit *reproduzierbare Naturkonstanten* für die Definition heranzuziehen.

Größe		**Einheit**		**Grundlage der Definition**
Länge	l	Meter	m	vom Licht im Vakuum in (1/299792458) s zurückgelegter Weg
Zeit	t	Sekunde	s	Periodendauer der Strahlung von ^{133} Cs
Masse	m	Kilogramm	kg	Internationaler Prototyp
elektrische Stromstärke	I	Ampere	A	Anziehungskraft einer stromdurchflossenen Doppelleitung
(thermodynamische) Temperatur	T	Kelvin	K	Tripelpunkt des Wassers
Stoffmenge (Objektmenge)	n	Mol	mol	Anzahl von Atomen von ^{12} C in 12 g
Lichtstärke	I_v	Candela	cd	Strahlung einer monochromatischen Strahlungsquelle

Tabelle 2.1 *Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems (SI)*

Neben den Basiseinheiten enthält das SI noch die beiden *ergänzenden SI-Einheiten*:

- für den ebenen Winkel Radiant [rad]
- für den Raumwinkel Steradiant [sr]

Da der Radiant der Winkel zwischen 2 Kreisradien ist, die einen Bogen von der Länge des Radius auf dem Kreisumfang begrenzen, läßt er sich aus dem Meter ableiten:

$$1\ \text{rad} = 1\ \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$$

Da der Winkel zweifelsfrei eine physikalische (geometrische) Größe darstellt, ist es in der Regel nicht empfehlenswert, die Einheit rad durch 1 zu ersetzen (was formal möglich ist), weil sonst leicht bestimmte physikalische Zusammenhänge verschleiert werden können.

Zum SI gehören ferner die *abgeleiteten Einheiten*. Da in ihren Definitionsgleichungen lediglich der Zahlenfaktor 1 auftritt, sind sie sämtlich kohärente Einheiten. Dabei ist es belanglos, ob sie als Potenzprodukte aus Basiseinheiten angegeben werden oder einen eigenen Namen tragen (siehe *Tabelle 2.2*).

Tabelle 2.2/1 *Größen und Einheiten*

Nr.	Größe: Name u. Formelzeichen (ÖNORM A 6401)	Größe: Definition	SI-Einheit	Vielfache und Teile (Beispiele)	Sonstige Einheiten Anmerkungen
1	Länge l		**Meter m Basiseinheit**	km;dm;cm; mm;µm	
2	Flächeninhalt A	$A = l^2$	Quadratmeter m^2 (= 1m.1m)	km^2;dm^2;cm^2 mm^2	1 Hektar (ha)=10 000m^2 1 Ar (a) = 100m^2
3	Rauminhalt (Volumen) V	$V = l^3$	Kubikmeter m^3 (= 1m.1m^2= = 1m.1m.1m)	dm^3;cm^3 mm^3	1 000 l = 1 m^3 1 Liter(l)=1dm=0,001m^3
4	Ebener Winkel α,ß,γ,...	$\alpha = b/r$ Kreisbogenlänge $(= \frac{\text{Kreisbogenlänge}}{\text{Radius}})$	Radiant rad $(1\ \text{rad} = \frac{1m}{1m})$		1 Grad (1°) = 1/90 des rechten Winkels = = π.rad/180° 1 Minute (1') = (1/60)° 1 Sekunde (1'') = (1/60)'
5	Zeit t		**Sekunde s Basiseinheit**	µs	1 Stunde(1h)=60min=3600s 1 Minute(1min)=60s
6	Geschwindigkeit v	v = l/t	Meter je Sekunde m/s (= ms^{-1})	km/s mm/s	km/h m/min
7	Beschleunigung a	a = v/t	Meter je Sekundenquadrat m/s^2 (= ms^{-2})	mm/s^2	Fallbeschleunigung (g) g ≈ 9,81 m/s^2
8	Masse m		**Kilogramm kg Basiseinheit**	Mg;g	1 Tonne (t)=1Mg=1000kg
9	Dichte ϱ	ϱ = m/V	Kilogramm je Kubikmeter kg/m^3 (= kgm^{-3})	g/m^3	lt/m^3 = $1kg/dm^3$ = $1g/cm^3$
10	(Massen-) Trägheitsmoment J	$J = m.l^2$	Kilogramm mal Quadratmeter kgm^2		

Tabelle 2.2/2 *Größen und Einheiten*

Nr.	Größe: Name u. Formelzeichen (ÖNORM A 6401)	Größe: Definition	SI-Einheit	Vielfache und Teile (Beispiele)	Sonstige Einheiten Anmerkungen
11	Impuls p	p = m.v	Kilogrammeter je Sekunde kgm/s (= $kgms^{-1}$)		
12	Kraft F	F = m.a	Newton N (sprich: njutn) (1N = 1kg.1m/s^2)	kN mN	Gewicht (G) in Newton G = m . g (Gewicht=Masse x Fall-beschleunigung
13	Druck p Spannung (Zug oder Druck) σ Schubspannung τ	p = F/A	Pascal Pa $1 Pa = \frac{1N}{1m^2} = 1N/m^2$ Newton je Quadratmeter N/m^2 (= Nm^{-2})	MPa (1MPa=1N/mm^2) N/mm^2 N/cm^2 kN/mm^2 kN/cm^2	1 Bar(bar) = 100 000Pa 1 Millibar (mbar) = 100Pa (nur bei Flüssigkeiten
14	Drehmoment Biegemoment M	M = F.l	Newtonmeter Nm (= kgm^2s^{-2})		
15	Arbeit W Energie E Wärmemenge Q	W = F.l	Joule J (sprich: dschul) (1J = 1N.1m	kJ	1 Wattsekunde (Ws) = 1J = $1kgm^2/s^2$
16	Leistung P	P = W/t	Watt W (1W= =1J/1s=1N.1m/s)	MW kW	
17	Kelvin-Temperatur T		**Kelvin K Basiseinheit**	mK	
18	Celsius-Temperatur t		Grad Celsius °C		0°C ≙ 273,15K und $\Delta t = \Delta T$

Tabelle 2.2/3 *Größen und Einheiten*

Nr.	Größe: Name u. Formelzeichen (ÖNORM A 6401)	Größe: Definition	SI-Einheit	Vielfache und Teile (Beispiele)	Sonstige Einheiten Anmerkungen
19	Spezifische Wärmekapazität c	c = Q/(m.T)	Joule je Kilogrammkelvin J/(kg.K) (= $Jkg^{-1}K^{-1}$)		
20	Wärmeleitfähigkeit λ	λ=Q.l/(A.t.T)	Watt durch Meterkelvin W/(m.K)=($Wm^{-1}K^{-1}$)		
21	Elektrische Stromstärke I		**Ampere A Basiseinheit**	kA mA	
22	Elektrische Spannung U	U = P/I	Volt V (1V=1W/1A)	kV mV	
23	Elektrischer Widerstand R	R = U/I	Ohm Ω (1Ω=1V/1A)	kΩ MΩ	

Zu den Basiseinheiten sei noch kurz vermerkt:

Die **Basiseinheit der Masse** hat (als einzige Basiseinheit) einen Vorsatz. Vielfache und Teile werden von *Gramm* [g] gebildet.
Basiseinheit der Temperatur ist die Einheit der (thermodynamischen) Temperatur T und heißt *Kelvin* [K]. Das Kelvin dient auch zur Angabe von Temperaturdifferenzen und Temperaturänderungen.

Die Skala der im täglichen Leben viel benutzten Celsius-Temperatur t hängt mit T durch die Gleichung:

$$t\ [°C] = T\ [K] - 273{,}15\ K$$

zusammen, wobei die Einheit von t Grad C ist.

Einheiten, in deren Definitionsgleichung ein von 1 verschiedener Zahlenfaktor enthalten ist, heißen **inkohärente Einheiten.** Nach dieser Definition ist beispielsweise das Millimeter [mm] keine SI-Einheit, denn seine Ableitung aus der Basiseinheit ($1\ mm = 10^{-3}\ m$) enthält einen von 1 verschiedenen Zahlenfaktor. Die Vielfachen und Teile der SI-Einheiten, die mit Hilfe der Vorsätze nach *Tabelle 2.3* gebildet werden, sind also inkohärente Einheiten und werden aber gleichberechtigt neben den SI-Einheiten benutzt.

Faktor, mit dem die Einheit multipliziert wird	Vorsatz Name	Zeichen
$1\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{24}$	Yotta	Y
$1\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{21}$	Zetta	Z
$1\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{18}$	Exa	E
$1\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{15}$	Peta	P
$1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$	Tera	T
$1\,000\,000\,000 = 10^{9}$	Giga	G
$1\,000\,000 = 10^{6}$	Mega	M
$1\,000 = 10^{3}$	Kilo	k
$100 = 10^{2}$	Hekto	h
$10 = 10^{1}$	Deka	da
$0{,}1 = 10^{-1}$	Dezi	d
$0{,}01 = 10^{-2}$	Zenti	c
$0{,}001 = 10^{-3}$	Milli	m
$0{,}000\,001 = 10^{-6}$	Mikro	µ
$0{,}000\,000\,001 = 10^{-9}$	Nano	n
$0{,}000\,000\,000\,001 = 10^{-12}$	Piko	p
$0{,}000\,000\,000\,000\,001 = 10^{-15}$	Femto	f
$0{,}000\,000\,000\,000\,000\,001 = 10^{-18}$	Atto	a
$0{,}000\,000\,000\,000\,000\,000\,001 = 10^{-21}$	Zepto	z
$0{,}000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,001 = 10^{-24}$	Yokto	y

Tabelle 2.3 *Vorsätze zur Bildung von dezimalen Vielfachen und Teilen von Einheiten*

Beim Gebrauch dieser Vorsätze ist folgendes zu beachten:

(1) Nicht von allen Einheiten dürfen Vielfache und Teile mit Hilfe von Vorsätzen gebildet werden. Einige (SI-fremde) Einheiten werden grundsätzlich ohne Vorsätze benutzt.

(2) Vorsatzzeichen und Einheitenzeichen werden zusammengeschrieben und können (ohne Klammern) in eine Potenz erhoben werden.

(3) Vorsätze sind so zu wählen, daß sich Zahlenwerte zwischen 0,1 und 1000 ergeben (Tabellen eventuell ausgenommen).

(4) Die Vorsätze Hekto-, Deka-, Dezi- und Zenti- sollten nur dort verwendet werden, wo sie schon länger üblich sind.

(5) Bei Einheiten ohne selbständigen Namen, d. h. bei Potenzprodukten von Einheiten, kann jede der auftretenden Einheiten, nicht aber die Potenz mit einem Vorsatz versehen werden. Die Verwendung mehrerer Vorsätze im gleichen Potenzprodukt ist zu vermeiden.

(6) Vorsatz und Einheit werden entweder beide ausgeschrieben oder beide abgekürzt (*Mikrometer* oder *µm*, falsch: kHertz oder KiloHz).

2.2 DEFINITION

2.2.1 Messen und Prüfen

Als Überbegriff über Messen ist ganz allgemein der Begriff Prüfen anzusehen.
Prüfen heißt, experimentell festzustellen, ob eine bestimmte Eigenschaft eines Prüflings vorgegebenen Anforderungen entspricht. Prinzipiell kann dabei zwischen *maßlichem Prüfen* und *nicht maßlichem Prüfen* unterschieden werden (*Bild 2.4*).

2.2.2 Maßliches Prüfen

Das Ergebnis des maßlichen Prüfens ist eine qantitative Aussage, wobei zwischen dem eigentlichen Messen und dem Prüfen (im engeren Sinn) unterschieden wird.

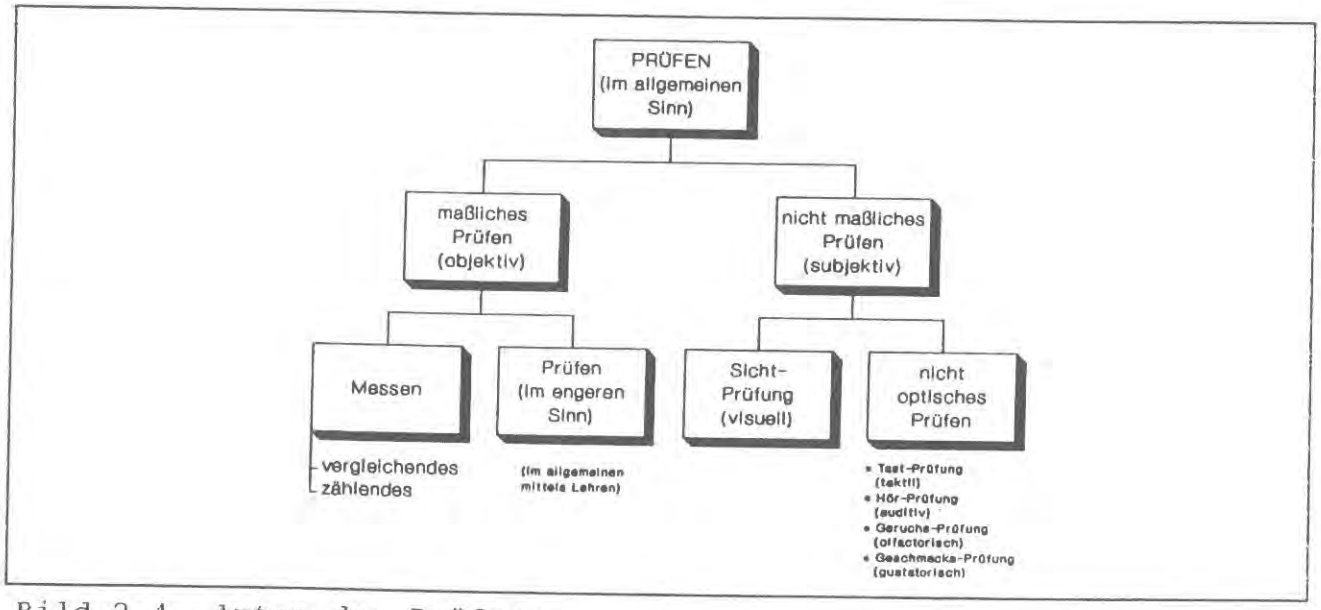


Bild 2.4 *Arten des Prüfens*

2.2.2.1 Prüfen im engeren Sinn

Dabei wird zum Unterschied vom Messen nicht immer ein Zahlenwert als Ergebnis erhalten, sondern es wird etwa mit einer Lehre nur festgestellt, ob eine bestimmte Eigenschaft des Prüfgegenstandes vorgegebenen Anforderungen entspricht.
Man kann auch sagen: es wird das Einhalten eines zulässigen Grenzwertes kontrolliert.

2.2.2.2 Messen

Beim Messen unterscheiden wir zwischen vergleichendem und zählendem Messen.
Vergleichendes Messen ist die Gesamtheit der Tätigkeiten oder Vorgänge, mit denen durch einen Vergleich ermittelt wird, wie oft die Einheit in einer gesuchten Größe enthalten ist, d.h. das Wievielfache der Einheit diese Größe ist. Dazu wird die Größe mit einer geeigneten Verkörperung der Einheit (Maßverkörperung) verglichen.
Beim zählenden Messen kann das Ergebnis unmittelbar als Zahlenwert abgelesen werden, oder es wird entsprechend angezeigt.

2.2.3. Nicht maßliches Prüfen

Man kann dabei zwischen *Sichtprüfung* und *nicht optischem Prüfen* unterscheiden.

Im Gegensatz zum maßlichen Prüfen, das als Spezialgebiet der Meßtechnik angesehen werden kann, fehlt beim nichtmaßlichen Prüfen das entscheidende Kriterium des Messens, die quantitative Aussage. **Nichtmaßliches Prüfen** wird häufig in Form der Sichtprüfung durchgeführt.Es werden bestimmte nicht quantifizierbare Eigenschaften des Prüflings, wie Form, Farbe, Vollständigkeit usw., auf Einhaltung vorgegebener Anforderungen kontrolliert. Die Grenzen zum maßlichen Prüfen sind fließend. So läuft die Sichtprüfung einer Leiterplatte auf Vollständigkeit der Bestückung letztlich auf einen Zählvorgang, also auf eine Form des Messens hinaus. Man kann andererseits auch das Messen als eine spezielle Methode des Prüfens betrachten.
Oft ist es ein Ziel der technischen Entwicklung, das nichtmaßliche Prüfen durch Messen zu ersetzen. Damit werden schließlich aus allgemeinen Eigenschaften quantifizierbare Eigenschaften, also technische Größen.

2.2.4 Einfache Beispiele

2.2.4.1 Messen

Dabei wird untersucht, wie oft die Länge der Maßverkörperung (l) in der Länge des Meßobjektes l enthalten ist. In diesem Beispiel ist dies 2,5 mal der Fall (siehe *Bild 2.5*).

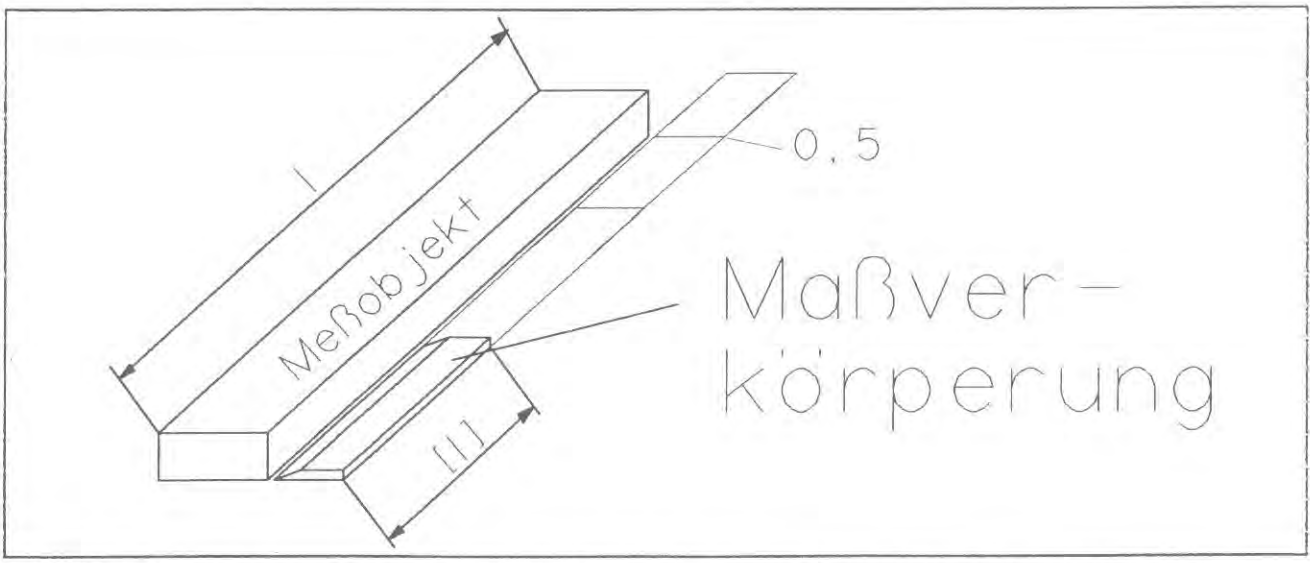


Bild 2.5 *Messen als Vergleich der gesuchten Länge l (Länge des Meßobjektes) mit der Maßverkörperung.*

2.2.4.2 Prüfen mittels Lehren

Prüfen wir mit Hilfe zweier kreisrunder Öffnungen (sogenannter Lehren) mit den Durchmessern d_1 und d_2, welche Prüflinge (Kugeln) durch die erste Öffnung hindurchgehen und durch die zweite Öffnung nicht, so ergibt sich für die Kugeln, die nur durch die erste Lehre passen, die Feststellung, daß der Kugeldurchmesser d_K zwischen den Grenzwerten d_2 und d_1 liegt. Normalerweise sind d_1 und d_2 bekannt, d. h., die Zahlenwerte hiefür sind in einer bestimmten Einheit gegeben. Dadurch liegt fest, innerhalb welcher Grenzwerte d_K liegt: $d_1 > d_K > d_2$. In der Praxis werden jedoch keine Zahlenwerte für d_1 und d_2 angegeben. Man beschränkt sich nur auf die Aussage, ob d_K zwischen ihnen liegt oder nicht. Deshalb unterscheidet man das maßliche Prüfen vom Messen.

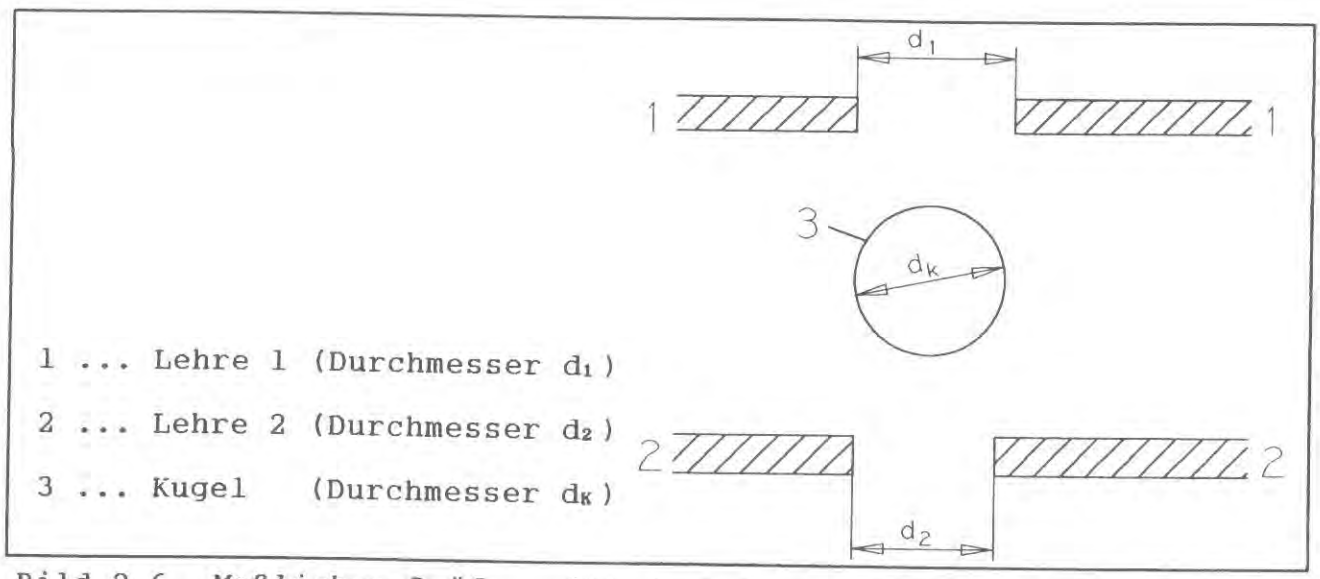


Bild 2.6 *Maßliches Prüfen mittels Lehren*

2.2.4.3 Nicht maßliches Prüfen

Das Verhalten von Mineralölen bei Einwirkung von Kälte ist eine wichtige Gebrauchseigenschaft, die durch nicht maßliches Prüfen, z. B. durch die Beobachtung des Schmierverhaltens bei niedrigen Temperaturen, beurteilt werden kann. Diese Methode ist nicht befriedigend, weil "Schmierfähigkeit" nicht exakt definiert ist. Ein Schritt in Richtung auf Messen ist die Beschreibung des Kälteverhaltens durch andere, meßbare Eigenschaften (Stockpunkt, BPA-Punkt u.a.). Da diese "Punkte" bestimmte Temperaturen bezeichnen, kann man sie bereits als physikalische Größen

betrachten. So ist der *Stockpunkt* die Temperatur, bei der ein abgekühltes Öl im ruhenden Zustand gerade zu fließen aufhört, und der *BPA-Punkt* die Temperatur des Beginns der Paraffinausscheidung.

Die **Stockpunktbestimmung** ist zunächst noch teilweise eine Sichtprüfung, weil das Aufhören des Fließens durch visuelle Beobachtung festgestellt wird. Erst wenn diese Sichtprüfung einem Automaten übertragen wird (Abtastung einer bewegten Öloberfläche mit Hilfe eines Lichtstrahles, *Bild 2.7*), kann man von einer *Stockpunktmessung* sprechen. Bei Erreichen der Stockpunkttemperatur wird das Öl so "steif", daß es mit dem Meßgerät mitkippt, wobei die Oberfläche aus der Waagrechten kommt und das Licht den Detektor nicht mehr erreicht.
Trotzdem ist die "Größe" Stockpunkt nur durch das Meßverfahren exakt definiert. Ziel der Meßtechnik ist es jedoch, die Eigenschaft Kälteverhalten als reproduzierbare Abhängigkeit von meßbaren physikalischen Größen, z. B. von der quantitativen Zusammensetzung und der Struktur des Öles, zu definieren.

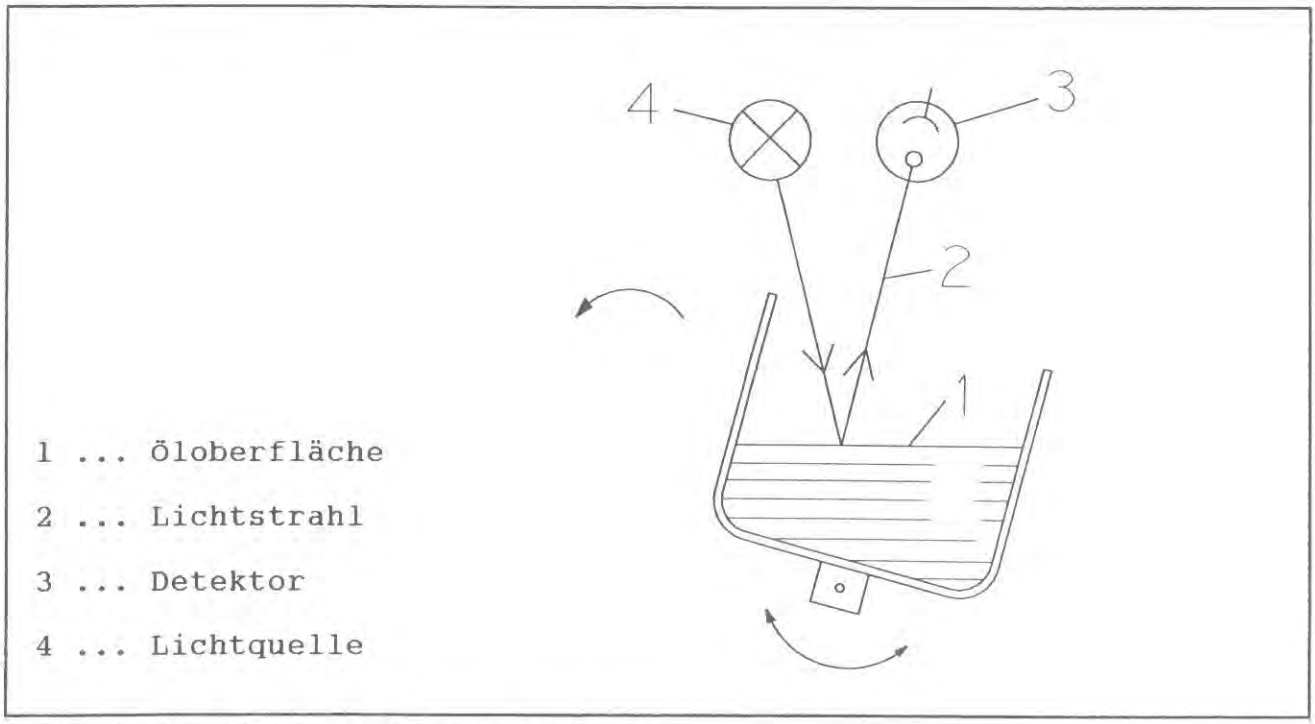


Bild 2.7 *Nicht maßliches Prüfen*

2.2.5. Tätigkeiten

Trotz ständig zunehmender Automatisierung der Meßtechnik ist das

Messen eine Aufgabe, die nach wie vor auch vom Meßpersonal eine Reihe von Tätigkeiten verlangt. Dies bezieht sich vor allem auf die *Vorbereitung*, *Durchführung* und *Auswertung* von Messungen sowie auf die *Richtighaltung* von Meßmitteln.

2.2.5.1 Vorbereitung von Messungen

Hiezu gehört vor allem die Präzisierung der Meßaufgabe und die Inbetriebnahme der Meßeinrichtung. Inbetriebenehmen bedeuted, ein Meßmittel vorschriftsmäßig aufzustellen und anzuschließen (verbinden mit Energiequellen, Zuführung von Hilfsstoffen, z. B. Kühlmitteln, Zuführung der Meßsubstanz bei kontinuierlichen Messungen usw.). Besteht eine Meßeinrichtung aus mehreren Einzelgeräten oder -baugruppen, so sind diese zweckentsprechend zu verbinden. Außerdem muß die Meßeinrichtung justiert (abgeglichen) werden, d. h., sie ist in einen Zustand zu bringen, in dem die möglichen Meßfehler zu einem Minimum werden (z. B. waagrechte Aufstellung, Korrigieren der Hebellänge einer Waage). Manchmal muß das Meßmittel auch noch kalibriert (eingemessen) werden. Dabei wird der angezeigte Wert dem entsprechenden Wert der Eingangsgröße zugeordnet, also die statische Kennlinie aufgenommen bzw. kontrolliert. Weiters wird eine Nullpunktkontrolle bzw. -korrektur vorgenommen. Außerdem ist bei linearer Kennlinie mindesten noch ein weiterer Punkt zu kontrollieren, wofür entweder eine geeignete Maßverkörperung oder ein genaueres Meßmittel benötigt wird.

2.2.5.2 Durchführung von Messungen

Die wichtigsten Tätigkeiten bei der Durchführung von Messungen sind das Eingeben der Meßgröße, die Kontrolle der Meßmittelfunktion bzw. die Handhabung des Meßgerätes, wenn dies erforderlich ist (z. B. Meßschieber, Stoppuhr), die Konstanthaltung von Einflußgrößen bzw. deren Überwachung und die Entgegennahme des Meßwertes.
Wie die Meßgröße zum Meßmittel gelangt und die eigentliche Messung realisiert wird, hängt von Größenart und Meßmittelkonstruktion ab, wobei zum Teil Erfahrungen und Fertigkeiten notwendig sind. Der Meßwert kann entweder angezeigt, registriert oder zur unmittelbaren Bearbeitung weitergeleitet werden. Während digitale Meßwerte direkt in Ziffernform vorliegen, verlangt die Ablesung analoger Werte eine

Bildung des Zahlenwertes durch den Messenden beim Betrachten der Skala.

2.2.5.3 Auswertung von Messungen

Zur Auswertung von Messungen gehören alle Rechnungen, die der Bildung des vollständigen Meßergebnisses dienen. Dies sind vor allem:

- das Anbringen von Korrektionen am Meßwert,
- die Bildung des Ergebnisses aus mehreren Einzelmeßwerten (indirekte Messung) bzw. Mittelwertbildung bei Meßreihen,
- die Ermittlung der Meßunsicherheit und
- die Zusammenfassung zum vollständigen Meßergebnis.

Schlußfolgerungen bzw. das Ableiten von Entscheidungen aus dem Meßergebnis, wie es zum Prüfen gehört, sind zwar nicht mehr Bestandteil der Meßauswertung, werden sich aber im allgemeinen an jede Messung anschließen.

2.2.5.4 Richtighalten von Meßmitteln

Wichtigste Methode der Richtighaltung von Meßmitteln ist die Meßmittelprüfung. Hat diese Prüfung amtlichen Charakter, was durch eine entsprechende Beurkundung (Stempelung) auf dem Meßmittel dokumentiert wird, so heißt sie *Eichung*. Der Ausdruck "Eichen" ist dieser amtlichen Tätigkeit vorbehalten, darf also nicht für das Einmessen verwendet werden, wie auch die statische Kennlinie nicht als Eichkurve bezeichnet werden soll.

2.2.6. Kenngrößen

2.2.6.1 Statische Kenngrößen

Statische Kenngrößen sind quantitative Angaben zur Kennzeichnung wichtiger meßtechnischer Eigenschaften von Meßeinrichtungen im Beharrungszustand. Bei einem konkreten Meßgerät lassen sich für die Kenngrößen bestimmte Werte angeben, die man dann als Kennwerte dieses Gerätes bezeichnet. Derartigen Kennwerten soll ein Anwender

entnehmen können, welche Meßmittel für die Lösung einer bestimmten Meßaufgabe geeignet sind. Der Vielfalt möglicher Meßaufgaben und auftretender Meßbedingungen entsprechend, läßt sich die Eignung für einen bestimmten Zweck nicht durch ein oder zwei Zahlenangaben fixieren. Deshalb sind mehrere Kenngrößen erforderlich, die in statische und dynamische unterteilt werden.
Statische Kenngrößen beziehen sich auf das Verhalten eines Meßgerätes im eingeschwungenen Zustand. Auch alle Kenngrößen, die sich weder auf das statische noch auf das dynamische Verhalten beziehen, wie z. B. der Meßbereich, sind statische Kenngrößen. Nur diejenigen Kenngrößen, die sich speziell auf das dynamische Verhalten von Meßgeräten beziehen, sind *dynamische Kenngrößen*.

2.2.6.2 Einige statische Kenngrößen

2.2.6.2.1 Anzeigebereich

Eine Kenngröße, die bei einem Meßgerät mit analoger Ausgabe unmittelbar abgelesen werden kann, ist der Anzeigebereich als der Wertebereich der Meßgröße, den dieses Gerät (von Skalenanfang bis Skalenende) anzeigen kann.
Bei *digitaler Ausgabe* ergibt sich der Anzeigebereich aus der Stellenzahl der Anzeige unter Berücksichtigung der eingestellten Einheit. Dabei kommt es vor, daß die erste Stelle nur 0 und 1 anzeigen kann ("halbe" Stelle). Der Anzeigebereich 4-stelliger Ausgabeeinheiten geht also von 0 bis 9999, der 3 1/2-stelliger von 0 bis 1999.

2.2.6.2.2 Meßbereich

Jener Teil des Anzeigebereiches, in dem garantierte Fehlerkennwerte eingehalten werden, ist der Meßbereich. Er wird stets durch zwei Zahlen (von ... bis ...) beschrieben, um damit auch die Lage innerhalb des Wertevorrats der Meßgröße zu kennzeichnen. So umfaßt z. B. der Meßbereich eines Füllstandsmeßgerätes einen Füllhöhen- (Längen-) Bereich von ... bis ... in Metern. Der Meßbereich kann kleiner sein als der Anzeigebereich, sehr oft sind beide jedoch gleich.

2.2.6.2.3 Meßgrenze

Die untere Grenze eines Meßbereiches wird als Meßbereichsanfangswert oder untere Meßgrenze, der Meßbereichsendwert als obere Meßgrenze bezeichnet.

2.2.6.2.4 Meßbereichsumfang oder Meßspanne

Die Differenz zwischen oberer und unterer Meßgrenze ist der Meßbereichsumfang oder die Meßspanne. Bei natürlichem Nullpunkt (untere Meßgrenze = 0) gibt die obere Meßgrenze zugleich die Meßspanne an. Dagegen ist bei unterdrücktem Nullpunkt die Meßspanne kleiner als der Meßbereichsendwert. Im Gegensatz zum Meßbereich wird die Meßspanne durch einen Zahlenwert beschrieben.

2.2.6.2.5 Belastungsbereich

Bei zählenden Meßeinrichtungen tritt an die Stelle des Meßbereiches der Belastungsbereich. Das ist der Wertebereich des Eingangssignals, für den sich die Werte der Meßgröße durch Integration (Summation) des Ausgangssignals über die Zeit mit dem angegebenen Fehlerkennwert ergeben.
In Analogie zum Meßbereich heißen die Grenzen des Belastungsbereichs untere und obere Belastungsgrenze.

2.2.6.2.6 Übertragungsfaktor

Der Übertragungsfaktor K gibt das Verhältnis der Änderung des Ausgangssignals zu der sie verursachenden Änderung des Eingangssignals an.
Der Begriff ist nur auf Meßmittel mit stetiger statischer Kennlinie anwendbar und entspricht der Steigung seiner statischen Kennlinie. Bei linearer Sollkennlinie ist der Übertragungsfaktor ein konstanter Wert, der nur dann dimensionslos ist, wenn die Signalträger vom Eingangs- und Ausgangssignal gleich sind.

2.2.6.3 Dynamische Kenngrößen

Der dynamische Meßfehler hängt sowohl vom Meßsystem als auch vom zu erfassenden Verlauf der Meßgröße x(t) ab. Eine Beurteilung der Eignung des Meßsystems kann also nur unter Kenntnis der beiden Elemente erfolgen. Um verschiedene Meßsysteme vergleichen zu können, reicht es oft aus, nur deren dynamische Eigenschaften einander gegenüberzustellen. Zur Beschreibung dieser Eigenschaften können folgende Methoden zur Darstellung des Übertragungsverhaltens benutzt werden.

2.2.6.3.1 Beschreibung des Übertragungsverhaltens durch die Differentialgleichung

Die Beschreibung der Systemdynamik durch die Differentialgleichung ist nicht auf spezielle Systeme beschränkt. Für *lineare Systeme* kann der Zusammenhang der Ausgangsgröße x_a des Systems mit dessen Eingangsgröße x_e über eine lineare Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten der folgenden Art beschrieben werden.

$$e_0 x_e + e_1 x_e' + \ldots + e_m x_e^{(m)} = a_0 x_a + a_1 x_a' + \ldots + a_n x_a^{(n)}$$

wobei $' = d/dt$

2.2.6.3.2 Beschreibung des Übertragungsverhaltens durch Antwortfunktionen (Zeitfunktionen)

Das Übertragungsverhalten eines *linearen Systems* läßt sich dadurch beschreiben, daß die Ausgangssignale als Anwort bestimmter standardisierter Eingangssignale festgehalten werden. Diese Ausgangssignale können rechnerisch durch Lösen der Differentialgleichung für das spezielle Eingangssignal ermittelt werden.
Die wichtigsten Testsignale sind die eingeführten Impuls-, Sprung- und Anstiegsfunktionen.

Impulsantwort (Gewichtsfunktion, Dirac-Funktion)
Wird das System zur Zeit $t = 0$ mit einer Impulsfunktion beaufschlagt, so wird der Verlauf des Ausgangssignals Impulsantwort genannt (siehe *Bild 2.8 a*). Der Verlauf der Ausgangsfunktion $x_a(t)$ wird dabei im allgemeinen mit der Fläche des Impulses normiert und entspricht dem Eigenverhalten.

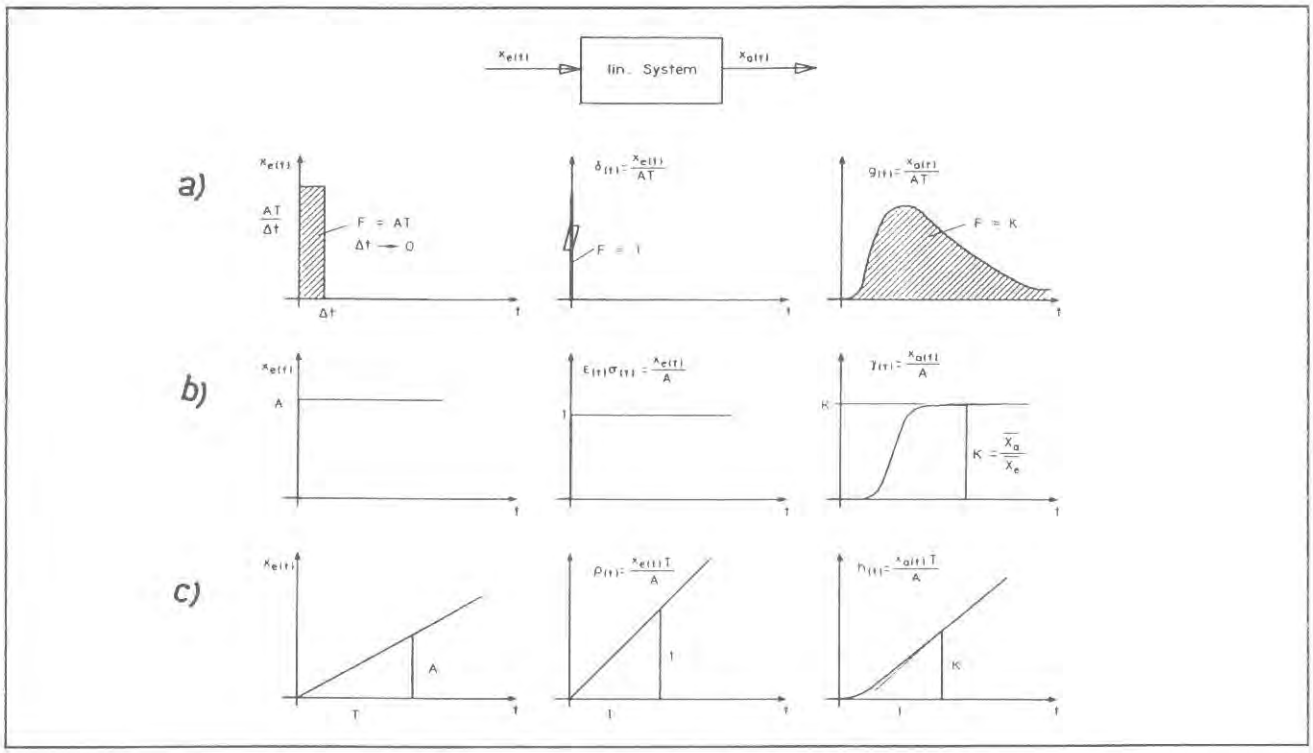


Bild 2.8 a) *Impulsfunktion δ(t) und Impulsantwort g(t)*
b) *Sprungfunktion σ(t) und Sprungantwort γ(t)*
c) *Anstiegsfunktion ϑ(t) und Anstiegsantwort h(t)*

Sprungantwort (Übergangsfunktion)

Der Verlauf der Ausgangsgröße als Antwort auf eine sprungförmige Änderung des Eingangssignals wird Sprungantwort genannt (siehe *Bild 2.8 b*). Die Ausgangsgröße x_a wird dabei im allgemeinen mit der Sprunghöhe des Eingangssignals normiert. Die resultierende *normierte Änderung des Beharrungswertes* der Ausgangsgröße entspricht dann dem sogenannten *Übertragungsfaktor* $K = \overline{X_a} / \overline{X_e}$. Dieser Faktor gibt die Steigung der statischen Kennlinie des Systems an und entspricht der Empfindlichkeit des linearen Systems.

Anstiegsantwort

Wird die Eingangsgröße von einem Beharrungswert ausgehend mit der Zeit linear vergrößert, so wird der entsprechende Verlauf der Ausgangsgröße Anstiegsantwort genannt (siehe *Bild 2.8 c*).

Jedes dieser drei Antwortfunktionen beschreibt für sich vollständig das lineare System. Den Vorteil der besonderen Anschaulichkeit steht der Nachteil gegenüber, daß das Bestimmen des Ausgangssignals für ein allgemeines Eingangssignal aufgrund der Kenntnis der Antwortfunktion mathematisch umständlich ist.

In vielen Fällen genügen aber schon einfache *Kenngrößen* zur Charaktisierung eines Meßsystems. Im Zeitbereich wird hierbei oft die sogenannte *Einschwingzeit* T_E benutzt, die als Zeitspanne definiert ist, welche nach sprungförmiger Änderung der Meßgröße x vergeht, bis die Anzeige x_a^* endgültig innerhalb eines gegebenen Toleranzbereiches verbleibt (siehe *Bild 2.9*).

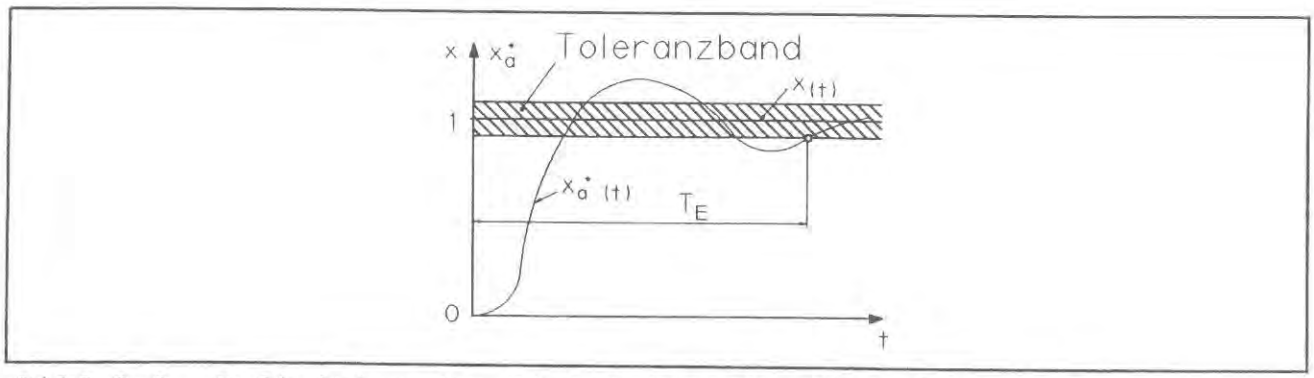


Bild 2.9 *Definition der Einschwingzeit eines Meßsystems*

Bild 2.10 erklärt die Begriffe Totzeit T_T, Verzugszeit T_V, Ausgleichszeit T_A und Überschwingweite x_o.

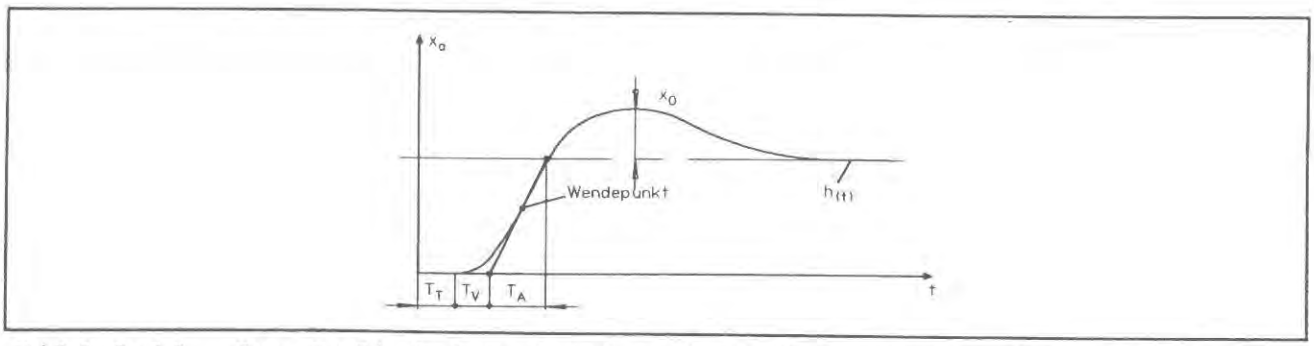


Bild 2.10 *Zur Definition der Begriffe Totzeit T_T, Verzugszeit T_V, Ausgleichszeit T_A und Überschwingweite x_o.*

2.2.6.3.3 Beschreibung des Übertragungsverhaltens durch die Übertragungsfunktion bzw. den Frequenzgang

Zur Kennzeichnung des dynamischen Verhaltens von Meßgeräten und zur Berechnung ihres Verhaltens in Regelkreisen werden Kennfunktionen im Frequenzbereich verwendet. Diese Beschreibungsmethode zeichnet sich durch die besonders einfache rechnerische Handhabung aus, ist aber auf lineare Systeme beschränkt. Die *Übertragungsfunktion* G(s) sei rein formal definiert:

$$\mathcal{L}\{x_a(t)\} = \mathcal{L}\{x_e(t)\} \cdot G(s)$$

bzw.

$$G(s) = \frac{\mathcal{L}\{x_a(t)\}}{\mathcal{L}\{x_e(t)\}} \qquad (2.2.1)$$

Die Laplace-Transformierten von $x_a(t)$ und $x_e(t)$ sind Funktionen des Laplace-Operators $s = (\delta + i\omega)$. Damit läßt sich die Beziehung (2.2.1) als rein algebraische Beziehung in s schreiben:

$$x_a(s) = x_e(s) \cdot G(s)$$

Der sogenannte *Frequenzgang* ist ein Spezialfall der Übertragungsfunktion, in dem die Variable $s=i\omega$ gesetzt wird. Man betrachtet als Eingangsfunktion eine harmonische Schwingung, mit $\vec{x_e}(t) = \hat{x}_e e^{(i\omega t)}$ bezeichnet. Aus der Theorie der linearen erzwungenen Schwingungen ist bekannt, daß nach dem Abklingen der Einschwingvorgänge eine erzwungene harmonische Schwingung gleicher Frequenz, jedoch mit anderer Amplitude und Phasenlage erhalten bleibt. Für diese Schwingung $\vec{x_a}(t) = \hat{x}_a e^{i(\omega t + \varphi)}$ gilt folgende Beziehung:

$$\vec{x_a}(t) = \vec{x_e}(t) \cdot G(i\omega) \qquad (2.2.2)$$

Diese Beziehung nach $G(i\omega)$ aufgelöst, ergibt:

$$G(i\omega) = \frac{\vec{x_a}(t)}{\vec{x_e}(t)} = \frac{\hat{x}_a \cdot e^{i(\omega t + \varphi)}}{\hat{x}_e \cdot e^{(i\omega t)}} = \frac{\hat{x}_a}{\hat{x}_e} \cdot e^{i\varphi} \qquad (2.2.3)$$

Der Frequenzgang ist damit nichts anderes als die vektorielle Darstellung des Amplitudenverhältnisses $v = \hat{x}_a / \hat{x}_e$ von Ein- und Ausgangsschwingung und der entsprechenden Phasenverschiebung φ .

Im Frequenzbereich wird als Kenngröße die sogenannte *Grenzfrequenz* des Meßsystems ω_g benutzt. Sie ist üblicherweise als diejenige Frequenz einer harmonischen Anregung x(t) definiert, für welche das Amplitudenverhältnis $|G(i\omega)|$ festgelegte Toleranzwerte erreicht. In der Regel wird der Toleranzbereich durch die Werte $\sqrt{2}$ bzw. $1/\sqrt{2}$ abgegrenzt.

Der Frequenzbereich zwischen 0 und ω_g bzw. zwischen ω_{g1} und ω_{g2} wird als *Frequenzband* oder *Bandbreite* des Meßsystems bezeichnet (siehe *Bild 2.11*) und bestimmt dessen Einsatzgebiet.

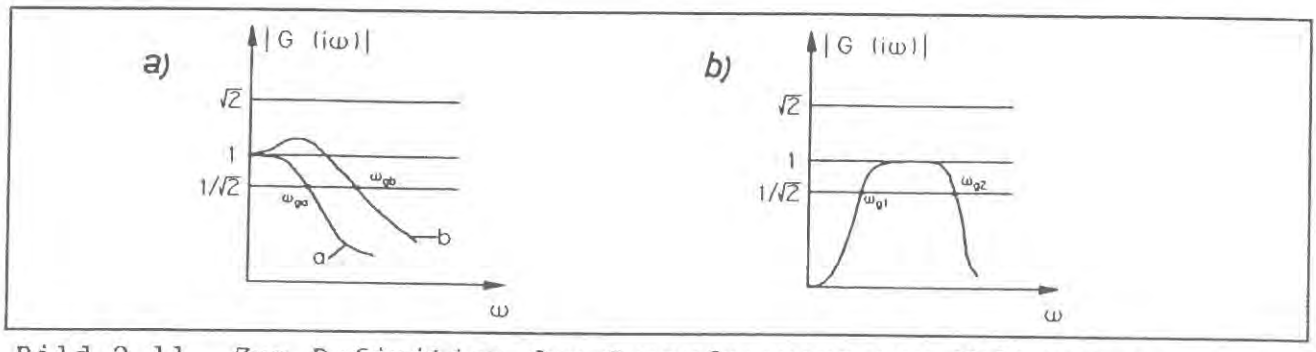


Bild 2.11 *Zur Definition der Grenzfrequenz von Meßsystemen*
a) *statische Meßsysteme*
b) *astatische Meßsysteme*

2.3 MESSFEHLER

2.3.1 Ursachen

Bei der praktischen Durchführung von Messungen kommen immer wieder Fehlerursachen zur Wirkung, die man gar nicht oder nur unzureichend kennt. Bei vielen im Prinzip bekannten Ursachen lassen sich außerdem die Auswirkungen nur schlecht beurteilen. Die Ursachen für die Entstehung von Meßfehlern sind so viel gestaltig, daß es kaum zwei Meßprobleme mit völlig gleichen Fehlerursachen und damit gleichartigen Fehlern gibt. Schließlich können sich verschiedene Fehlerursachen auch gegenseitig beeinflussen.
Dazu kommt, daß die Fehlerursachen auch an verschiedenen Stellen der Meßkette wirksam werden. Von der Meßgröße über die verschiedenen Abbildungsgrößen bis hin zum tatsächlichen vom Messenden wahrgenommenen Meßwert finden mehrere Umwandlungen einzelner Größen in andere Größen statt, von denen jede zur Entstehung von Meßfehlern beitragen kann (*Bild 2.12*).

Wie aus *Bild 2.12* ersichtlich, besteht in der Regel zwischen der eigentlichen *gesuchten Größe* (der Aufgabengröße) und der *erreichbaren Größe* (der Meßgröße) ein Unterschied. Die erreichbare Größe ist ihrerseits meist nicht identisch mit der tatsächlich erreichten Größe, der Eigangsgröße des Meßgerätes.

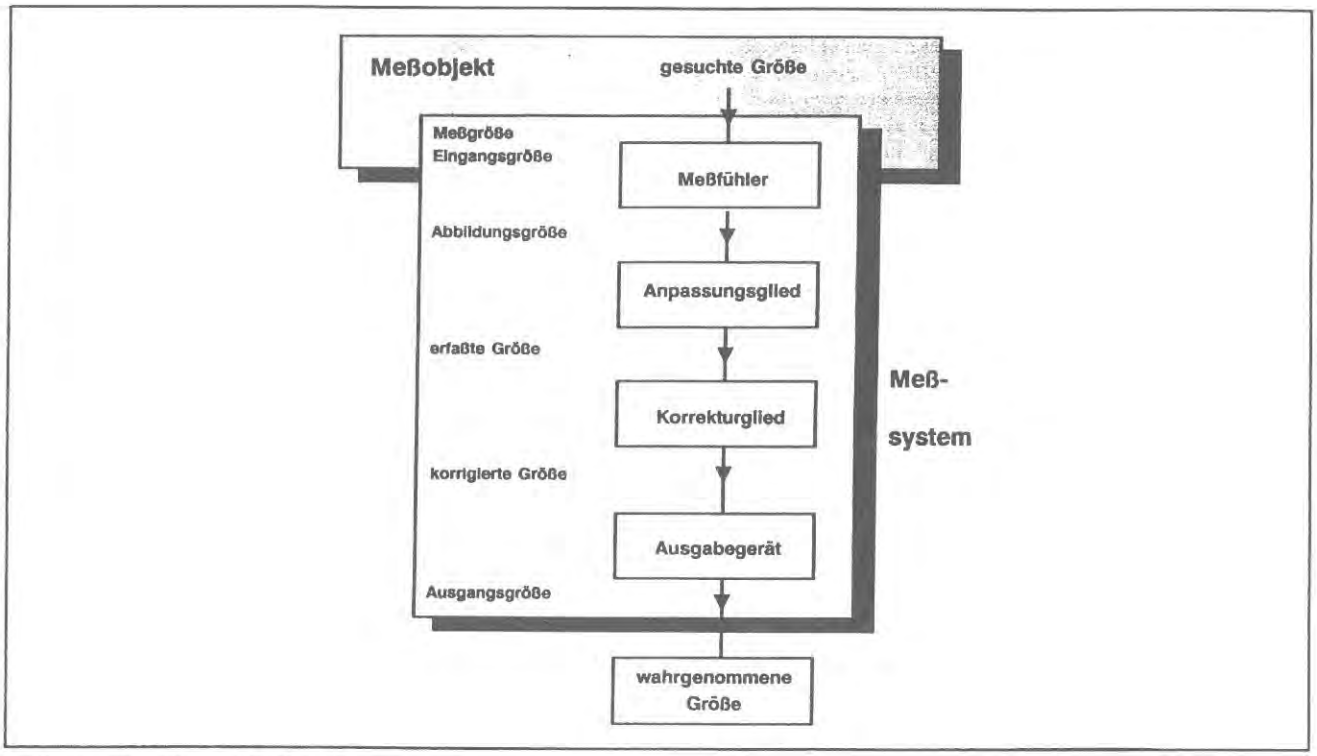


Bild 2.12 *Meßkette*

Durch den Meßfühler wird die Eingangsgröße auf eine zur Weiterverarbeitung geeignete Größe, die natürliche Abbildungsgröße, abgebildet. Diese tatsächlich aufgenommene Größe unterscheidet sich infolge der nicht idealen Funktion des Meßfühlers von der Eingangsgröße. Dabei muß mit Fehlern gerechnet werden, die auf zeitliche Änderungen der Fühlereigenschaften, auf Änderungen der während des Meßvorganges wirkenden Meßbedingungen (Umwelteinflüsse) usw. zurückzuführen sind.
Ähnlich sieht es auch bei den weiteren Umformungsschritten aus. Kein Bauglied arbeitet völlig fehler- und störungsfrei, sodaß jede Umformung auch zu einer weiteren Fehlerursache werden kann.
Das gilt für das Anpassungsglied (beispielsweise einen Verstärker), durch das aus der Abbildungsgröße die erfaßte Größe wird. Weiters auch für ein vorhandenes Korrekturglied (z. B. eine Rechenschaltung zur Linearisierung), das die korrigierte Größe bildet, und für das Ausgabegerät (Anzeigegerät), das die Ausgangsgröße (ausgegebene Größe), also den Meßwert abgibt.
Selbst die Ausgangsgröße unterscheidet sich (zumindest bei analogen Geräten) in der Regel noch von jener Größe, die der Messende schließlich wahrnimmt (wahrgenommene Größe), denn es können auch Ablesefehler auftreten.

Auf dem gesamten Weg können noch unterschiedliche Umwelteinflüsse wirksam werden und zu zusätzlichen Fehlern Anlaß geben bzw. die entstehenden Fehler in ihrem Wert verändern.

2.3.2 Allgemeine Definition des Meßfehlers

Es ist nicht einfach die beste Lösung für eine Meßaufgabe zu finden. Dazu muß meist das jeweilige Problem von verschiedenen Seiten betrachtet werden. Der Meßfehler ist aber dabei nahezu immer das wichtigste Kriterium.

Für den Meßfehler ist die Festlegung technisch und wirtschaftlich begründeter Anforderungen weitaus schwieriger als für andere meßtechnische Parameter. Die Entscheidung darüber, ob beim Meßfehler eine bestimmte Fehlergrenze noch zugelassen werden kann oder ob der Fehler verringert werden muß, unterliegt fast immer einer gewissen Willkür.

Allgemeine Definition:

Meßfehler = (fehlerbehafteter Wert) - (fehlerfreier Wert)

oder man kann auch sagen:

Meßfehler = (gemessener Wert) - (richtiger Wert)

Dieser absolute Wert des Meßfehlers gibt also an, um wieviel der Meßwert vom richtigen Wert abweicht.

Da der Ausdruck "Fehler" einen negativen Beigeschmack hat und in der Qualititätssicherung (z. B. Fertigungsfehler) im Sinne von Mangel benutzt wird, spricht man nur dann vom Meßfehler, wen er eine vorgegebene Meßtoleranz überschreitet. Ansonst verwendet man den Ausdruck (Meß-) Abweichung. Obwohl bei diesen Betrachtungen keine Meßtoleranzen angegeben werden, behält man den gewohnten Begriff "Meßfehler" bei.

2.3.3 Fehlerangaben und Fehlerbegriffe

2.3.3.1 Absoluter Fehler

Vom absoluten Fehler spricht man, wenn sich der Fehler in der Regel auf die Eingangsgröße bezieht und die Einheit der Meßgröße besitzt. Er hat den Nachteil, schlecht vergleichbar zu sein.

2.3.3.2 Relativer Fehler

Um die Genauigkeit unterschiedlicher Messungen vergleichen zu können, verwendet man den relativen Fehler. Das ist der auf den richtigen Wert bezogene absolute Fehler. Wegen der Unkenntnis des richtigen Wertes wird, da Meßfehler in der Regel klein sind, üblicherweise der Meßwert als Bezugswert verwendet.

$$\text{relativer Fehler} = \frac{\text{(absoluter Fehler)}}{\text{(gemessener Wert)}}$$

Der relative Fehler hat die Dimension 1. Er kann auch in Prozent angegeben werden, wenn der erhaltene Wert mit 100 multipliziert wird.

2.3.3.3 Reduzierter Fehler

Fehler treten jedoch nicht nur bei Messungen auf, sondern auch Meßmittel sind fehlerhaft. Soll für Meßgeräte ein Fehler der Dimension 1 angegeben werden, so wird eine andere Bezugsgröße benötigt. Vielfach wird der Meßbereichs-Endwert als Bezugsgröße benutzt, was aber eher unzweckmäßig ist. Vorteilhafter ist es, als Bezugsgröße die Meßspanne zu verwenden, die ebenfalls die gleiche Einheit hat wie der absolute Fehler. Dieser Fehler heißt reduzierter (oder normierter) Fehler und es gilt:

$$\text{reduzierter Fehler} = \frac{\text{(absoluter Fehler)}}{\text{(Meßspanne)}}$$

Wie der relative Fehler läßt sich auch der reduzierte Fehler in Prozent angeben. Deshalb sollte die Bezeichnung "prozentualer" Fehler vermieden und stets angegeben werden, welcher Fehler gemeint ist.

Der reduzierte Fehler eines Meßgerätes gilt, wenn nichts anderes angegeben ist, im gesamten Meßbereich.

Zusammenfassung: Die Bezeichnung absoluter, relativer und reduzierter Fehler beziehen sich auf die Angabe von Fehlern. Sie werden in unterschiedlichen Maßeinheiten angegeben und sind auf alle Fehlerarten anzuwenden. Die oben genannte Unterscheidung ist demnach keine Fehlersystematik. Dabei sagt der relative Fehler etwas aus über die Genauigkeit einer Messung oder eines Meßwertes und der reduzierte Fehler etwas über die Genauigkeit eines Meßmittels.

2.3.4 Gliederung der Meßfehler

Eine größenmäßige Abschätzung aller auftretenden Meßfehlerbeiträge und eine Zerlegung des Fehlers in die auf verschiedene Ursachen zurückgehenden Fehleranteile mit dem Ziel, sie bei der Bildung des Meßergebnisses zu berücksichtigen, ist meist sehr schwierig.
Es ist daher sinnvoll, die Meßfehler nach verschiedenen Gesichtspunkten zu wenigen Fehlergruppen zusammenzufassen, die auf gleiche Weise behandelt werden können. Die Einteilung der Meßfehler, die am weitesten verbreitet ist und den praktischen Erfordernissen am besten entspricht, zeigt *Bild 2.13*.

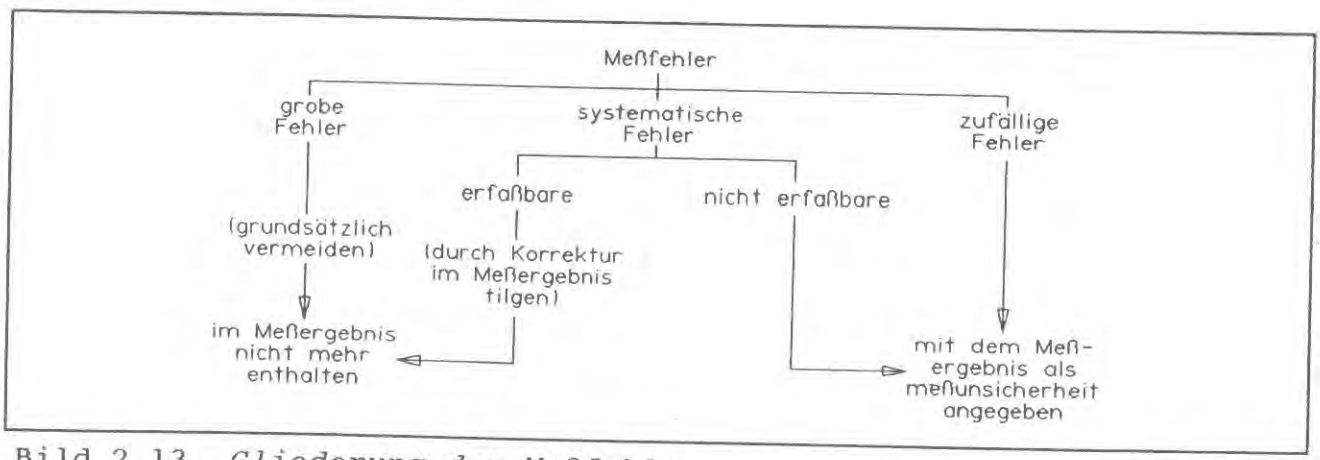


Bild 2.13 *Gliederung der Meßfehler*

2.4 STATISCHE MESSFEHLER

2.4.1 Fehlerarten

2.4.1.1 Grobe Fehler

Die groben Fehler sind als uneigentliche Meßfehler von untergeordneter Bedeutung, weil sie durch Sorgfalt und Gewissenhaftigkeit vermeidbar sind. Diese meist übermäßig großen Fehler sind oft auf den ersten Blick als solche erkennbar, wodurch meist mit Berechtigung der zugehörige Meßwert als "*Ausreißer*" ausgeschieden wird.

Mit *statistischen Methoden* läßt sich auch ausreichend sicher entscheiden, ob übermäßig große Fehler als grobe oder als zufällige Fehler einzustufen sind.
Deshalb beschäftigen wir uns im folgenden mit den systematischen und zufälligen Fehlern, davon ausgehend, daß grobe Fehler grundsätzlich unterbleiben.

2.4.1.2 Systematische Fehler

Systematische oder beherrschbare Fehler nennt man solche Fehler, die unter gleichen Meßbedingungen (z. B. dasselbe Meßgerät, dieselbe Meßstelle, die gleichen Umweltbedingungen und Bezugstemperaturen) stets den gleichen Betrag und das gleiche Vorzeichen aufweisen. *Ihre Ursachen sind nach Art und Größe erfaßbar.*

Systematische Fehler sind somit grundsätzlich bestimmbar und können berücksichtigt werden. Die tatsächliche Bestimmung kann aber manchmal undurchführbar sein, weil unter Umständen nur bekannt ist, daß mehrere Fehlerursachen zusammenwirken, die sich aber größenmäßig nicht voneinander trennen lassen. Es ist somit zwischen erfaßbaren (bestimmbaren oder bekannten) und nicht erfaßbaren (nicht bestimmbaren oder unbekannten) systematischen Fehlern zu unterscheiden.

Einige Beispiele für systematische Fehler sind Anlagefehler, Einwirkungen der Meßkraft (Abplattung oder Durchbiegung des Meßgerätes, des Prüfgegenstandes oder des Normales), Teilungsfehler

eines Meßstabes und durch Abweichung der Meßtemperatur verursachter Unterschied in der Längenänderung zwischen Prüfgegenstand und Normal.

Nur durch Änderung aller Meßumstände sind systematische Fehler erkennbar (falls sie nicht rechnerisch aus den Ursachen ermittelt werden). Vor allem durch Anwendung anderer Meßverfahren können sie systematisch erkannt und ausgeschaltet werden. Bloße Wiederholung oder Durchführung der Messung mit anderen Geräten, Beobachtern oder Umweltbedingungen führen nur dann zum Ziel, wenn sie die zumeist unbekannte fehlerverursachende Komponente direkt beeinflussen.

2.4.1.2.1 Erfaßbare systematische Fehler

Erfaßbare systematische Fehler sind nach Betrag und Vorzeichen bekannt und können zur Berichtigung des Meßwertes benutzt werden. Das Meßergebnis ist unrichtig, wenn sie nicht berücksichtigt werden. Erfaßbar sind die systematischen Fehler von Meßgeräten durch Vergleich mit Maßverkörperungen oder Meßgeräten, deren Fehler bekannt sind (Anschluß- oder Kontrollmessung).

Eine *Anschlußmessung* ist der Vergleich eines Meßgerätes mit einer Maßverkörperung unter definierten Bedingungen.

Eine *Kontrollmessung* ist eine zweite Messung am unveränderten Prüfgegenstand mit einem anderen Meßgerät, dessen Fehler bekannt und möglichst klein ist.

Die erfaßbaren systematischen Fehler sind ihrerseits als Meßergebnisse mit Unsicherheiten behaftet, die zu berücksichtigen sind.
Die Berichtigung (Korrektion) hat den gleichen absoluten Zahlenwert wie der Fehler, aber das umgekehrte Vorzeichen. Wird die Berichtigung nicht durchgeführt, so werden die nicht berichtigten systematischen Fehler wie nicht erfaßbare systematische Fehler behandelt.

2.4.1.2.2 Nicht erfaßbare systematische Fehler

Nicht alle vorhandenen systematischen Fehler sind bekannt oder lassen sich erfassen. Von nicht erfaßbaren und nicht erfaßten systematischen Fehlern sind häufig nur die Grenzen bekannt, wie etwa Fehler von Endmaßen.
Diese nicht erfaßten Fehler haben immer ein bestimmtes Vorzeichen (+ oder -), das jedoch nicht bekannt ist. Deshalb werden die zwar abschätzbaren, aber nicht erfaßten systematischen Fehler wie zufällige Fehler behandelt. Sie genügen im allgemeinen auch den statistischen Gesetzmäßigkeiten und gehen dann mit dem Vorzeichen $\pm$ in die Berechnung der Meßunsicherheit ein.

Die Werte dieser Fehler können wie folgt ermittelt werden:

- aus der Angabe maximal zulässiger Werte, z. B. aus Normen oder Herstellerangeben,
- durch Festlegung maximaler Werte aufgrund durchgeführter Messungen,
- durch Berechnung aus beobachteten Schwankungen von Einflußgrößen.

2.4.1.3 Zufällige Fehler

Zufällige Fehler können an jeder Stelle und zu jeder Zeit ungleich nach Betrag und Vorzeichen auftreten. Ihre Ursachen werden von nicht erfaßbaren Änderungen des Prüfgegenstandes, des Meßgerätes, der Maßverkörperungen, der Umwelt und des Beobachters hervorgerufen.

Bei wiederholten Messungen aber sonst gleichen Bedingungen schwanken sie nach Vorzeichen und Größe. Sie sind im einzelnen nicht erfaßbar, nicht beherrschbar und auch nicht vermeidbar. Ihre Ursachen sind zahlenmäßig nicht bestimmbar und experimentell nicht trennbar, sie sind auch räumlich und zeitlich nicht konstant. Zumindest teilweise sind aber die Ursachen zufälliger Fehler die gleichen wie die der systematischen Fehler.

Die zufälligen Fehler machen das Meßergebnis unsicher. Sie bilden die *Grundlage für die Gütebeurteilung eines Meßverfahrens* und sind Bestandteil der Meßunsicherheit.

Auswirkungen zufälliger Fehler:
Wiederholt derselbe Prüfer am selben Prüfgegenstand eine Messung mit demselben Meßgerät unter gleichen Bedingungen oder vergleicht ein Prüfer mehrmals dasselbe Meßgerät mit demselben Normal unter gleichen Bedingungen (*Wiederholmeßreihe*), so werden die einzelnen Meßwerte infolge zufälliger Fehler voneinander abweichen (*streuen*).

2.4.2 Gegenüberstellung

In *Tabelle 2.4* sind systematische und zufällige Fehler einander gegenübergestellt.

Systematische Fehler	**Zufällige Fehler**
Ursachen	
gleichsinnig wirkende Unzulänglichkeiten der Meßmittel oder Umwelteinflüsse, z.B.: - konstruktive Mängel, - Abweichung der realisierten von der wahren Funktion; $x_a = f(x_e)$;	stochastisch wirkende konstruktive Unzulänglichkeiten der Meßmittel, zufällig auftretende Störeinflüsse, z.B.: - Reibung - Spiele in Lagern - elektronisches Rauschen;
Vorzeichen	
gleichbleibend, nur + oder - ;	wechselnd, + und - (etwa gleich oft);
Behandlung	
Berechnung nach Betrag und Vorzeichen und Berücksichtigung im Meßergebnis (durch Korrektion oder Berichtigung); wenn nicht bestimmbar, dann addieren zu zufälligen Fehlern;	Berechnung mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik und Angabe als Fehlergrenze (mit einer bestimmten statistischen Sicherheit) beim Meßergebnis;
Form der Wiedergabe	
nicht beim Meßergebnis (dort korrigiert);	beim Meßergebnis als Fehlergrenze nach oben und unten: $\pm$ U;
Fortpflanzung bei Weiterverarbeitung der Meßergebnisse	
Fehlerfortpflanzungsgesetz (linear);	Fehlerfortpflanzungsgesetz (quadratisch);
Vermeidung oder Verkleinerung	
Beseitigung der Ursachen oder automatische Korrekturglieder;	Verkleinerung der Ursachen oder mehrere Messungen (Mittelwert).

Tabelle 2.4 *Gegenüberstellung der Meßfehler*

Der *Unterschied* zwischen systematischen und zufälligen Fehleranteilen ist vor allem deswegen beachtenswert, weil die systematischen einen Meßwert unrichtig, die zufälligen dagegen unsicher machen. Daraus folgt, daß diese beiden Fehleranteile unterschiedlich behandelt werden müssen.

Die **systematischen Fehler** müssen grundsätzlich quantitativ erfaßt und im Meßergebnis durch eine *Korrektion* berücksichtigt werden. Die **zufälligen Fehler** werden dagegen mit den Hilfsmitteln der *Wahrscheinlichkeitsrechnung* ermittelt und beim Meßergebnis als *Meßunsicherheit* mit angegeben.

2.4.3 Allgemeines zur Fehlereliminierung

Bringt man die Meßfehler in die richtige Relation zum vorgegebenen Verwendungszweck des Resultates, so ist es in manchen praktischen Fällen durchaus möglich, die Meßfehler so weit unter eine bestimmte Grenze zu senken, daß man *Meßergebnisse* erhält, die so gut wie *fehlerfrei* sind.

Ob man einen Meßfehler im Meßergebnis zu berücksichtigen hat oder nicht, hängt von der aus der Meßaufgabe resultierenden *Genauigkeitsanforderung* ab. Dabei ist es zweckmäßig, Meßprobleme mit hohen, normalen und geringen Genauigkeitsanforderungen zu unterscheiden. Es gibt im täglichen Leben Meßaufgaben, bei denen die ohne Aufwand erreichbare Genauigkeit (mit Lineal, Gliedermaßstab, Uhr, Thermometer) völlig ausreicht. In der Präzisionsmeßtechnik dagegen werden hohe Anforderungen gestellt oder es wird sogar verlangt, so genau wie möglich zu messen.

2.4.4 Statistische Grundlagen

Die statistische Fehlerrechnung benutzt die *Hilfsmittel der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik*. Diese Fehlerrechnung bezieht sich ausschließlich auf zufällige Fehler, wodurch man keine Aussagen über den vollständigen Meßfehler erhält. Grundlage der Fehlerrechnung ist die *Wiederholmeßreihe*, bei der eine Anzahl von

Einzelmessungen (meist zwischen 8 und 25) unter gleichen Bedingungen wiederholt vorgenommen wird.

Die Meßwerte (x_1, x_2, ..., x_n) weichen voneinander ab, sie streuen. Man spricht von einer "*Verteilung*" der Werte, wobei zwischen einer Grundgesamtheit, bei der eine sehr große (nach unendlich gehende) Anzahl von Meßwerten zur Verfügung steht, die man niemals exakt erfassen kann, und beobachteten Werten zu unterscheiden ist. Häufig ist die Verteilung dieser Werte in der Technik nach dem Modell der Standardnormalverteilung (*Gaußsche Normalverteilung*) gegeben, die als brauchbare Näherung angesehen werden kann.

Bei einer genügend großen Anzahl von beobachteten Werten streuen diese meist nach einer Standardnormalverteilung (*Bild 2.14*), wobei die Wahrscheinlichkeitsdichte im allgemeinen gut durch ein Histogramm angenähert werden kann.

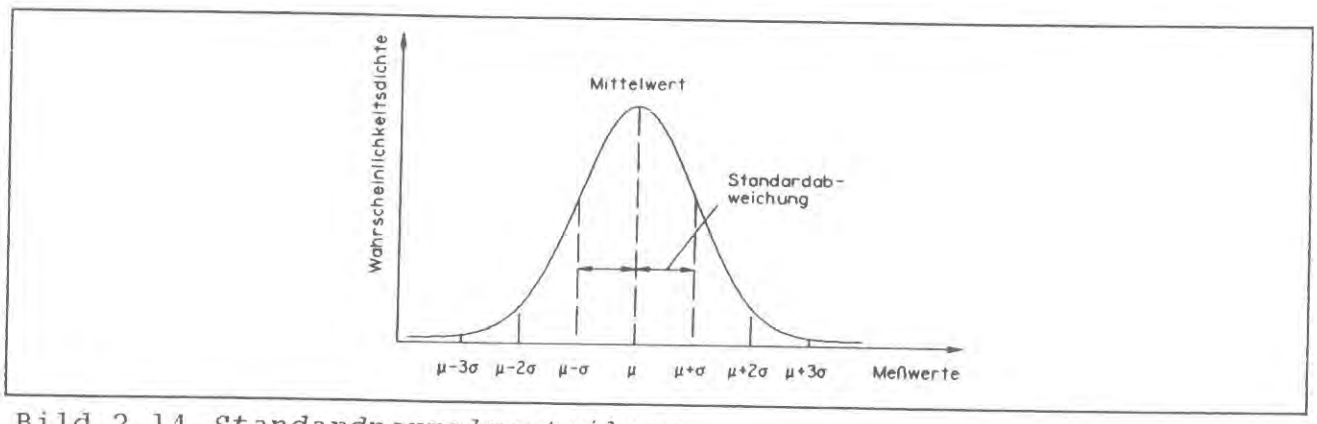


Bild 2.14 *Standardnormalverteilung*

Zur Charakterisierung der Wiederholmeßreihe werden die folgenden Parameter herangezogen:

Arithmetischer Mittelwert:

$$\bar{x} = (1/n) \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (2.5.1)$$

Spannweite:

$$R = x_{max} - x_{min} \qquad (2.5.2)$$

x_{max} ... größter Meßwert
x_{min} ... kleinster Meßwert

Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - n\bar{x}^2 \right)} \qquad (2.5.3)$$

Varianz:
Das Quadrat der Standardabweichung wird Varianz s^2 bezeichnet.

Die Parameter dieser "Glockenkurve" nach *Bild 2.14* sind:
- Mittelwert μ und
- Standardabweichung σ.

Für die unbekannten Parameter der Verteilung (Grundgesamtheit) werden der
- Mittelwert $\bar{x}$ und die
- Standardabweichung s der Stichprobe

als Schätzwerte verwendet. Für deren Ermittlung kann aber wiederum nur eine endliche Anzahl von beobachteten Werten (x_1, x_2, ..., x_n) herangezogen werden.

Die *Standardnormalverteilung* ist nun dadurch gekennzeichnet, daß in $\pm ks$- bzw. $\pm k\sigma$-Bereichen jeweils in Abhängigkeit von k (k = 1,2,3,..) gewisse Anteile der Werte liegen (*Bild 2.15*).

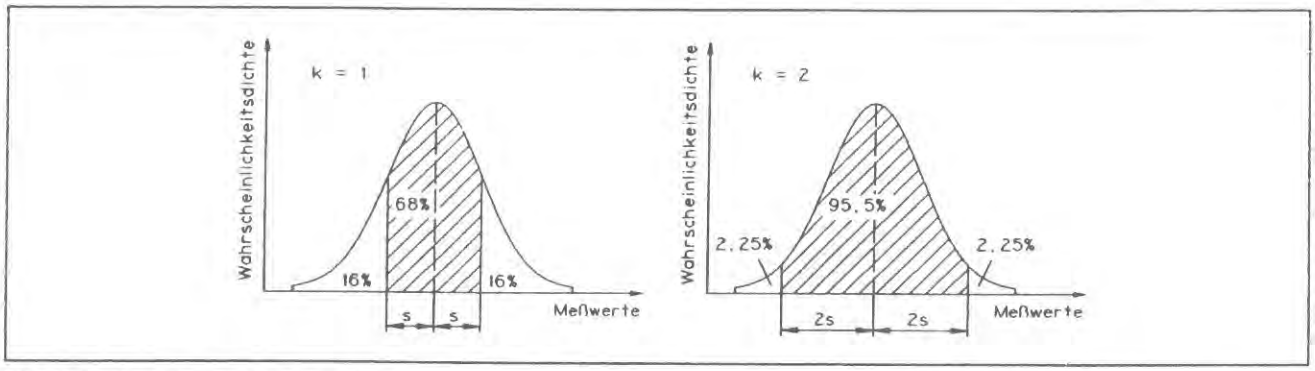


Bild 2.15 *Wahrscheinlichkeitsdichte der Standardnormalverteilung*

2.5 DYNAMISCHE MESSFEHLER

Soll eine zeitlich veränderliche Größe durch ein Meßsystem erfaßt werden, so entsteht in jedem Fall ein dynamischer Fehler. Dieser entsteht dadurch, daß die Anzeige $x_a(t)$ dem Meßgrößenverlauf x(t) nur unvollkommen zu folgen vermag. Infolge mechanischer, thermischer oder elektrischer Energiespeicherung sind *Trägheiten bei Meßeinrichtungen* unvermeidlich. Der angezeigte Meßwert kann demzufolge dem wahren, zeitlich variablen Meßwertverlauf nicht beliebig rasch folgen.

Dieser Fehler kann bei langsam veränderlichen Meßgrößen vernachlässigbar klein sein. Bei schnell bewegten Meßgrößen kann er jedoch beträchtlich sein und die Meßergebnisse vollkommen unbrauchbar machen.

Diese dynamischen Fehler sind systematische Fehler, denn ihre Vorzeichen sind nicht zufällig, sondern die Meßgröße wird beim Anwachsen des Wertes zu klein und bei Abnahme zu groß angezeigt. Bei schwingenden Veränderungen treten wechselnde Vorzeichen auf, was vor allem bei sprung- oder stoßförmigen Eingangsgrößenänderungen (hohe Änderungsgeschwindigkeit) und bei periodischen Eingangsgrößenänderungen in der Nähe der Eigenfrequenz von Bedeutung ist. Die Vergrößerung des Amplitudenverhältnisses durch Anregung der Eigenfrequenz und die Phasenverschiebung sind ebenfalls Erscheinungsformen des dynamischen Fehlers.

2.5.1 Auswirkungen des dynamischen Fehlers auf analoge und digitale Meßgeräte

Diese vorangegangenen Betrachtungen beziehen sich vor allem auf analoge Meßmittel. Auf digitale Meßgeräte sind sie insoweit anwendbar, falls diese ebenfalls bewegte Teile (z. B. mechanische Zähler) oder Schaltungen mit Induktivitäten und Kapazitäten enthalten. Die Sensoren digitaler Meßmittel sind prinzipbedingt gleichfalls *Verzögerungsglieder*. So kann zum Beispiel ein digitales Thermometer kein verzögerungsfreies Proportionalverhalten aufweisen, weil der Temperaturausgleich zwischen Fühler und Meßobjekt endliche Zeiten in Anspruch nimmt.

Dem gegenüber sind die elektronischen Baugruppen digitaler Geräte, besonders wenn sie aus integrierten Schaltungen aufgebaut sind, so schnell, daß sie das Zeitverhalten nicht entscheidend beeinflussen. Bei sehr hohen Meßgrößenänderungsgeschwindigkeiten sind jedoch spezielle analoge Meßgeräte den digitalen häufig überlegen. Das hängt mit der prinzipbedingten Quantisierung der Meßgröße (siehe *Bild 2.23*) zusammen, die bei digitalen Meßgeräten, speziell bei Analog-Digital-Umsetzern, endliche Umsetzzeiten zur Folge hat.

Die Umsetzzeit eines Analog-Digital-Umsetzers kennzeichnet sein dynamisches Verhalten ähnlich wie die Beruhigungszeit ein analoges Meßgerät.

Eine Verbesserung des Zeitverhaltens durch Veränderung der technischen Parameter von Meßgeräten ist oft mit Empfindlichkeitseinbußen verbunden. Daher sind elektrische Meßverfahren dank der hochentwickelten Verstärkertechnik im allgemeinen vorteilhafter.

Günstiger ist es, wenn man zu Meßverfahren übergeht, die auf anderen Meßprinzipien beruhen. Dabei können sich Lösungsmöglichkeiten ergeben, die auch bei hoher Empfindlichkeit kleine dynamische Fehler zu erreichen gestatten.

2.5.2 Definition des dynamischen Meßfehlers

Vorausgesetzt es handelt sich um ein lineares Meßsystem, so sind die statischen Meßfehler E_{stat} unabhängig von den dynamischen und dürfen daher aus der folgenden Betrachtung weggelassen werden. Der statisch berichtigte Anzeigewert x_a^* ergibt sich dann zu $x_a^* = x_a - E_{stat}$.

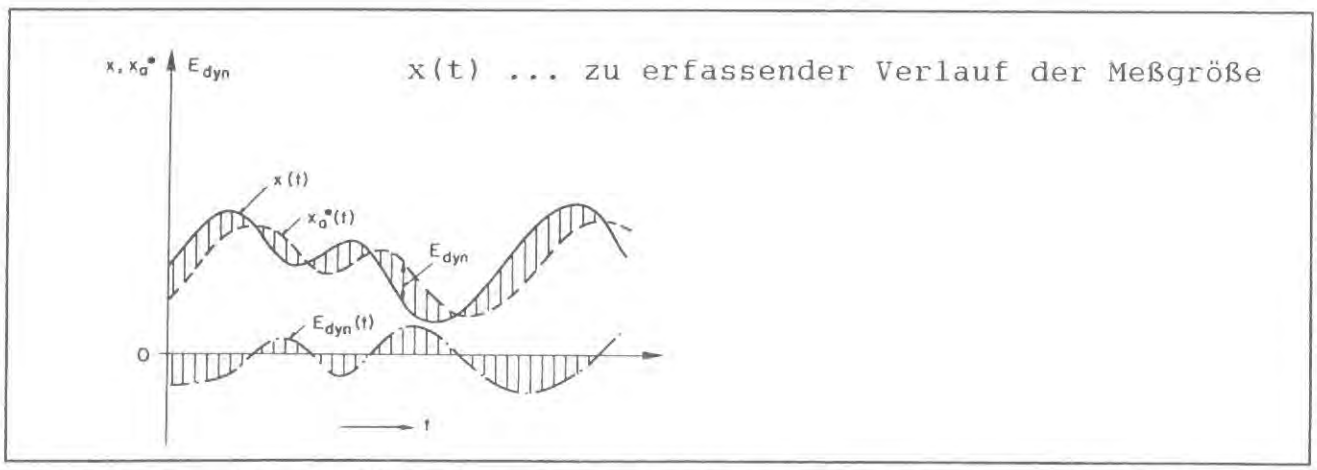


Bild 2.16 *Zur Definition des momentanen dynamischen Meßfehlers*

Dann kann der momentane dynamische Fehler (siehe *Bild 2.16*) definiert werden als:

$$E_{dyn}(t) = x_a^*(t) - x(t) \qquad (2.5.4a)$$

wobei im Beharrungszustand $\bar{x}_a^* = \bar{x}$ und $E_{dyn/Beharr} \equiv 0$ wird.

Da die Verläufe $x_a^*(t)$ und $x(t)$ Zeitfunktionen sind, ist der momentane dynamische Fehler ebenfalls eine Funktion der Zeit. Um die Beschreibung im Frequenzbereich zu erhalten, wird die Gleichung (2.5.4a) einer Laplace-Transformation unterworfen. Man erhält dann formall:

$$E_{dyn}(s) = x_a^*(s) - x(s) \qquad (2.5.4b)$$

Da E_{dyn} der dynamische Meßfehlerverlauf ist, wird diese Angabe selten direkt benützt. Praktischer hingegen sind Mittelwertangaben. Für *stationäre Meßgrößenverläufe* (periodische bzw. stationäre stochastische Verläufe) ist der mittlere quadratische dynamische Fehler besonders interessant:

$$E_{dyn}^2 = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x_a^* - x)^2 dt \qquad (2.5.5)$$

2.5.3 Vermeidung und Korrektur dynamischer Fehler

Der dynamische Fehler wird hervorgerufen durch das vom idealen Übertragungsverhalten (G(s)=1) abweichende Übertragungsverhalten realer Meßsysteme. Die Ermittlung des zeitlichen Verlaufes einer Meßgröße, der auf einem Schreibstreifen festgehalten worden ist, läßt sich bei bekannten Zeitverhalten des Meßgerätes durch nachträgliche Auswertung der tatäschliche (von dynamischen Fehlern befreite) Zeitverlauf aus dem gemessenen Verlauf rechnerisch ermitteln.

Abgesehen von einer nachträglichen rechnerischen Korrektur, die nur für einfache Meßsysteme von praktischer Bedeutung ist, muß daher bei gegebenem Meßgrößenverlauf das *Übertragungsverhalten* des Meßsystems verbessert werden, wenn die dynamischen Fehler reduziert werden sollen. Das kann durch Wahl einer "schnelleren", das heißt dynamisch besseren Meßvorrichtung, anstelle einer "trägeren" geschehen. Eine andere Möglichkeit ist die Verbesserung des vorhandenen Übertragungsverhaltens durch Zuschalten eines sogenannten *Korrektur-Netzwerkes*.

Eine häufige Art der Zuschaltung ist die in *Bild 2.17* schematisch angedeutete Serienschaltung.

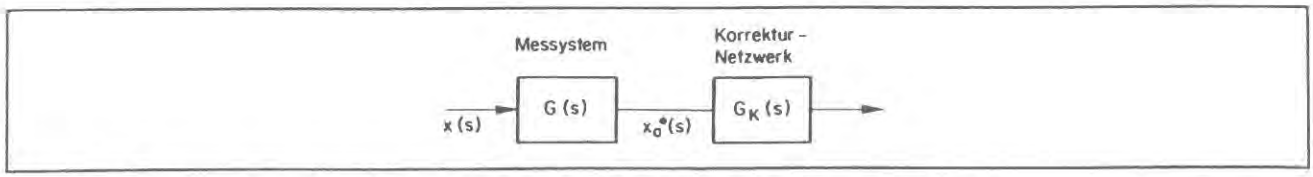


Bild 2.17 *Nachschalten eines Korrektur-Netzwerkes*

Das Übertragungverhalten dieses ergänzten Meßsystems wäre ideal, wenn $G(s) \cdot G_K(s) = 1$. Daraus bestimmt sich die Übertragungsfunktion des "idealen" Korrektur-Netzwerkes zu

$$G_K(s) = 1/G(s) \qquad (2.5.6)$$

Die Realisierung von $1/G(s)$ ist aber immer nur näherungsweise möglich, da $G(s)$ in jedem Fall Verzögerungscharakter aufweist.

Weiters besteht auch die Möglichkeit der Anwendung von Kreisschaltungen (*Rückführschaltungen*), die den Einbau eines Operationsverstärkers mit hohem Verstärkungsfaktor K in der Meßkette voraussetzen (*Bild 2.18*). Diese Verstärkung kann nicht beliebig hoch gewählt werden, da sonst die Stabilität des Regelkreises nicht mehr gegeben ist.

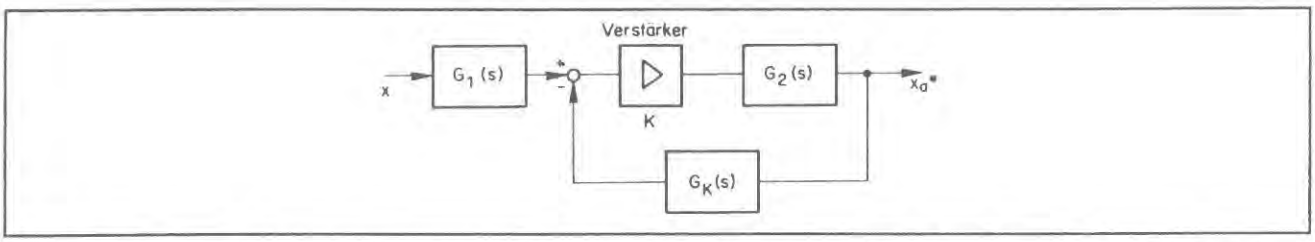


Bild 2.18 *Beispiel eines Korrektur-Netzwerkes in Kreisschaltung.* $G_K(s) = G_1(s)$

Es ergeben sich folgende Möglichkeiten zur Verkleinerung von dynamischen Fehlern:

(1) konstruktive Veränderung vorhandener oder Entwicklung neuer Meßgeräte bzw. -verfahren;

(2) nachträgliche Korrektur der dynamischen Fehler aufgrund der Erkenntnis des Zeitverhaltens (von Hand oder maschinell);

(3) mit der Messung gleichzeitig erfolgende Korrektur der dynamischen Fehler durch Korrekturglieder oder Rechner.

2.5.4 Dynamische Störwirkungen

Von den Störwirkungen sind insbesondere die dem Meßsignal überlagerten äußeren und inneren Störungen häufig dynamischer Art (z. B. Rauschen elektronischer Bauelemte). Diese entstehenden Fehlersignale treten praktisch in allen Frequenzen mit etwa gleicher Amplitude auf. Da sie im allgemeinen mit dem Nutzsignal übertragen werden, unterliegen auch diese Störsignale der Verformung entsprechend dem Übertragungsverhalten des durchlaufenen Teils der Meßkette (*Bild 2.19*).

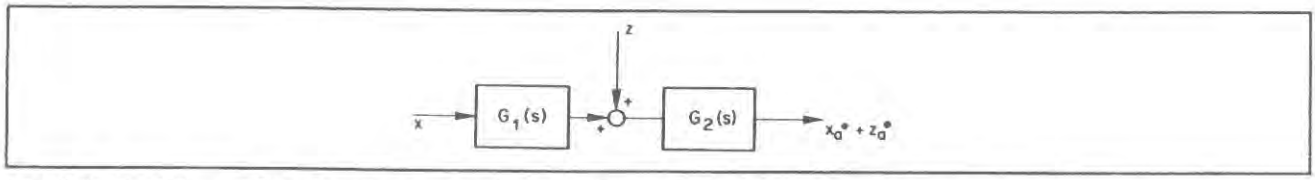


Bild 2.19 *Blockschema eines Meßsystems mit überlagerten inneren und äußeren Störungen*

Dadurch ergibt sich die Frage nach der Stärke der am Austritt des Meßsystems noch verbleibenden Störsignale sowie nach den Möglichkeiten, diese Stärke im Sinne einer Verbesserung des Verhältnisses zwischen Nutz- und Störsignalanteil zu beeinflussen.

Das in der Anzeige enthaltene Störsignal z_a^* läßt sich auf das in *Bild 2.19* dargestellte Meßsystem wie folgt berechnen:

$$z(s) \cdot G_2(s) = z_a^*(s) \qquad (2.5.7)$$

Verminderung bzw. Eliminierung der Auswirkungen von Störgrößen:

(1) Unterdrückung der Störgrößen an ihrem Entstehungsort. Dies ist bei einigen Störgrößen, wie elektrischen Feldern (Abschalten von Stromkreisen) oder Erschütterungen (Abschalten von Maschinen) möglich. Man kann auch die Messungen in Zeiten verlegen, in denen diese Störungen nicht auftreten.

(2) Fernhalten und Abschirmung von Meßmitteln. Durch klimatisierte Meßräume lassen sich Temperaturen- und Luftfeuchteschwankungen vermeiden, durch Faradaysche Käfige und zweckentsprechende Erdung sind elektrische Störungen beherrschbar. Wirkt der Messende selbst als Störgrößenquelle (Wärmestrahlung), so hilft eine Automatisierung der Messungen.

(3) Herabsetzung der Störgrößenempfindlichkeit von Meßmitteln, z. B. durch:

- Auswahl geeigneter Meßprinzipien, Meßmethoden oder Meßverfahren,
- Benutzung weniger störempfindlicher Konstruktionsprinzipien oder -materialien bzw. Bauelemente.

(4) Meßtechnische Erfassung der Störgrößenwerte und ihre automatische Korrektur. Dies ist besonders durch das Vordringen der Mikroelektronik in die Meßtechnik interessant geworden.

2.6 MESSMETHODEN UND MESSVERFAHREN

2.6.1 Analoge und digitale Messung

Die Unterscheidung analoge und digitale Messung kann auf das Prinzip einer Messung bezogen werden, aber auch auf die Art einer Meßwertausgabe (Meßwertanzeige).

2.6.1.1 Analoge Meßverfahren

Nach der Definition des Meßwertes erhält man diesen als Produkt einer Maßzahl mit der Dimension des zugehörigen Normals. Im Verlauf des Meßvorganges wird die Information über diese Maßzahl durch Signale übertragen.

Die *analogen Meßverfahren* enthalten diese Information in der direkten Zuordnung der Maßzahl der Meßgröße (physikalische Größe, die durch die Messung erfaßt werden soll, z. B. Länge, Druck) zur Maßzahl der physkalischen Größe des Signals. Es wird nicht die Maßzahl selbst, sondern eine analoge Größe verarbeitet.
Bei analogen Meßverfahren erhält man am Ausgang der Meßkette eine elektrische Größe (Spannung oder Strom), die dem Wert der Meßgröße proportional ist. Der Zusammenhang zwischen Meßgröße und Ausgangsgröße ist kontinuierlich, wobei dieser Zusammenhang linear oder nicht linear sein kann.

2.6.1.2 Digitale Meßverfahren

Die *digitalen Verfahren* sind dadurch gekennzeichnet, daß sie die Maßzahl selber, genauer gesagt die Ziffern der Maßzahl verarbeiten.

Die Maßzahl des Meßwertes (oder eine andere proportionale Zahl) wird in Form einer endlichen Binärzahl übertragen und nach Umsetzung als Dezimalzahl angezeigt.

2.6.1.3 Beispiele für analoge und digitale Längenmeßsysteme

Analoge Wegmeßsysteme sind das *Inductosyn* und das *Drehmeldersystem*. Beim Inductosyn-System besteht der Maßstab (Skala) aus einer Leiterplatte mit mäanderförmig aufgebrachten Leiterzügen über der sich parallel ein Abtastkopf (Reiter) bewegt, der zwei um 90° gegeneinander versetzte Ausschnitte dieses Mäanderrasters trägt (*Bild 2.20*).

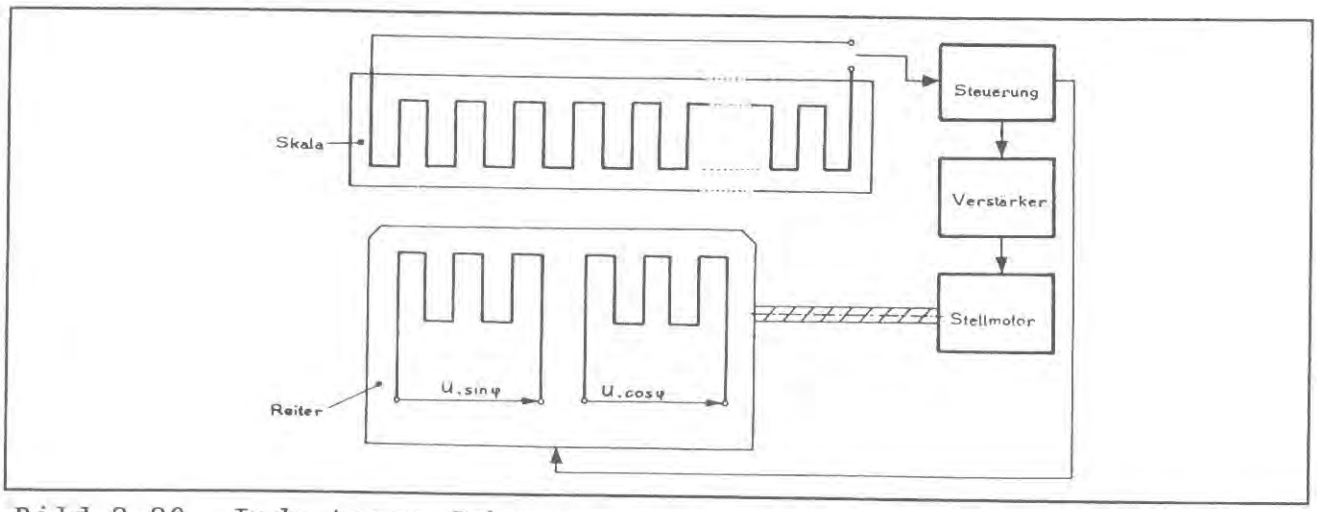


Bild 2.20 *Inductosyn-Schema*

Die Leiterschleife des Rasterlineals wird mit einer Spannung gespeist. Die in den Leiterschleifen des Reiters induzierten Spannungen ändern sich periodisch mit dem zurückgelegten Weg. Durch die Phasenverschiebung zwischen den beiden Spannungen U_1 und U_2 ist die Bewegungsrichtung kennzeichnet.

Digitale Wegmeßsysteme sind z. B. die *inkrementale Wegmessung* mittels Strichmaßstab, die *kodierten Längengeber* und das *Interferometer*.

Bei der Strichgitterabtastung liegt ein Glasmaßstab mit Strichgitterteilung nach *Bild 2.21* zugrunde, der mit dem bewegten System verbunden ist.

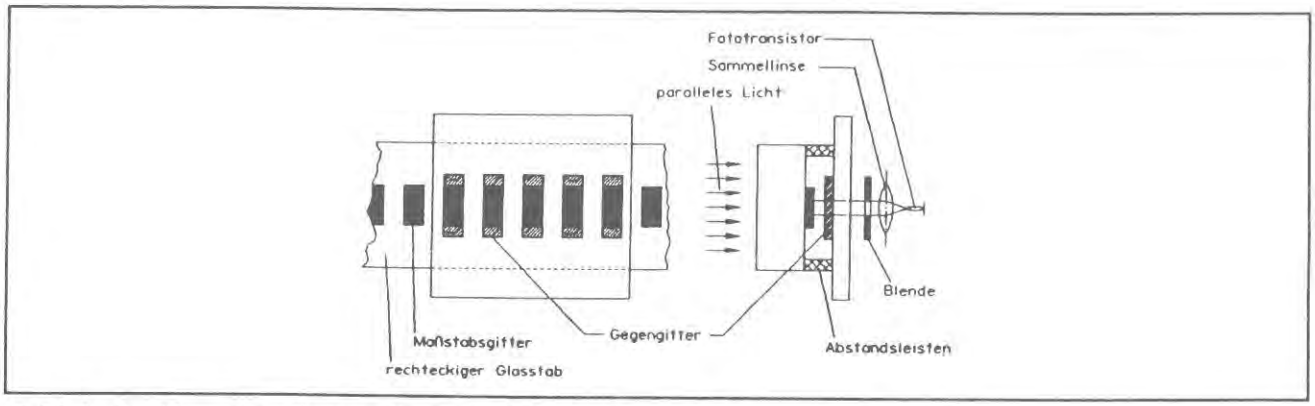


Bild 2.21 *Strichmaßstab-Abtastung, Prinzip*

Die Gitterteilung besteht z. B. aus 5 µm breiten lichtundurchlässigen Segmenten (Strichen) und gleich breiten Lücken, die im Strahlengang zwischen der Lichtquelle und dem Photodetektor liegt. Die Ausgangsspannung des Detektors ändert sich bei einer Bewegung des Rasters in Abhängigkeit von der Beleuchtung (ungefähr dreieckförmig). Anschließend wird die Ausgangsspannung in einem Komparator mit einem vorgegebenen Schwellwert verglichen und in ein binäres Signal umgesetzt. Die dabei entstehende Folge von rechteckförmigen Impulsen des Meßtasters wird auf einen Zähler übertragen, der z. B. die ansteigenden Flanken erfaßt. Der Zählerstand ist dann ein Maß für die zurückgelegte Strecke.

2.6.1.4 Analoge und digitale Meßwertausgabe

Der besonders augenfällige Unterschied liegt dabei darin, daß digitale Geräte die Meßwerte im allgemeinen in *Ziffendarstellung* ausgeben, während die Form für die Ausgabe analoger Signale die *Abbildung des Meßwertes auf eine Strecke oder einen Winkel* ist, wobei dem Messenden die Umsetzung in einen Zahlenwert obliegt.

Analoge Meßwerte werden verbreitet mit Hilfe einer feststehenden Skala und einer beweglichen Anzeigemarke ausgegeben. Ausgangsgröße ist dabei der von der Anzeigemarke zurückgelegte Weg. Bei modernen Geräten finden sich auch zunehmend feststehende Meßmarken und bewegliche Skalen sowie Leuchtbandanzeigen, bei denen das Ende des Leuchtbandes die Anzeigemarke bildet. Als Meßmarken dienen vorzugs-

weise Zeiger, aber auch Flüssigkeitsmenisken (z. B. beim Quecksilberthermometer), Lichtpunkte (z. B. beim Galvanometer) u. ä. Bei einem Lineal besteht das ganze Meßgerät nur aus der Skala. Anzeigemarken sind die Begrenzungen des jeweiligen Meßobjektes, z. B. entsprechende Kanten.

Digitale Ausgabe von Meßwerten ist im Vergleich zu analoger Meßwertausgabe für den Anwender im allgemeinen einfacher, weil der Wert direkt in Ziffernform abgelesen werden kann. Fallweise ist in Abhängigkeit vom Gerätetyp noch die eingestellte Einheit und das Komma zu beachten.

Ähnliches wie für die Meßwert-Ausgabe gilt für die *Registrierung* (*Bild 2.22*). Während die adäquate Methode für die Fixierung analoger Ausgangsgrößen die graphische Darstellung in Form stetiger Kurvenzüge ist, sind es bei digitalen Methoden Zahlenkolonnen und Tabellen.

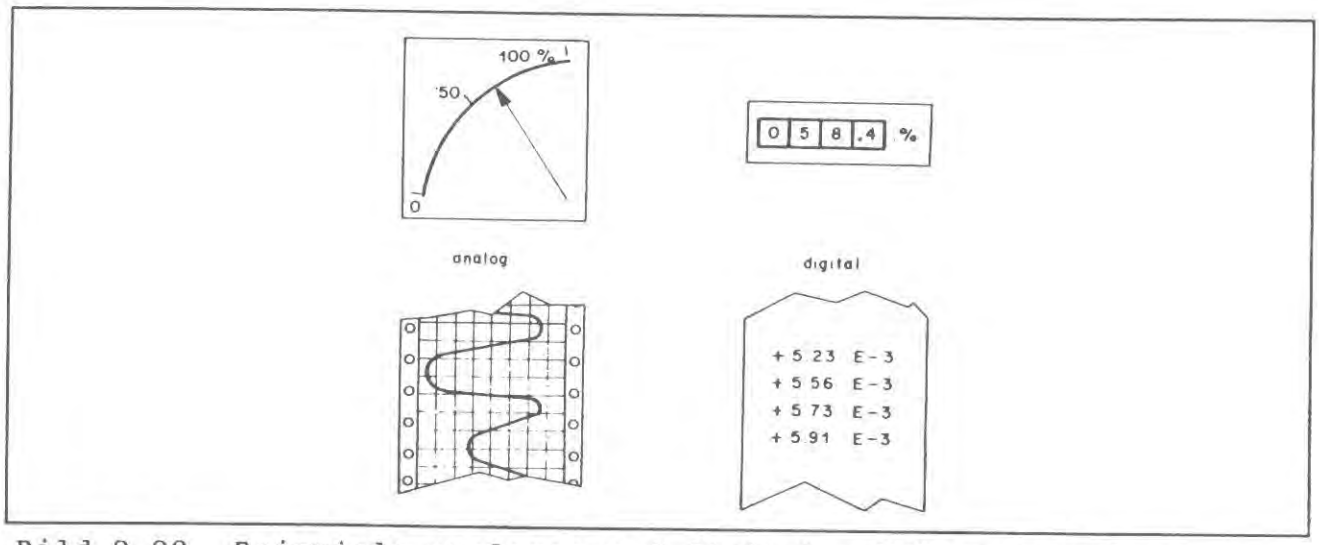


Bild 2.22 *Beispiele analoger und digitaler Meßwertausgaben*

Die Umsetzung in graphische Darstellungen ergibt zunächst treppenförmige Kurvenverläufe, die nur durch weitere technische Hilfsmittel "geglättet" werden können.

Ist der zeitliche Verlauf $x = f(t)$ von kontinuierlich anfallenden Meßwerten von Interesse, so ermöglichen analoge Verfahren auch die laufende Erfassung solcher Meßgrößenänderungen. Dagegen hat die bei digitalen Verfahren erfolgende Quantisierung der Meßwerte in eine

endliche Anzahl von Meßwertstufen auch zwangsläufig eine Diskontinuität hinsichtlich des Zeitverlaufs zur Folge (siehe *Bild 2.23*).

Sofern x_{dig} immer auf den nächsten Wert springt, wenn x um einen bestimmten Schwellenwert zugenommen hat, ergibt sich eine von der Feinheit der Quantisierung und der Kurvensteigung abhängige Quantisierung der Zeit t.

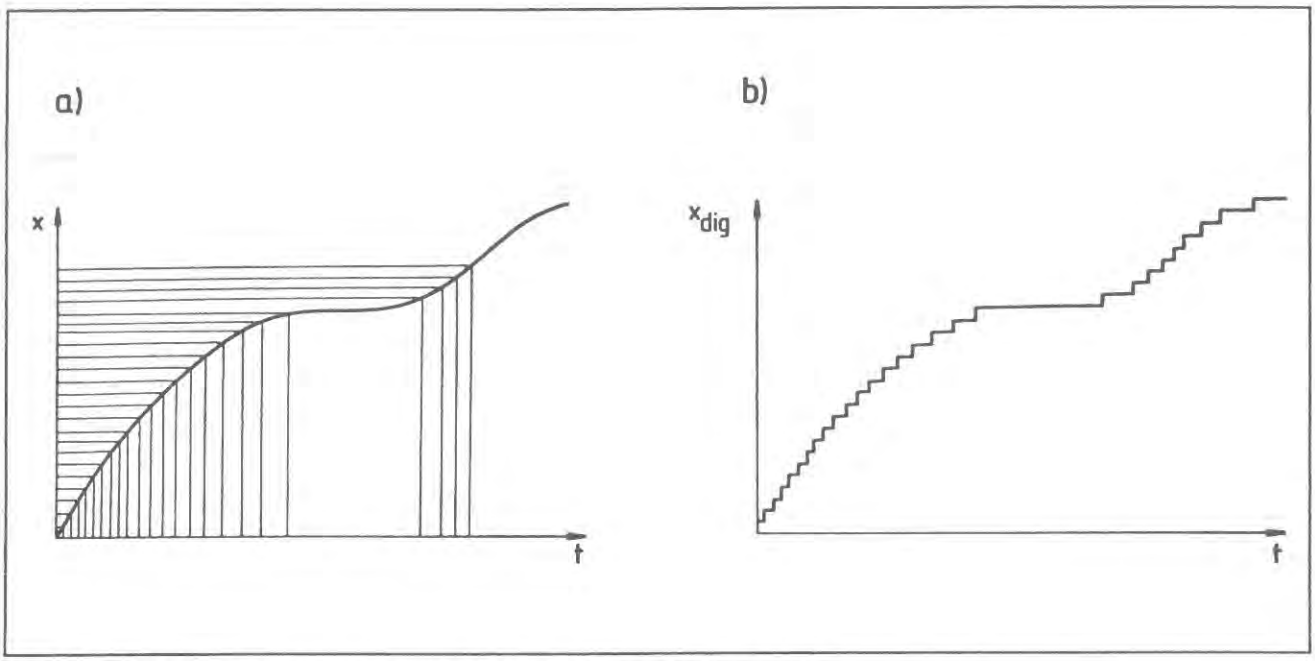


Bild 2.23 *Analoge und digitale Wiedergabe*
a) *Analog ermittelter Zeitverlauf der Größe x = f(t)*
b) *digitale Wiedergabe* x_{dig}

Diese äußeren Merkmale haben nur orientierenden Charakter und erlauben nicht immer eine sichere Unterscheidung. Der prinzipielle Unterschied zwischen analogen und digitalen Meßmethoden liegt im Wertevorrat der benutzten Signale, der bei analogen Methoden im Prinzip unendlich, bei digitalen in Folge der Quantisierung jedoch endlich ist. Dies wird schon durch die Meßwertanzeige deutlich: Stehen 3 Stellen zur Verfügung, so können nur 1000 Zahlenwerte (z.B. 0 - 999) wiedergegeben werden. Die unendlich vielen, stetig aufeinanderfolgenden Werte der Meßgröße müssen also für die digitale Abbildung in 1000 gleich große "Portionen" aufgeteilt werden, von denen jede 1/1000 des Meßbereiches beträgt.

2.6.1.5 Vergleich analoger und digitaler Meßmethoden

Ein Vergleich analoger und digitaler Meßmethoden nach *Tabelle 2.5* zeigt also, daß beide Arten spezifische Vorteile haben. Demzufolge geht es auch nicht darum, die analogen generell durch die digitalen zu ersetzen. Allerdings sind einige Eigenschaften der digitalen Meßmethoden in Verbindung mit der Entwicklung der Mikroelektronik die Ursache dafür, daß die Bedeutung der digitalen Meßtechnik immer noch zunimmt.

Von Details abgesehen, gibt es im wesentlichen 4 Gründe für die *Überlegenheit digitaler Methoden* bei der Lösung bestimmer Meßprobleme:

- Vermeidung von Informationsverlusten bei der Meßwertbildung,
- Vermeidung von Informationsverlusten bei der Informationsweiterleitung,
- gute Verarbeitbarkeit digitaler Signale,
- gute Speicherfähigkeit digitaler Signale.

Informationsverluste bei der Meßwertbildung mit Hilfe digitaler Methoden werden mit Sicherheit immer dann vermieden, wenn das primäre Abbildungssignal von vornherein in digitaler Form anfällt.

Die technische, aber nicht unbedingt auch ökonomische Überlegenheit digitaler Methoden bei der Weiterleitung von Meßinformationen, insbesondere über große Entfernung, läßt sich durch entsprechende Beispiele leicht verdeutlichen.

Digitale Signale können durch Benutzung von selbstkorrigierenden Algorithmen fehlerfrei übertragen werden, während bei der Übertragung analoger Signale diese immer dem Rauscheinfluß unterliegen.

Die in manchen Fällen bessere Verarbeitbarkeit digitaler Signale hängt damit zusammen, daß Digitalrechner für die meisten Aufgaben den Analogrechnern technisch überlegen sind. Da immer mehr Rechner und Mikroprozessoren eingesetzt werden, sind digitale Signale vorzuziehen, denn analoge Signale müssen im Rechner erst in digitale umgesetzt werden.

Die Überlegenheit digitaler Signale bei der Informationsspeicherung ist aus der maschinellen Rechentechnik bekannt. Analoge Signale ohne Informationsverluste zu speichern ist aufwendiger. Außerdem wird auch die Entwicklung der Speichertechnik durch die Verbreitung der Digitalrechner so gefördert, daß eine Orientierung auf digitale Speicher die logische Folge ist.

Neben den technischen Gesichtspunkten sind natürlich die wirtschaftlichen Aspekte zu prüfen, denn die Umsetzung eines ursprünglich analog anfallenden Meßwertes in einen digitalen ist auf jeden Fall mit zusätzlichem Aufwand verbunden. Deshalb ist stets zu prüfen, ob der Übergang zu digitalen Signalen auch wirklich zweckmäßig ist.

Gesichtspunkte	**a n a l o g**	**d i g i t a l**
prinzipieller Wertevorrat	unendlich	endlich
Meßbereich	begrenzt	beliebig
Bedienung	Mindestkenntnisse nötig	sehr einfach
Robustheit	begrenzt	sehr hoch
Zuverlässigkeit	kaum noch zu erhöhen	noch zu steigern
technischer Aufwand	mäßig, fehlergrenzenabhängig	fallend, durch LSI-Technologie
technisch nutzbare Fehlergrenze und Auflösungsvermögen	begrenzt meist bei ca. 0,1%	in günstigen Fällen niedriger als analog
Anzeige	durch Längenänderung	durch Ziffern
Ablesefehler	oft auftretend	praktisch = 0
Registrierung	anschaulich, durch Kurve	unanschaulich, Zahlenkolonnen
Speicherung	schlecht möglich	gut möglich
Meßwertverarbeitung *einfache Probleme* *schwierige Probleme*	 teilweise einfach lösbar kompliziert	 technisch leicht lösbar leicht lösbar

Tabelle 2.5 *Gegenüberstellung analoger und digitaler Meßgeräte*

2.6.2. Gliederung der Meßmethoden

Die Gliederung der Meßmethoden kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. So ist es manchmal zweckmäßig und für das Verständnis bestimmter Zusammenhänge notwendig, neben der Unterscheidung nach analogen und digitalen Methoden auch zwischen

- direkten und indirekten,
- kontinuierlichen und diskontinuierlichen,
- sowie statischen und dynamischen

Meßmethoden zu unterscheiden. Auch andere Unterscheidungskriterien, wie Automatisierungsgrad, Systemstruktur, Energieform des Signaltägers usw. können in manchen Fällen sinnvoll sein.

Von besonderer Bedeutung ist die Untergliederung der Meßmethoden nach der Art und Weise, wie bei einer Messung der Vergleich zwischen der Meßgröße (oder einer aus ihr gebildeten Abbildungsgröße) und der im Meßmittel enthaltenen Maßverkörperung realisiert wird. Daraus ergibt sich zunächst die im *Bild 2.24* dargestellte Gliederung der Meßmethoden.

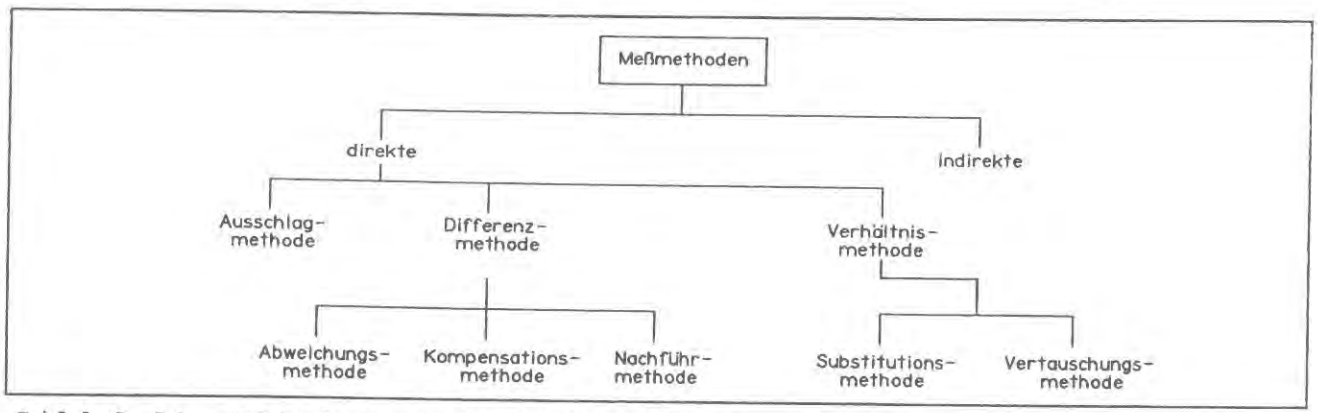


Bild 2.24 *Gliederung der Meßmethoden*

Es ist allerdings eine weiterführende Untergliederung nur auf direkte Meßmethoden sinnvoll anwendbar. Bei indirekten betrifft sie nur die meßtechnische Erfassung der jeweiligen Eingangsgrößen. Der Wert dieser Einteilung besteht darin, daß die Gemeinsamkeiten der einzelnen Methoden dank spezifischer Eigenschaften allgemein gültige Aussagen hinsichtlich Anwendungsmöglichkeiten, Aufwand und erreichbarer Genauigkeit gestatten.

2.6.3 Unterscheidung zwischen direkten und indirekten Meßmethoden

Die Unterscheidung ist vor allem aus *fehlertheoretischen Gründen* von Interesse, denn bei indirekten Methoden wird zur Ermittlung der Meßunsicherheit in der Ergebnisgröße das Fehlerfortpflanzungsgesetz angewendet. Im allgemeinen benutzt man dieses Gesetz auch dann, wenn die Eingangsgrößen X_i keine Mittelwerte aus Meßreihen sind, bei denen die Meßunsicherheit das Resultat einer statistischen Fehlerrechnung ist, sondern die X_i Werte aus einer Einzelmessung sind, deren Unsicherheit aus den Fehlergrenzen des benutzten Meßmittels abgeleitet wurde. Dabei ist wichtig, daß alle Anteile gleiche statistische Sicherheiten (normalerweise 95 %) haben. Bei Benutzung nur einer Eingangsgröße kann man gelegentlich auch von einer indirekten Messung sprechen, wenn bei einer notwendigen Korrektion der Korrektionswert mit einer so großen Unsicherheit behaftet ist, daß sie bei der Ermittlung der Meßunsicherheit der Aufgabengröße nicht mehr vernachlässigt werden darf.

2.6.4 Indirekte Meßmethoden

Bei indirekten Meßmethoden ergibt sich im allgemeinen die Aufgabengröße (auch Ergebnisgröße) als mathematische Verknüpfung aus mehreren unabhängigen Meßgrößen, den Eingangsgrößen. In diesem Sinne kann auch die Mittelwertbildung aus mehreren Meßwerten X_i eine indirekte Messung sein, wenn z. B. der mittlere Baumdurchmesser eines Waldstücks gesucht ist. Wird dagegen die gleiche Größe unter Wiederholbedingungen n-mal gemessen (Wiederholmeßreihe), so spricht man in der Regel nicht von einer indirekten Meßmethode.

Daraus folgt, daß nicht jedes Meßergebnis, das zu seiner Ermittlung einer Rechenoperation bedarf, das Resultat einer indirekten Messung ist. Auch das Anbringen einer Korrektion bei einem Meßwert macht aus einer direkten keine indirekte Meßmethode.

Entscheidendes Kriterium einer indirekten Meßmethode ist, ob für die Werte der Eingangsgrößen, aus denen man die Ergebnisgröße berechnet, *Unsicherheiten* angegeben werden können oder zumindest im Fall normaler Fehlerbetrachtungen angebbar wären. Die Werte einzelner Eingangsgrößen können dabei auch aus früheren Messungen stammen.

2.6.5 Direkte Meßmethoden

Nach *Bild 2.24* unterscheidet man zwischen den nachfolgend beschriebenen drei unterschiedlichen Methoden beim direkten Messen. Manche gerätetechnische Lösungen sind nicht immer eindeutig in eine der Gruppen einzuordnen. Die Untergliederung von *Bild 2.24* soll das Aufzeigen grundsätzlicher Zusammenhänge erleichtern.

2.6.5.1 Ausschlagmethode

Die meisten analogen Meßgeräte geben den Meßwert in Form eines Anzeigemarkenausschlages aus. Charakteristisch für die Ausschlagmethode ist, daß der Wert einer Meßgröße direkt oder über Zwischenabbildungsgrößen in den entsprechenden Ausschlag umgewandelt wird.

Für die eigentliche Meßwertbildung ist keine Zufuhr von Hilfsenergie erforderlich. Das Fehlen fremder Energiequellen weist darauf hin, daß die für den Meßvorgang benötigte Energie dem Meßobjekt entzogen wird. Es ist also das Auftreten einer mehr oder minder großen Rückwirkung unvermeidlich.

Bei der Ausschlagmethode, die auch als Direkt- oder Absolutmethode bezeichnet wird, ist bei kompliziert gelagerten Meßproblemen, abgesehen von Trivialfällen, wie Längenmessung mit Maßstab gemäß *Bild 2.5*, der eigentliche Vergleichsvorgang oft schwer zu erkennen.

Meistens wird bei der Bildung des primären Abbildungssignals durch Energieaustausch zwischen Meßobjekt und Meßgerät im Gerät eine Kraft, *die Meßkraft*, hervorgerufen. Der Meßkraft wirkt eine veränderliche Gegenkraft entgegen, die durch ein geeignetes Bauglied, z. B. oft ein elastisches Element, erzeugt wird. Dieses Bauelement zur Erzeugung einer meßkraftabhängigen Gegenkraft übernimmt die Rolle der internen Maßverkörperung. Bei Gleichheit von Meß- und Gegenkraft (Gleichgewichtslage) ist der Einstellvorgang beendet, und man kann den Meßwert ablesen. Der Vergleich muß nicht immer zwischen zwei Kräften erfolgen, sondern es kann sich auch um Drücke, Momente usw. handeln.

2.6.5.2 Differenzmethode

Bei den Differenzmethoden werden die zum Vergleich benutzten Abbildungsgrößen (seltener die Meßgrößen selbst) nicht mit einer geräteinternen Maßverkörperung, sondern mit einer einstellbaren Vergleichsgröße gleicher Größenart verglichen.

Dabei unterscheidet man zwischen

- Abweichungsmethode,
- Kompensationsmethode und
- Nachführmethode.

2.6.5.2.1 Abweichungsmethode

Dabei wird die Vergleichsgröße vor der Messung fest eingestellt, und man erhält als Ausgangsgröße die Abweichung zwischen Meßgröße und der eingestellten Vergleichsgröße mit bekanntem Wert.

Im Unterschied zur Ausschlagmethode benutzt man bei der Abweichungsmethode eine konstante Gegenkraft. Der Meßgröße, der primären Abbildungsgröße oder einer Zwischenabbildungsgröße wird eine im Gerät erzeugte oder von außen eingegebene *konstante Vergleichsgröße* gegenübergestellt, für deren Erzeugung und Konstanthaltung im allgemeinen Hilfsenergie erforderlich ist.

In einem geeigneten Bauglied (Komperator) wird die Meß- bzw. Abbildungsgröße mit der Vergleichsgröße verglichen und das resultierende Differenzsignal zur Ausgangsgröße weiterverarbeitet. Das Ausgangssignal ist also die Abbildung der Abweichung des Wertes der Meßgröße vom Wert einer vorgegebenen konstanten Größe. Wird der Sollwert der Meßgröße als Vergleichsgröße benutzt, dann ist das Ausgangssignal eine Abweichungsanzeige. Unkontrollierte bzw. unerkannte Änderungen der Vergleichsgröße gegenüber ihrem vorgesehenem Wert gehen voll als Fehler in die Messung ein.

Die Abweichungsmethode ist wegen der Maßnahmen zur Erzeugung und Konstanthaltung der Vergleichsgröße meist aufwendiger als die Ausschlagmethode.

2.6.5.2.2 Kompensationsmethode

Zum Vergleich werden nur energietragende Größen wie Drücke, Drehmomente, Spannungen, Ströme usw. benutzt. Sorgt man mit Hilfe einer Regelung dafür, daß die Differenz zwischen Abbildungs- und Vergleichsgröße immer wieder zu Null gemacht wird (die Abbildungsgröße also durch die Vergleichsgröße kompensiert wird), so spricht man von Kompensationsmethoden.

Von *Kompensation* spricht man allgemein, wenn der Wert einer physikalischen Größe dadurch bestimmt wird, daß man ihr eine gleichgroße Größe gleicher Größenart so entgegenschaltet, daß sich die Wirkung dieser beiden Größen aufheben. Daraus resultiert, daß Kompensation nur bei energietragenden Größen möglich ist. Zuerst bewußt angewandt wurde die Kompensationsmethode zur Messung elektrischer Spannungen.

Mit Temperaturkompensation ist die automatische Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf Messungen gemeint. Da es sich hier nicht um eine Kompensation im diskutierten Sinne handelt, sollte dafür die Bezeichnung (automatische) *Temperaturkorrektur* verwendet werden. Dies gilt auch für ähnliche, auf andere Einflußgrößen bezugnehmende Wortbildungen.

Die ursprünglich aus der Elektrotechnik stammende Kompensationsmethode ist jetzt in der gesamten Meßtechnik verbreitet. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, daß der Abgleich auch automatisch vorgenommen werden kann. Dazu wird das Differenzsignal, das entsteht, solange Meßgröße und Kompensationsgröße noch nicht gleich sind, verstärkt und zur Steuerung eines Motors benutzt. Dieser verstellt ein Funktionselement, durch das der Wert der Kompensationsgröße verändert wird.

2.6.5.2.3 Nachführmethode

Werden Strecken oder Winkel verglichen und dabei die jeweiligen Vergleichsgrößen durch einen Folgeregelkreis den Abbildungsgrößen nachgeführt, so handelt es sich um Nachführmethoden.

Der Grundgedanke der Nachführmethode, die auch Nachlauf-, Nachstellmethode oder (weniger korrekt) Nachlaufsteuerung genannt wird, besteht darin, eine Weg- oder Winkeländerung durch einen Indikator möglichst berührungslos abzutasten. Bei einer festgestellten Abweichung zwischen der gesuchten Größe und der Lage der Abtasteinrichtung soll ein Stellsignal erzeugt werden, durch das die Abtasteinrichtung der sich ändernden Größe nachgeführt wird (Regelkreis einer Lageregelung).

Als Ausgangssignal kann man die jeweilige Stellung der Abtasteinrichtung benutzen. Es kann aber auch durch den Mechanismus, der die Abtasteinrichtung bewegt, ein Stellungsgeber betätigt werden, der ein Ausgangssignal gewünschter Form erzeugt.

2.6.5.3 Verhältnismethode

Bei Verhältnismethoden werden Meßgröße und Vergleichsgröße durch zwei oder mehrere aufeinanderfolgende Messungen in der gleichen Meßanordnung zueinander ins Vehältnis gebracht. Unter bestimmten Bedingungen kann auch das Verhältnis 1 (Gleichheit beider Größen) erreicht werden, wenn die Vergleichsgröße definiert veränderbar ist. Im wesentlichen kann man hier zwischen Substitutionsmethode und Vertauschungsmethode unterscheiden.

2.6.5.3.1 Substitutionsmethode

Hierbei wird die Meßgröße bzw. das Meßobjekt nach einer ersten Messung gegen eine Größe oder ein Objekt mit bekanntem Wert (Maßverkörperung) ausgetauscht (substituiert) und die Messung wiederholt. Der gesuchte Wert wird aus den Meßwerten beider Messungen errechnet.

2.6.5.3.2 Vertauschungsmethode

Sie ist anwendbar, wenn die Messung auf einem direkten Vergleich zwischen Meßgröße (Meßobjekt) und Maßverkörperung beruht. Bei einer zweiten Messung werden Meßobjekt und Maßverkörperung vertauscht. Der Wert der Meßgröße wird aus beiden Meßwerten ermittelt.

2.6.6 Meßverfahren

2.6.6.1 Messung geometrischer Größen

Die Messung geometrischer Größen ist heute von großer Bedeutung in der Industrie. Dabei werden diese Messungen im allgemeinen auf *Längen- und Winkelmessungen* zurückgeführt, welche die überwiegende Mehrzahl technischer Meßaufgaben ausmachen.

Die Messung von Längen kann entweder durch Abtasten berührend oder berührungslos erfolgen. Ein einfaches Beispiel für ein berührendes Meßgerät ist der **Meßschieber** (*Bild 2.25*, früher auch Schublehre oder Schieblehre). Der Meßschieber weist die wichtigsten Elemente der berührenden Messung auf, wie einen festen Meßschenkel (Auflage) und einen beweglichen Meßschenkel (Taster).

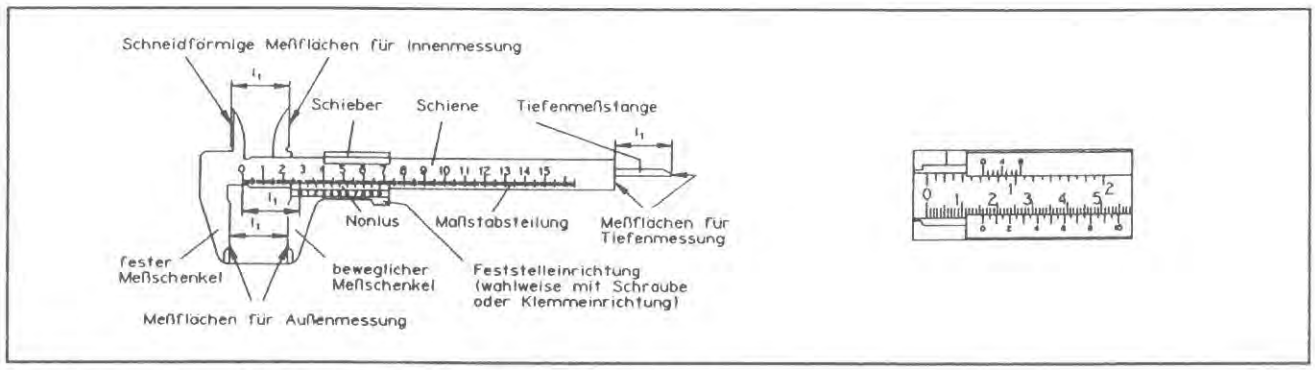


Bild 2.25 *Meßschieber; rechts: Nonius*

Während beim Meßschieber die Ablesemöglichkeit durch einen Nonius verbessert wird, wodurch noch zehntel Skalenteile bzw. 0,1 mm ablesbar sind, haben **Meßschrauben** (z. B. Bügelmeßschrauben) eine Grob- und eine Feinskala. Dadurch können noch Längenänderungen von 0,01 mm erfaßt werden (*Bild 2.26*).

Dies gilt ebenso für *Meßuhren*. Bei der Anwendung der Meßuhr muß allerdings jeweils eine Auflage geschaffen und der Meßbolzen (Taster) durch Einspannen der Uhr gegenüber der Auflage fixiert werden. Die Empfindlichkeit wird durch Zahnstange, Ritzel und Zahnradübersetzung erreicht.

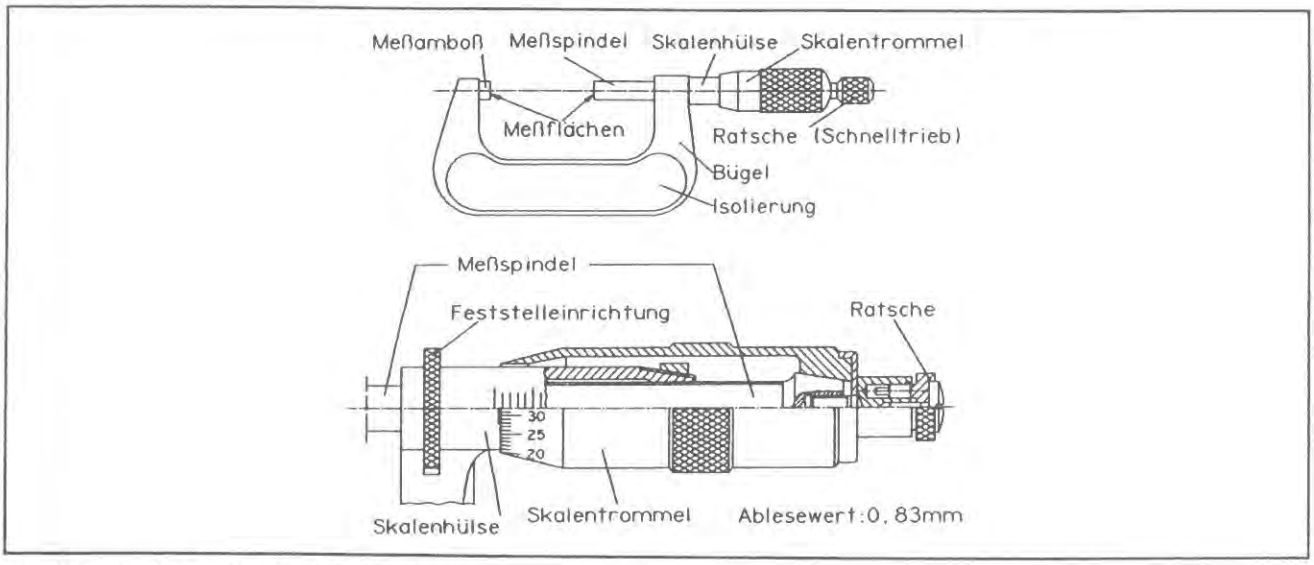


Bild 2.26 *Meßschrauben*

Feinzeiger haben im Gegensatz zu Meßuhren Skalen kleiner als 360 Grad. Es werden auch andere Übertragungsmechanismen wie z. B. Torsionsbänder oder Hebel angewendet, um die gewünschte hohe Übersetzung bzw. Meßauflösungen von 1 µm und mehr zu erreichen. Feinzeiger gibt es in vielen Ausführungen, auch mit optischen und elektrischen Systemen kombiniert *[siehe 3.1.3 Meßwertanzeige]*.

In steigendem Umfang werden auch Meßschieber, Meßschrauben, Meßuhren usw. mit *digitaler Anzeige* angeboten. Mit Hilfe eines optischen Strichmaßstabes aus Glas (Gitterkonstante, d. h. Strichmittenabstand im allgemeinen 10 µm) und optoelektronischer Abtastung (wie beim Kodelineal) wird der vom beweglichen Tastelement zurückgelegte Weg in eine Impulszahl umgewandelt, gezählt und digital angezeigt. Mit einem Mikrorechner kann interpoliert werden, sodaß Meßtaster mit Auflösungen von 1 µm und besser hergestellt werden können.

Für die Messung von Längen (besonders Dicken) an bewegten Meßobjekten können Taster, die mit Rollen versehen sind, nur bei geringen Geschwindigkeiten eingesetzt werden. Ansonsten muß berührungslos gemessen werden.

2.6.6.2 Messung mechanischer Größen

Die Messung mechanischer Größen (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Winkelgeschwindigkeit usw.) läßt sich, sofern nur Mittelwerte benötigt werden, auf die Messung eines Weges und der Zeit

zurückführen. Außerdem können translatorische Bewegungen über ein abrollendes Rad auf rotatorische Bewegung (Drehzahl!) abgebildet werden, für die es geeignete Meßgeräte (Tachometer) gibt (z. B. Geschwindigkeitsmessung im Kraftfahrzeug).

Bei der Messung von **Kräften** werden die notwendigen Gegenkräfte im allgemeinen von elastischen Bauelementen (Federn, Verformungskörper usw.) oder durch die Schwerkraft in Form einer Gegengewichtskraft erzeugt. Elektrische Kraftmeßfühler nutzen entweder ebenfalls elastische Bauglieder aus, die mit elektrischen Wegmeßfühlern verbunden werden, oder sie beruhen auf der Abhängigkeit bestimmter Stoffkonstanten von der mechanischen Beanspruchung.

Wesentlich häufiger als Kräfte müssen in der Praxis Drücke erfaßt werden. Obwohl Kraft- und Druckmessung, vom Prinzip her gesehen, kaum zu trennen sind, wird die **Druckmessung** als eigenes Gebiet betrachtet. Dabei werden für die einzelnen Meßbereiche entsprechend dem zu erfassenden Druck unterschiedliche Meßprinzipien angewendet.

Ein bedeutendes Gebiet der mechanischen Meßtechnik ist die Messung von Schwingungen (*Schwingungsmeßtechnik*). Hierzu gehören die Messung von Vibrationen, die Erdbebenforschung, die Erkundung in der Geologie, die Messung von Schwingungen im Rahmen der Prüftechnik und andere Gebiete. Allein die geologische Erkundung stellt heute eine Meßtechnik mit großem volkswirtschaftlichem Nutzen dar.
Zur **Schwingungsmessung** können sowohl Bewegungs- als auch Kraftmeßfühler eingesetzt werden. Dabei werden rein mechanische Systeme, wie Feder-Masse-System als Absolutbewegungsmeßfühler (die "seismische Masse"), zunehmend von elektrischen Meßfühlern abgelöst.

2.6.6.3 Messungen in der Akustik

Von Schwingungen ausgehend ergibt sich unmittelbar ein Zusammenhang mit Schall und Ultraschall.

Die Meßgrößen der Akustik, die im Zusammenhang mit dem Umweltschutz in der Lärmmessung an Bedeutung gewonnen haben, sind zwar im Prinzip auch mechanische Größen, ihre Messung ist aber - ähnlich wie in der Lichttechnik - nur durch Einbeziehen der Eigenschaften des menschlichen Gehörs möglich.

Als **Schall** bezeichnet man Schwingungen im Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 20 kHz. Bei höheren Frequenzen spricht man von Ultraschall. Objektiv meßbare, den Schall charakterisierende Meßgrößen sind Schallgeschwindigkeit, -schnelle, -druck, -leistung, -intensität (Schallstärke) u. a. Dagegen gehen in die "Größen" Lautstärke, Lautheit usw. subjektive Maßstäbe ein.

Das menschliche Ohr ist nicht für alle Frequenzen des Hörbereichs gleich empfindlich. Eine rein physikalische Messung des Schalldrucks oder Schalldruckpegels würde deshalb der Wirkung des Schalls auf das Ohr nicht gerecht und lieferte eine Meßgröße, die dem Lautstärkeeindruck nicht entspräche. Man hat sich deshalb international auf mehrere *Frequenzbewertungskurven* (A, B, C, D) geeinigt, die bei der Messung durch Filterung berücksichtigt werden. Am häufigsten wird nach Kurve A bewertet. Um außerdem die unterschiedliche Wirkung von gleichbleibendem, schwankendem und impulsartigem Schall zu erfassen, wurden die drei *Zeitbewertungen* langsam (slow: S), schnell (fast: F) und Impuls (I) standardisiert.

Die einfachsten akustischen Meßgeräte sind *Schallpegelmesser*. Sie enthalten ein Mikrofon als Schallaufnehmer, umschaltbare Filter zur Realisierung der Kurven A bis D sowie linear (ohne Bewertung), eine umschaltbare Zeitbewertung (S, F, I) und ein analoges oder digitales Anzeigegerät. Der prinzipielle Aufbau einer Meßkette zur Bestimmung akustischer Meßgrößen ist in *Bild 2.27* dargestellt.

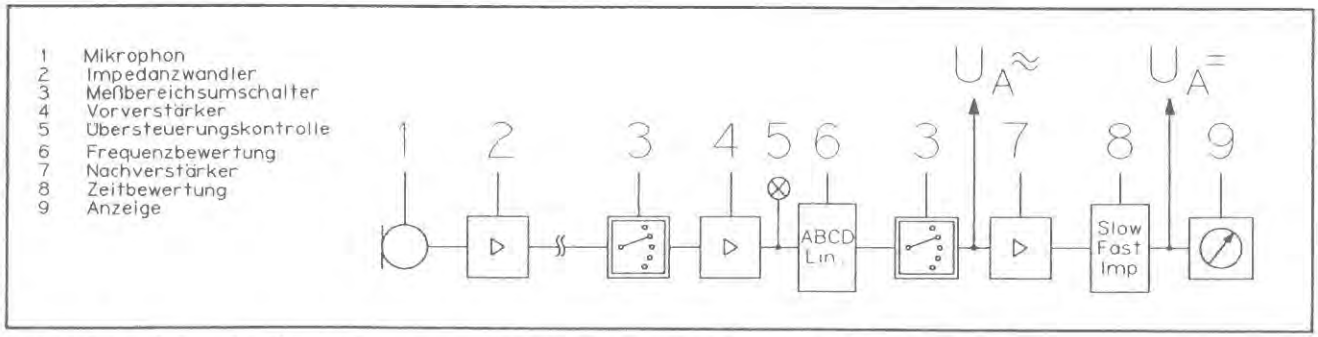


Bild 2.27 *Meßkette zur Bestimmung akustischer Größen*

Als *Mikrofone* werden in Präzisionsgeräten ausschließlich Kondensatormikrofone verwendet. Bei billigeren Geräten werden piezokeramische oder Elektretmikrofone vorgesehen.

Umfangreiche akustische Messungen erfordern teilweise großen gerätemäßigen Aufwand. Sollen beispielsweise die wesentlichen Schwingungen in Maschinengeräuschen bestimmt werden, so muß das gesamte Spektrum mit verschiedenen Filtern durchgemessen werden, wobei hohe Anforderungen an diese Filter gestellt werden müssen. Weiters müssen Pegel integriert werden (z.B. um den für den Lärmschutz wichtigen äquivalenten Dauerschallpegel zu ermitteln).

Schon die relativ einfache Messung des Schalldrucks setzt erheblichen Aufwand und auch große meßtechnische Erfahrung voraus, damit genaue, repräsentative und aussagekräftige Meßergebnisse gewonnen werden. Messungen von Schalleistungspegel, Schallintensität, Nachhallzeit usw. sind noch weitaus komplizierter.

2.6.6.4 Mengenmessung

Wenn die Menge auch nicht als physikalische Größe definiert ist, so sind doch häufig Mengen von Objekten oder Substanzen quantitativ zu bestimmen. Dabei werden andere Größen als Maß für Mengen verwendet, und zwar Volumina, Massen oder Anzahlen gleichartiger Teilchen. Die Verfahren zur quantitativen Bestimmung von Mengen sind damit *Volumen- und Massemessungen*. Die Menge fester Stoffe wird fast ausschließlich durch Wägung sowie Zählung bestimmt, wobei sich auch Flüssigkeiten und Schüttgüter in Behältern auswiegen lassen. Die Geräte zur Mengenmessung unterliegen der gesetzlichen *Eichpflicht*. *Konzentrationsmessung* erfolgt, wenn die gleichartigen Teilchen Atome oder Moleküle (Stoffmengen) sind.

Meßtechnisch besteht noch ein Unterschied darin, ob sich das Meßobjekt in Ruhe befindet oder ob es sich um bewegte Meßobjekte bzw. strömendes Meßgut handelt. Schließlich hat es sich aus anwendungstechnischer Sicht als zweckmäßig erwiesen, die Füllstandsmessung, die je nach benutztem Meßverfahren als Volumen- oder Massebestimmung anzusehen ist, als Sondergebiet zu betrachten.

Bei der *Füllstandsmessung* gibt es eine große Anzahl von Meßprinzipien und -verfahren. Für die Einsetzbarkeit einzelner Verfahren ist wesentlich, was im konkreten Fall die Aufgabengröße ist: die Füllhöhe, das Volumen oder die Masse der Meßsubstanz. Um den Füllungsgrad von Behältern zu kontrollieren und so das

Überlaufen zu verhindern, muß die Füllhöhe bekannt sein. Volumen oder Masse des Füllgutes (oder auch beides) wird benötigt, um etwa echte Mengenangaben für Bilanzzwecke machen zu können. In Abhängigkeit von Aufgabengröße und Meßprinzip beeinflußt die Dichte der Meßsubstanz das Meßergebnis bzw. wird sie für Umrechnungen im Falle indirekter Messungen gebraucht.

2.6.6.5 Messung thermischer Größen

Die **Temperatur** ist die wichtigste Meßgröße der Thermodynamik. Die Bestimmung aller anderen thermischen Größen (thermische Energie, Entropie, Wärmemenge usw.) läßt sich weitgehend auf Temperaturmessungen zurückführen bzw. besteht in der Messung von Temperaturen.
So wird die *Temperaturmessung* z.B. bei der Bestimmung der Leistungsverluste durch Messung der Lagerölerwärmung ebenso benötigt wie bei reinen Überwachungsfunktionen, z. B Abgastemperatur einer Gasturbine oder der Kühlwassertemperatur im Auto.
Die technischen Temperaturfühler kann man unterscheiden in Berührungsthermometer und berührungslose Thermometer (Wärmeübertragung durch Strahlung) oder nach dem Meßeffekt in mechanische und elektrische Thermometer sowie Sondermeßverfahren.

Die vielfältigen physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die zur Temperaturmessung ausnutzbar sind (*Meßeffekte*), werden in *Tabelle 2.5* wiedergegeben.

Besonders die *thermische Ausdehnung* von festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen wird zur Anzeige herangezogen.
Auf dieser Gesetzmäßigkeit basieren die Ausdehnungsthermometer. Auch die Längenausdehnung wird mit Erfolg für die Temperaturmessung ausgenutzt.

Das Volumen V_T (z.B. einer Flüssigkeit) hat bei der Temperatur T gegenüber dem Volumen V_o bei einer Vergleichstemperatur T_o den Wert:

$$V_T = V_o \cdot (1 + v \cdot \Delta T) \qquad (2.6.1)$$

mit v ... Volumen-Temperaturkoeffizient in 1/K

$$\Delta T = T - T_o \quad \text{(Temperaturdifferenz)} \qquad (2.6.2)$$

MESSPRINZIP (genutzter physikalischer Effekt)	**Beispiele von Meßgeräten, wo dieser Effekt genutzt wird**
1. Thermische Ausdehnung von	
- Festkörpern	Stabausdehnungsthermometer
- Flüssigkeiten	Flüssigkeitsglasthermometer
- Gasen	Gasthermometer
2. Druckerhöhung bei konstantem Volumen in	
- Flüssigkeiten	Flüssigkeitsfederthermometer
- Gasen	Dampfdruckfederthermometer
3. Änderung der elektrischen Leifähigkeit von	
- Metallen	Widerstandsthermometer
- Halbleiter-Keramik	Heißleiter (Thermistor, NTC-Widerstand)
- Keramik	Kaltleiter (PTC-Widerstand)
4. Thermoelektrischer Effekt	Thermoelement
5. Strahlungsemission des erhitzten Objektes	pyroelektrische Sensoren Pyrometer
6. Chemische Reaktionen	Temperaturmeßfarben
7. Änderung des Aggregatzustandes	Segerkegel (auch Temperaturfixpunkte)
8. Optische Empfänger für hohe Temperaturen	Si-Fotodiode
9. Änderung der Temperaturmeßfarben	Flüssigkristalle

Tabelle 2.6 *Temperaturmessung*

Was die für thermische Größen einsetzbaren Meßmethoden anbelangt, so ist festzustellen, daß auch bei ihnen die Ausschlagmethode oft ohne besondere Schwierigkeiten angewendet werden kann. Nur bei Kleinstmengen und geringen Temperaturdifferenzen kann die Rückwirkung infolge energetischer Wechselwirkung zwischen Meßgerät und Meßobjekt als Fehlerquelle in Erscheinung treten.

2.6.6.6 Elektrische Meßtechnik

Da der Mensch abgesehen vom Schmerzempfinden kein Sinnesorgan für die Elektrizität hat, sind elektrische Größen unanschaulich.
Die wichtigsten elektrischen Größen sind in *Tabelle 2.6* angeführt. Dazu kommen noch die magnetischen Größen, die durch bekannte Wechselwirkungen mit wichtigen elektrischen Größen verknüpft sind. Hier sei noch bemerkt, daß die Stromstärke die vierte Basiseinheit im Internationalen Einheitensystem ist.

Größe	**Formelzeichen**	**Einheit**	
Spannung	U	Volt	V
Stromstärke	I	Ampere	A
Widerstand	R	Ohm	Ω
Induktivität	L	Henry	H
Kapazität	C	Farad	F
Ladung	Q	Coulomb	C
Leistung	P	Watt	W
Arbeit	W	Joule	J
Magnetische Feldstärke	H	Ampere/Meter	A/m
Magnetische Induktion	B	Tesla	T
Magnetischer Fluß	Φ	Weber	Wb
Frequenz	f	Hertz	Hz
Phasenverschiebung	(in Grad)		

Tabelle 2.7 *Wichtige elektrische Größen*

Um die elektrischen Größen quantitativ erfassen zu können, benutzen mechanische Meßgeräte zur Umwandlung der elektrischen Größen in ein ablesbares Signal die Wirkung des elektrischen Stromes I oder der elektrischen Spannung U. Die Kraftwirkung elektrischer Ströme bzw. elektrischer und magnetischer Felder ist zur Messung die wichtigste Wirkung der Elektrizität. Thermische und optische Wirkungen werden seltener, chemische kaum noch für Meßzwecke genutzt.

Meßtechnisch bedeutsam ist der große Änderungsbereich vieler elektrischer Größen. So umfaßt z. B. der Stromstärkebereich, der meßtechnisch erfaßt werden muß, 20 Zehnerpotenzen. Hinzu kommt, daß die Änderungsgeschwindigkeit elektrischer Vorgänge außerordentlich hoch sein kann. Daraus resultieren extreme Anforderungen an das Zeitverhalten vieler Meßgeräte, womit für manche Zwecke mechanisch bewegte Bauteile von vornherein ausscheiden. Aus dieser Sicht gibt es auch signifikante Unterschiede zwischen der Messung statischer

Größen (z. B. im Gleichspannungsfeld) und der Messung bewegter Ladungen (Strommessungen) sowie periodisch veränderliche Größen (Wechselgrößen).

Es können nur wenige elektrische Größen unmittelbar gemessen werden. Dies sind vorzugsweise *Spannung, Stromstärke* und *Ladung*. Meist ist die Meßgröße von der Aufgabengröße verschieden. Zur Umwandlung der Aufgabengröße in eine geeignete Meßgröße dienen entweder bestimmte Bauelemente, wie Gleichrichter (Umwandlung: Wechselstrom in Gleichstrom) und Arbeitswiderstände (Umwandlung: Strom in Spannung) oder Schaltungen (Umwandlung: Widerstand in Strom).

Die Vielseitigkeit *elektrischer Meßverfahren* ist außerordentlich groß. Dies bezieht sich nicht nur auf die wichtigsten statischen und dynamischen Kenngrößen, wie Meßbereich, Empfindlichkeit, Fehlergrenzen, Zeitkonstante usw., sondern vor allem auch auf die Variabilität und Anpassungsfähigkeit der Verfahren und die gute Verarbeitbarkeit der elektrischen Signale. Die Erfüllung hochgesteckter Forderungen ist jedoch mit einem schnell zunehmenden technischen Aufwand verbunden, der sich auch im Preis der Geräte ausdrückt. Die moderne Entwicklung der Elektronik (integrierte Schaltungen) läßt diese Problematik inzwischen in etwas günstigerem Licht erscheinen.

Schließlich sind elektrische Meßgeräte häufig Bestandteil anderer Meßeinrichtungen. Nicht nur für die Meßwertausgabe bei der elektrischen Messung nichtelektrischer Größen, sondern aber auch zur Kontrolle bestimmter Einflußparameter (z. B. Hilfsenergieversorgung, Temperatur usw.) werden elektrische Meßverfahren in großem Umfang eingesetzt.

Viele elektrische Meßgeräte geben den Meßwert als Zeigerausschlag an. Es kommt zum Zusammenwirken mechanischer und elektrischer Systemelemente in vielfältigen Formen. Die elektromechanischen Systeme stellen dementspreched eine für die Meßtechnik wichtige wissenschaftliche Arbeitsrichtung dar.

Da die für die Messung elektrischer Größen ausgenutzten Wirkungen der Elektrizität für **Gleich- und Wechselgrößen** unterschiedlich sein können, ergeben sich (trotz gleichen Namens und gleicher Einheiten) auch Unterschiede in den Prinzipien und Verfahren der Meßwertbildung. Während ein *Gleichstrom* durch eine Angabe quantitativ beschreibbar ist, sind für die exakte Quantifizierung eines *Wechselstromes* außer der Amplitude auch noch Kurvenform (tatsächlicher Zeitverlauf), Frequenz und Phasenlage notwendig.

Falls es für eine bestimmte Aufgabengröße kein geeignetes Verfahren gibt, wird für die Messung elektrischer Größen häufig eine andere elektrische Größe als Meßgröße benutzt. Dafür ist etwa die Spannungsmessung mit dem **Drehspulmeßgerät** *[siehe 3.1.4.1]* ein Beispiel, denn dabei wird die Spannung über den durch das Meßgerät fließenden Strom gemessen.

Ein weiteres typisches Beispiel für die Verwendung von Meßgrößen anderer Größenart ist die Bestimmung *ohmscher Widerstände* als Aufgabengröße nach dem Ohmschen Gesetz aus Strom und Spannung, was durch entsprechende Meßschaltungen ermöglicht wird.

Allgemein gibt es eine sehr *große Anzahl möglicher Meßschaltungen*, vor allem wenn weitere Meßgrößen, wie Leistung, Phasenwinkel, Frequenz usw. ermittelt werden sollen. Dabei sind vor allem Brücken- und Kompensationsschaltungen als die beiden wichtigsten Prinzipschaltungen von universellem Charakter hervorzuheben.

Das **Spannungsmeßgerät** (Digitalvoltmeter, DVM *[siehe 3.4.6.2]*) ist das wichtigste anzeigende digitale Meßgerät. Das ist verständlich, denn das primär verlangte Eingangssignal bei allen Analog-Digital-Umsetzern ist eine Spannung, und andere Meßgrößen müssen jeweils erst in eine geeignete Spannung umgeformt werden. Insofern sind eigentlich die meisten Analog-Digital-Umsetzer bereits von vornherein Spannungsmeßgeräte. Von Analog-Digital-Umsetzern unterscheiden sich die als Digitalvoltmeter (korrekt: Digitalspannungsmeßgeräte) bezeichneten Geräte eigentlich nur dadurch, daß ihre Anzeige die am Eingang anliegende Spannung mit Zahlenwert, Einheit und gegebenfalls auch Polarität angibt.

Mit fortschreitender Mikrominiaturisierung und Weiterentwicklung der Technik der integrierten Schaltungen, auch für Analog-Digital-Umsetzer, finden **Digitalmultimeter** eine immer weitere Verbreitung. Das Kernstück der Geräte ist dabei ein Analog-Digital-Umsetzer mit 3 1/2 bis 5 1/2-stelliger Digitalanzeige und die entsprechenden Schaltungen zur Realisierung mehrerer Meßbereiche für Gleichspannung und -strom, Wechselspannung und -strom und außerdem meist auch für Widerstände. Dies ist problemlos möglich, da die Geräte für ihren Betrieb mit Spannungsversorgung bzw. Batterie ausgerüstet sein müssen. Bei manchen Geräten läßt sich auch eine Frequenzmessung realisieren.

Häufig ist bei Digitalmultimetern auch ein Anschluß für einen mitgelieferten *elektrischen Temperaturfühler [siehe 4.5]* (Thermoelement, Thermistor) vorgesehen. Dieser ist so angepaßt, daß eine Anzeige dirket in Grad C möglich ist, was nur geringen zusätzlichen Aufwand erfordert. Auf der Grundlage gleicher Schaltungen werden aber auch *digitale Meßmittel* für andere nichtelektrische Größen realisiert, etwa beispielsweise *für Kräfte über Dehnmeßbrücken oder für Drücke [siehe 4.4].*

Weiters sind hier noch die vielfältigen Möglichkeiten zu nennen, mechanische und thermische Größen unter Zuhilfenahme von elektrischer Hilfsenergie zu messen. Eine Unterscheidung erfolgt hier nach zwei Hauptgruppen. Einerseits spricht man von passiven oder *rezeptiven Meßfühlern [siehe 4.2.4.1]*, wenn Energie der nichtelektrischen Meßgröße direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Beispiele hierfür sind etwa das Thermoelement oder die piezoelektrische Kraftmessung. Andererseits wird bei aktiven oder *bearbeitenden Meßfühlern [siehe 4.2.4.2]* eine elektrische Hilfsenergie zugeführt, die durch die Meßgröße in definierter und reproduzierbarer Weise beeinflußt wird. Hier sind etwa Widerstandsthermometer und Dehnmeßstreifen als Beispiele zu nennen.

Abschließend sei bezüglich Fehlerbetrachtungen bei elektrischen Messungen vor allem auf einige besonders kritische Fehlerquellen, die nur schwer erkennbar sind, hingewiesen, wie etwa:

- induktive und kapazitive Beeinflussungen von Meßgrößen,
- Überlagerung von Meßgröße oder Zwischensignalen durch Störspannungen,
- Beeinflussung des Systems, an dem gemessen wird, durch das Meßgerät und den Messenden.

Weiters spielt die *Temperaturabhängigkeit* bestimmter Bauelementeparameter eine wichtige Rolle, weil der Temperatureinfluß nicht einfach über eine Messung der Umgebungstemperatur korrigierbar ist. Hierfür müssen die Temperaturfelder in elektronischen Meßsystemen, die sich mit der umgesetzten elektrischen Leistung ändern, bekannt sein. So kann es unter ungünstigen Umständen bei komplizierteren elektronischen Geräten Stunden dauern, ehe thermisches Gleichgewicht im Gerät erreicht ist und reproduzierbare Meßwerte erhalten werden.

Ferner sei auf die *Schutzmaßnahmen* verwiesen, die im Bereich der elektrischen Meßtechnik zu beachten sind. Dazu gehören einerseits die Arbeitsschutzmaßnahmen, die den Messenden vor gesundheitlichen Schäden bewahren sollen, und andererseits die Schutzmaßnahmen für Geräte und Anlagen. Weiters müssen die Geräte ganz allgemein vor großen mechanischen Beanspruchungen (Schlag, Stoß, Fall) und elektrischen Überbelastungen bezüglich Spannung bzw. Strom geschützt werden.

2.6.6.7 Optische Messungen

Licht als Signalträger hat unter anderem den Vorteil der Störfestigkeit gegenüber elektromagnetischen Feldern und prinzipbedingten Explosionsschutz. Diese Vorteile werden unter speziellen Bedingungen auch bereits für Automatisierungssysteme genutzt, bei denen dann die meßtechnische Informationsgewinnung ebenfalls auf optischem Wege erfolgen muß. Es gibt schon eine Vielzahl von Sensoren und Sensoranordnungen, mit deren Hilfe nichtoptische Meßgrößen auf den Signalträger Licht abgebildet werden können.

Von speziellen Lösungen abgesehen, lassen sich zwei große Gruppen unterscheiden: Anordnungen, denen das Prinzip der Lichtschranke (mit Absorption oder Reflexion) zugrunde liegt, und Sensoren, in denen physikalische Effekte der Lichtbeeinflussung ausgenutzt werden.
Diese Effekte werden zum Teil direkt in der Lichtleitfaser realisiert, weshalb sie oft (auch wenn das eigentliche Sensorelement nicht faserförmig ist) als Fasersensoren bezeichnet werden.

Die Eigenschaften einer optischen Strahlung können etwas über die stoffliche Zusammensetzung (*Emissionsspektralanalyse*) oder über die Temperatur (*Pyrometrie*) eines strahlenden Gegenstandes aussagen. Diese Verfahren werden als passive Verfahren bezeichnet, weil dabei die Energie aus dem Meßobjekt (Meßgut) stammt. Bei den aktiven Verfahren tritt dagegen eine konstante Lichtstrahlung mit dem Meßgut in Wechselwirkung. Die Meßgrößen steuern dann aktiv den Strahlungsfluß. Dadurch werden Informationen über bestimmte Eigenschaften (Meßgrößen) des Meßobjektes vermittelt.

Licht läßt sich zunächst in Form des Lichtstrahles auf verschiedene Weise für meßtechnische Zwecke benutzen. Der Lichtstrahl kann gewissermaßen die Rolle eines "*Tasters*" übernehmen, oder er wird für die Erzeugung optischer Abbildungen ausgenutzt (siehe Theodolit). Das Gebiet der geometrischen Optik ist ebenfalls für die Meßtechnik von großer Bedeutung, wobei etwa auf Meßmikroskope hingewiesen sei.

Die andere Möglichkeit zur meßtechnischen Ausnutzung von Wechselwirkungen zwischen Lichtstrahlung und Meßobjekt besteht darin, Veränderungen von Strahlungseigenschaften infolge dieser Wechselwirkungen als Meßsignal zu verwenden.

2.6.6.8 Pneumatische Messungen

Die Pneumatik wird vor allem in zwei Gebieten der Meßtechnik eingesetzt: bei der Messung geometrischer Größen und zur hydrostatischen Druckmessung.

Bei der *pneumatischen Längenmessung*, die man mit dem System Düse-Prallplatte realisiert, wird die zu messende Größe auf die

Spaltweite abgebildet. Die durch die feststehende Düse strömende und sich ändernde Meßgröße verschiebt die Prallplatte in Richtung der Düsenachse. Düsendurchmesser und Spaltweite müssen so dimensioniert werden, daß der ringförmige Spalt, der durch die Stirnfläche der Düse und die Prallplatte gebildet wird, die engste Stelle des aus Düse und Spalt bestehenden Strömungskanals darstellt. Dann hängt der Volumenstrom der durch die Düse ausströmenden Luft maßgeblich von der Spaltweite ab.
Um einen spaltweitenabhängigen Druck als Ausgangssignal zu erhalten, benötigt man dann eine Anordnung, durch die der Volumenstrom auf einen Druck abgebildet wird. Diese Aufgabe löst in konstruktiv sehr einfacher Weise eine Druckkaskade, die durch zwei Düsen gebildet wird.

Das Prinzip der Druckkaskade wird auch benutzt, um den hydrostatischen Druck im Inneren eines Flüssigkeitsvolumens zu bestimmen. Die Anwendung kann sowohl zur Füllstands- als auch zur Dichtemessung dienen, wobei jeweils die nicht gemessene Größe konstant bleiben muß.

2.6.6.9 Messung von Stoffeigenschaften

Die kontinuierliche quantitative Bestimmung der Zusammensetzung von Stoffen aus mehreren Komponenten ist in der modernen chemischen Produktion eine wichtige Aufgabe. So ist die Messung von Stoffzusammensetzungen ein wichtiger Zweig der Meßtechnik. Sie wird auch *Konzentrationsmeßtechnik* oder weniger treffend Analysenmeßtechnik bezeichnet.

Da Stoffzusammensetzung eine mengenmäßige erfaßbare Eigenschaft eines Stoffes bezeichnet, ist sie eine technische Größe. Die Stoffzusammensetzung wird durch den Gehalt der einzelnen Komponenten eines mehrkomponentigen Systems am Gesamtsystem bestimmt. Dabei können sich die Komponenten eines solchen Systems durch ihre chemische Natur, ihren Aggregatzustand oder durch andere Eigenschaften (auch durch mehrere gleichzeitig) voneinander unterscheiden. In manchen Systemen haben bestimmte Gehalte eigene Namen (z. B. Feuchte für Wassergehalt eines Gases).

Mit Hilfe aller für Mengen benutzten Einheiten, lassen sich *Einheiten für die Stoffzusammensetzung* bilden, da der Gehalt eine Angabe über Mengenverhältnisse darstellt. Dabei kann sich die Mengenangabe der gesuchten Komponente auf das Gesamtsystem oder auf die Restkomponente beziehen. Dies ergibt selbstverständlich verschiedene Zahlenwerte. Daraus folgt eine große Anzahl möglicher Einheiten, von denen die meisten in bestimmten Fällen auch angewendet werden.

Oft wird nicht nur der Gehalt einer Komponente, sondern der mehrerer Komponenten in Vielstoffsystemen benötigt, eventuell sogar die Gesamtzusammensetzung. Probleme dieser Art enthalten jetzt ebenfalls meßtechnische Aufgabenstellungen, die früher ausschließlich mit chemischen Methoden bearbeitet wurden. Entweder, weil die chemischen Verfahren weitgehend automatisiert werden, oder weil komplizierte Meßapparaturen nach physikalischen Meßprinzipien eingesetzt werden.

Ein Stoff, der aus mehreren Komponenten besteht, ist zwar durch seine Zusammensetzung, seine Struktur und seinen Zustand (Temperatur und Druck) eindeutig beschrieben. Oft ist es aber schwierig und sogar unmöglich, alle Gebrauchseigenschaften daraus abzuleiten. Deshalb treten in der Meßtechnik vielfach Stoffeigenschaften als eigenständige Aufgabengrößen auf. Viele von ihnen sind nur durch eine Meßvorschrift festgelegt, da sie keine physikalischen Größen sind und können nicht durch eine Definitionsgleichung auf Basisgrößen zurückgeführt werden. Hier sei auf das Beispiel von *Abschnitt 2.2.4.3* hingewiesen.

Eigenschaften und Zusammensetzungen von Stoffen werden vor allem bei Flüssigkeiten gemessen. Statt mit Meßobjekten hat man es also mit Meßgütern (*Meßsubstanzen*) zu tun. Daraus resultieren Vor- und Nachteile.

Vorteilhaft wirkt sich der flüssige Zustand des Meßgutes in der leichten Weiterleitung und Zuführung zum Meßfühler aus. So ergibt sich die Möglichkeit, den Meßort möglichst günstig, z. B. in eine Abzweigleitung (bypass oder Beipaß) zu legen. Das gestattet es, Möglicheiten für Reinigung, Kalibrierung und Reparatur des Meßfühlers vorzusehen. Außerdem ist fließfähiges Meßgut für kontinuierliche Messungen besonders prädestiniert.

Wird das Meßgut dem Analysenmeßgerät stetig zugeführt, so spricht man von *On-line-Messung*. Bei *Off-line-Messungen* wird eine Probe entnommen und in einem Labor untersucht. Befindet sich der Meßfühler direkt in der Produktleitung, so handelt es sich um eine *In-line-Messung*.

Nachteilig beeinflussen den Meßfühler, daß die Meßgüter korrosiv oder explosibel sein können. Auch sehr hohe bzw. niedrige Drücke und extreme Temperaturen wirken sich negativ aus. Daraus resultieren unterschiedliche Material- und Abdichtungsprobleme. Aus diesen Gründen sind für die Messung von Stoffzusammensetzungen Spezialgeräte dominierend. Universelle Geräte werden eher selten eingesetzt.

Ein durchaus nicht unbedeutendes Randproblem in diesem Zusammenhang ist die *Probenahme* (Probeentnahme) und die eventuell notwendige *Probenaufbereitung*. Bei homogenem Meßgut sowie unter Normaldruck und bei Temperaturen in der Nähe der Umgebungstemperatur sind die Schwierigkeiten nicht groß. Bei ausreichendem Druckgefälle genügt beispielsweise eine einfache Abzweigleitung.
Unter extremen Bedingungen oder bei inhomogenem Meßgut bzw. bei Meßgut, das zum Entmischen neigt oder in dem chemische Reaktionen, Zerfallsprozesse usw. auftreten können, kann die Probenahme problematisch werden.

Neben den Schwierigkeiten, überhaupt eine Probe entnehmen und maßgerecht aufbereiten (z. B. temperieren) zu können, muß besondere Sorgfalt darauf verwendet werden, damit die Probe bezüglich der Meßgröße für das Meßgut quantitativ und qualitativ repräsentativ ist, was in manchen Fällen großen Aufwand verursacht. Es nützt nichts, die Fehler der Messung zu verringern, wenn durch die Art der Probenahme nicht die *Repräsentanz der Probe* gewährleistet ist. Schließlich ist auch zu bedenken, was mit der Probe nach der Messung geschehen soll, ob sie verworfen wird (wobei der Umweltschutz zu beachten ist) oder dem Meßgut wieder zugeführt werden kann.

Eine spezielle Begebenheit der Meßtechnik für Stoffeigenschaften und -zusammensetzungen sei noch hervorgehoben. Die Aufgabengröße Zusammensetzung kann praktisch nie als Meßgröße benutzt werden, sondern es müssen dabei stets andere Meßgrößen herangezogen werden. In der Regel handelt es sich um indirekte Messungen.

Dabei lassen sich *spezifische* und *unspezifische Meßverfahren* unterscheiden. Als spezifisch bezeichnet man ein Meßverfahren, wenn der benutzte Effekt nur bei der gesuchten Komponente auftritt. Der Meßfühler spricht nur auf diese eine Komponente an und reagiert nicht auf alle anderen möglichen Komponenten des Stoffsystems. Dagegen tritt bei den unspezifischen Meßverfahren der für die Messung ausgenutzte Effekt bei allen oder zumindest mehreren Komponenten des Systems auf, ist aber unterschiedlich stark.

Gegenwärtig ist die Anzahl der bereits bekannten Meßprinzipien so groß, da es viele meßbare Stoffeigenschaften gibt, die sich von Stoff zu Stoff sehr deutlich unterscheiden. Die Vielfalt der Verfahren und die praktischen Ausführungen der Geräte sind im einzelnen kaum mehr zu überblicken.

Der Meßtechnik in der chemischen Industrie, wo Stoffzusammensetzungen oder -eigenschaften oft die ausschlaggebenden Größen eines Prozesses sind, kommt immer mehr Bedeutung zu.
Die *Entwicklung* auf diesem Gebiet ist *stark fortschreitend*. Es werden immer wieder andere, bereits bekannte oder neuentdeckte Effekte für die Entwicklung von Meßgeräten ausgenutzt. Andererseits aber werden auch bekannte Verfahren kombiniert, um unter Einsatz spezieller Rechner komplizierte Meßprobleme lösen zu können. Sorgfältige Berechnungen des zu erwartenden Nutzens gehen hier einem Geräteeinsatz voraus.

2.6.6.10 Messung von Zählgrößen und Grenzwerten

Charakteristisch für die *Messung von diskreten Größen*, die in dieser Gruppe zusammengefaßt sind, ist, daß sie nur bestimmte, in ihrer Anzahl festliegende Werte annehmen können bzw. es sind nur einzelne Werte meßtechnisch bedeutsam. Es gibt zwei Gruppen diskreter Größen: die Zählgrößen und solche analoge Größen, von denen nur bestimmte Grenzwerte erfaßt werden sollen. Die Meßmittel für derartige diskrete Größen heißen Schranken (in manchen speziellen Fällen auch -wächter, -melder oder -schalter, sofern mit der Messung auch eine Signalgabe gekoppelt ist).

Schranken haben die Aufgabe nur das Über- oder Unterschreiten eines vorgegebenen Sollwertes festzustellen und nicht den Wert einer Meßgröße in seinem Zeitverlauf ständig zu erfassen. Liegt dieser Sollwert an der Grenze eines Wertebereiches, so kann die meßtechnische Aufgabe auch darin bestehen, zu erkennen, ob dieser Grenzwert (z. B. eine Endlage) erreicht ist. Ausgangsgrößen dieser Meßmittel sind also Zweipunktsignale, unter Umständen können es auch Dreipunktsignale sein.

Es gibt grundsätzlich zwei verschiedene technische Möglichkeiten für die Lösung dieser Probleme. Zunächst kann man Meßprinzipien verwenden, die von vornherein nur die Unterscheidung von zwei Zuständen gestatten. Ein typisches Beispiel ist die Lichtschranke, die entweder unterbrochen ist oder nicht. Die andere Lösungsmöglichkeit besteht in der Benutzung solcher Meßfühler, die ein analoges Signal abgeben. Diese messen kontinuierlich, wobei dann das eigentliche diskrete Ausgangssignal mit Hilfe eines im (allgemeinen einstellbaren) Diskriminators erzeugt wird, der bei Erreichen des vorgegebenen Sollwertes anspricht.

Eigentliche Zählgrößen, die in einem bestimmten Detail übereinstimmen, können bereits von Natur aus durchgezählt werden. Die einzelnen Objekte müssen nicht unbedingt voneinander abtrennbar sein, wie z. B. die Bestimmung der Zähnezahl einer Säge oder eines Zahnrades (Sondereinheit: "Zähne"). Schließlich können auch abzählbare Eigenschaften (z. B. Farbzusammenstellung eines Musters) oder Ereignisse als Zählgröße auftreten. Während bei einigen Zählgrößen (z. B. Umdrehungen) Bruchteile möglich sind, sodaß sie erst durch das Meßverfahren zu diskreten Größen werden, treten andere (z. B. Anzahl von Teilen) prinzipiell nur ganzzahlig auf.

Als *Einheit für Zählgrößen* kann jede Gruppe benutzt werden, die eine festgelegte Anzahl von Elementen enthält, z. B. Paar (Anzahl 2) oder Dutzend (Anzahl 12). Die bevorzugte Anzahl ist jedoch 1 mit der Bezeichnung Stück. Für das Rechnen in Gleichungen ist vor allem zweckmäßiger, die Zählgrößeneinheit als unbenannte Zahl (arithmetische Zähleinheit) aufzufassen und mit "1" zu bezeichnen.

In der meßtechnischen Praxis treten nur sachbezogene Zählgrößen auf, für die dann auch sachbezogene Zähleinheiten als Sondereinheiten benutzt werden können.

Beispiel:

Größe: Anzahl der Umdrehungen;
Zähleinheit: 1;
Sondereinheit: Umdrehung

Neben der Messung von echten Zählgrößen gibt es auch *zählende Meßverfahren*, bei denen die eigentliche Zählgröße nicht in Erscheinung tritt, da sie erst im Verlauf der Messung durch die Quantisierung teilbarer Substanzen entsteht. Charakteristische Beispiele sind die Volumenzähler für Flüssigkeiten. Durch die Konstruktion der Geräte wird das Meßgut in gleich große Portionen aufgeteilt, und diese werden gezählt. Als (Sonder-)Einheiten könnten dabei "Portionen" bzw. die ihnen entsprechenden "Hübe" oder "Umdrehungen" auftreten. Der Meßwert dieser Volumenzähler (richtiger müßte man vom Meßergebnis sprechen) ist also das Produkt aus dieser Zählgröße und dem Volumen der einzelnen Portionen. Das wird, da die Anzeige in Volumeneinheiten erfolgt, äußerlich nicht erkenntlich. Diese Verfahren werden der digitalen Meßtechnik zugerechnet.

3 EINFÜHRUNG IN DIE ELEKTRISCHE MESSTECHNIK FÜR MASCHINENBAUER

Der wachsende Einsatz elektrotechnischer Schaltungen und der häufige Ersatz mechanischer durch elektrische Baugruppen erfordern die Kenntnis der Elektrotechnischen Grundlagen der Meßtechnik. Das Kapitel 3 soll dem Nicht-Elektrotechnikspezialisten eine Einführung in das Gebiet "Elektrischer/Elektronischer Hilfsmittel" und die Anwendung "Elektrischer Meßverfahren" und "Elektronischer Meßgeräte" geben.

3.1 ELEKTRISCHE HILFSMITTEL

3.1.1 Bauelemente elektrischer Prüfinstrumente

3.1.1.1 Lagerung

Mechanisch-elektrische Meßwerke bestehen in der Regel aus einem festen und einem beweglichen Meßwerkteil. Die Lagerung, die diese beiden Teile miteinander verbindet, muß so ausgebildet sein, daß durch sie nur sehr geringe Kräfte bzw. Drehmomente verursacht werden. Diese tragen parasitären Charakter, ihre Beträge dürfen nur Bruchteile von Prozenten der im Meßwerk aus der Meßgröße gelieferten mechanisch-elektrischen Drehmomente erreichen.
Die Lagerungen gehören deshalb zu den qualitätsentscheidenden Elementen der Meßinstrumente. Reproduzierbarkeit der Meßwerte, die Genauigkeit, die erreichbare Empfindlichkeit, die Standfestigkeit gegen äußere dynamische Beanspruchungen werden durch die richtige Auswahl von Material und konstruktiver Gestaltung bestimmt.

Die **Spitzenlagerung** (Saphir, Spinell, Achat, Berylliumbronze) wird in Schalttafeln- und Präzisionsinstrumenten verwendet (*Bild 3.1*).
Für große Massen der beweglichen Organe ist sie wenig geeignet, weil die im normalen Betrieb auftretenden statischen und dynamischen Kräfte so groß sind, daß sie ohne bleibende Deformation nicht übertragen werden können.

Deshalb werden für die Meßwerke von Tintenschreibern und Zählern meist **Zapfenlagerungen** benutzt (*Bild 3.2*). Für sehr empfindliche

Instrumente, z. B. Spiegelgalvanometer, wird die einseitige Bandaufhängung verwendet. Das bewegliche Organ hängt an einem Quarzfaden oder einem flachen Bronzeband. Diese Konstruktion ist nur bei genau senkrechter Systemlage anwendbar. Aus diesem Grunde sind solche Meßwerke mit einer Arretiereinrichtung des beweglichen Organs, mit einer Libelle und mit Stellschrauben ausgerüstet.

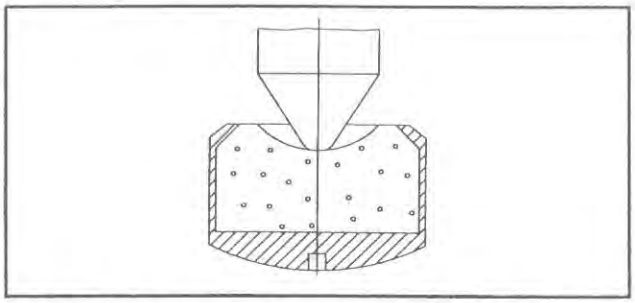


Bild 3.1 *Spitzenlagerung*

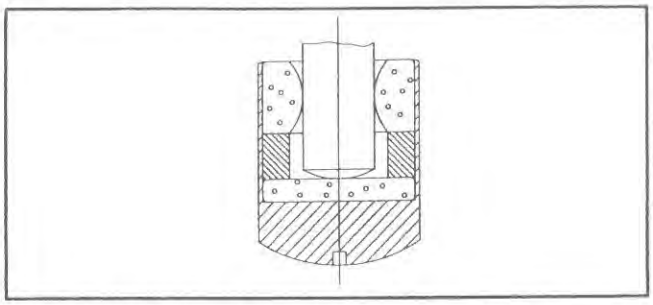


Bild 3.2 *Zapfenlagerung*

Die **Spannbandlagerung** ist eine zweiseitige Bändchenaufhängung, die weniger hohe Ansprüche an die genau senkrechte Aufstellung des Meßwerks stellt.
Die Erfahrungen mit der Spannbandtechnik führten zur Erweiterung ihrer Anwendung in Schalttafelinstrumenten, auch bei horizontaler Drehachse als "kurze Spannbandlagerung" (*Bild 3.3*).

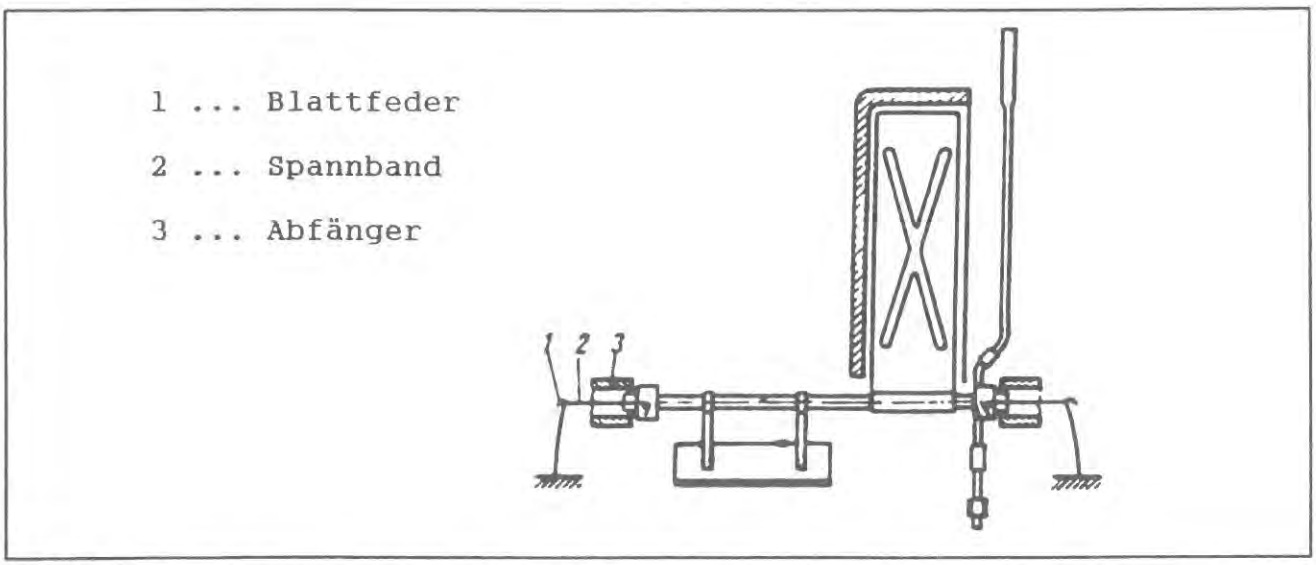


Bild 3.3 *Kurze Spannbandlagerung eines Dreheisenmeßwerks*

Eine Kombination von Spitzen- und Bandlagerung, die für Präzisions- und Prüfinstrumente verwendet und als "*entlastete Lagerung*" bezeichnet wird, ist in *Bild 3.4* dargestellt.

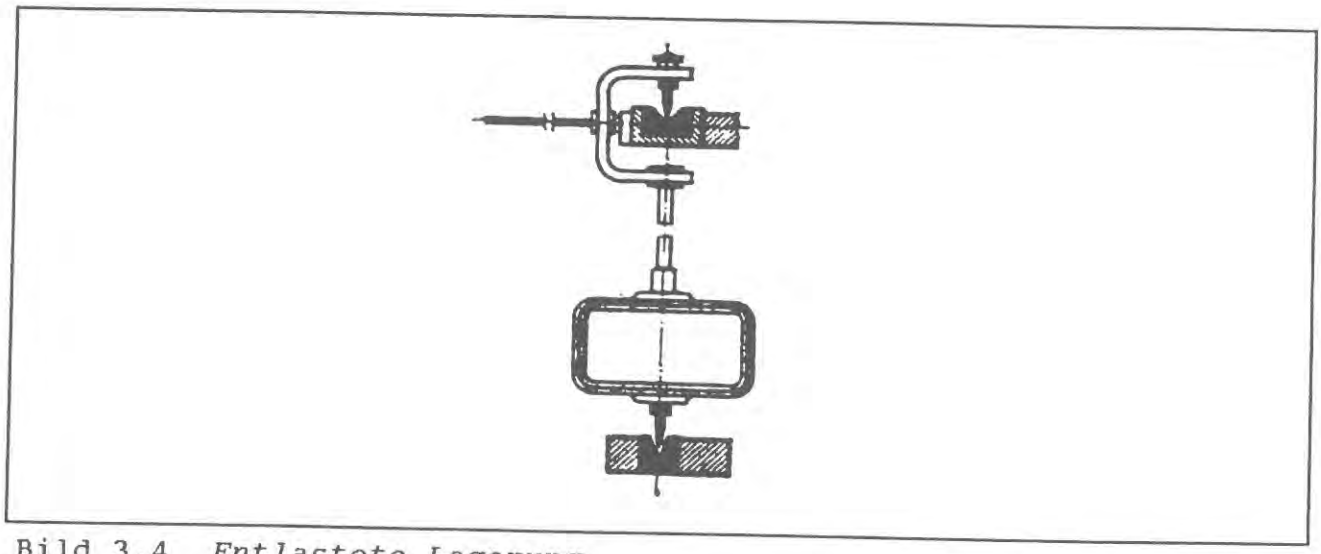


Bild 3.4 *Entlastete Lagerung*

3.1.1.2 Rückstellelemente

Die meisten Meßinstrumente erzeugen die Rückstellmomente mit Spiralfedern. Meßwerke mit Bandaufhängung benutzen die bei der Drehung des beweglichen Organs auftretenden Drehmomente der Aufhängebänder als Rückstellgröße. In besonderen Fällen wird das Rückstellmoment auch auf elektromagnetischem Wege erzeugt.

Gelegentlich wird vom *Rückstellmoment* neben der Ausschlagsabhängigkeit zusätzlich eine Strom- oder Spannungsabhängigkeit gefordert (z. B. bei Quotientenbildnern). Das läßt sich mit Hilfe einer zusätzlichen Drehspule erreichen, vorausgesetzt, das magnetische Feld, in dem sich die Rückstellspule bewegt, ist inhomogen.

Die Beträge der Rückstellmomente sind wegen der Lagerreibung nach unten begrenzt. Die Reibung hängt von der Lagerkonstruktion, den verwendeten Materialpaarungen und Krümmungsradien für die Spitzen und Kalotten der Steine sowie in besonderem Maße von der Masse des beweglichen Organs ab.

3.1.2 Meßwertanzeige

Im einfachsten Fall werden Meßwerte auf einer Skala angezeigt, und zwar entsprechend dem Weg, den die jeweilige Anzeigemarke von einem Anfangspunkt aus zurücklegt. Ablesen eines Meßgerätes bedeutet also, dem auf einen Weg abgebildeten Meßwert mit Hilfe der Skala den Zahlenwert der gemessenen Größe zuzuordnen. Dies gilt aber nur für die Ausgabe analoger Meßwerte durch anzeigende Meßgeräte.

3.1.2.1 Zeiger

Meßinstrumente mit analoger Meßwertbildung werden für den industriellen technischen Gebrauch meist mit materiellen Zeigern ausgerüstet (*Bild 3.5*). Eine Ausnahme bilden die Zungenfrequenzmesser. Die Skalen sind den Zeigerformen nach Strichabstand und Strichstärke angepaßt.

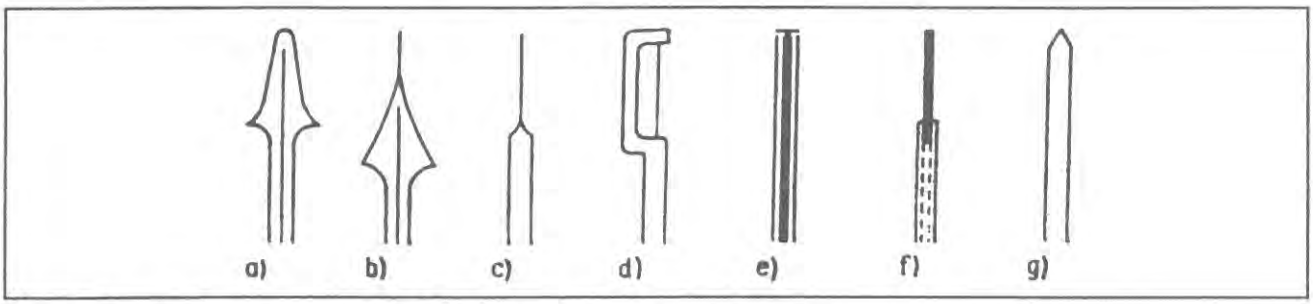


Bild 3.5 Unterschiedliche Zeiger

a) *Lanzenzeiger für Schalttafelinstrumente*
b) *Messerlanzenzeiger für Schalttafelinstrumente*
c) *Messerzeiger für Präzisionsinstrumente*
d) *Fadenzeiger für Präzisionsinstrumente*
e) *Glaszeiger mit Einfärbung der Kapillare für Schaltinstrumente*
f) *Glaszeiger mit eingesetzter Spitze*
g) *Balkenzeiger für Ablesungen aus großer Entfernung*

Der *Parallaxenfehler* kann bei allen Zeigermeßgeräten auftreten, wenn die Ablesung nicht senkrecht zur Skalenebene erfolgt (*Bild 3.6*), und wächst mit dem Abstand von Skala und Zeiger. Für Präzisionsinstrumente werden spiegelunterlegte Skalen benutzt, mit deren Hilfe die Parallaxe verhindert werden kann, wenn sich der Zeiger mit seinem Spiegelbild deckt.

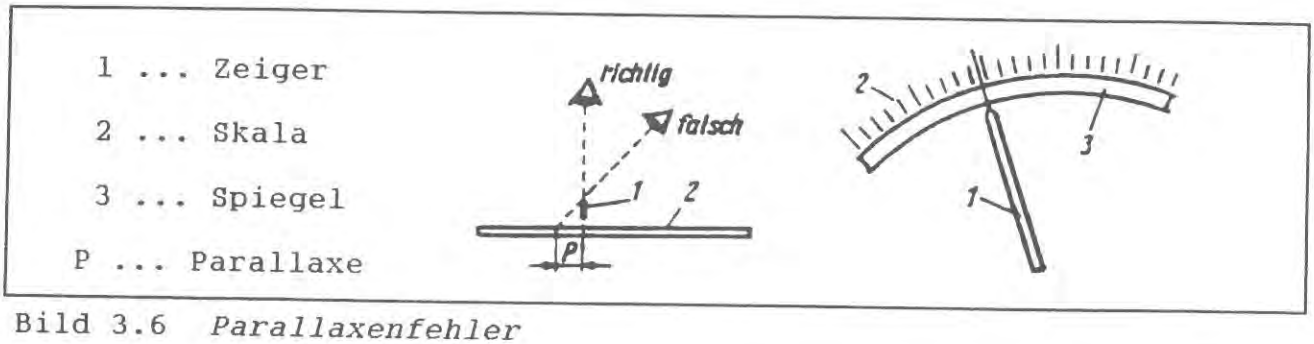


Bild 3.6 *Parallaxenfehler*

Der wesentliche *Nachteil* materieller Zeiger ist ihr erhebliches Massenträgheitsmoment. Hinzu kommt, daß das einseitige statische Moment des Zeigers, die Zeigerlänge, so ausgeglichen wird, daß der Schwerpunkt des beweglichen Organs in der Drehachse liegt. Das führt zur Vermehrung seiner Gesamtmasse und macht größere Spitzenradien für die Lagerung notwendig. Damit ist eine Vergrößerung der Lagerreibung verbunden, deren Wirkung nur durch die Steigerung der Rückstellmomente ausgeglichen werden kann.
Aus diesen Zusammenhängen ist erkennbar, daß Zeigerinstrumente nur eine begrenzte Empfindlichkeit haben, wenn keine besonderen Mittel aufgewendet werden, mit denen die dargegelegten mechanischen Störanfälligkeiten überwunden werden können. Hierzu zählen Feststelleinrichtungen des beweglichen Organs für den Transport, besonderer Aufwand für die Lagerung u.a.m. Besonders bewährt haben sich aus Glaskapillaren hergestellte Zeiger (geringe Masse, große Elastizität und hohe Festigkeit).

3.1.2.2 Lichtzeiger

Eine wesentliche Steigerung der Empfindlichkeit elektrischer Meßinstrumente bei gleichzeitiger Verbesserung ihrer dynamischen Eigenschaften liefert die Anwendung des Lichtzeigers in Verbindung der Spannbandlagerung des beweglichen Organs.

Bei getrennter Aufstellung von Meßwerk und Skala sind die höchsten Empfindlichkeiten erreichbar, vorausgesetzt das Galvanometer ist erschütterungsfrei aufgestellt. Allerdings ist eine fest vorgegebene Kalibrierung dieser Meßeinrichtung, deren Anwendung sich hauptsächlich auf den Nullindikator beschränkt, nicht möglich.

Man unterscheidet die *objektive Ablesung*, bei der der Lichtstrahl über den Meßwerkspiegel auf eine Skala gelenkt wird, wo der Anzeigewert markiert wird, und die *subjektive*, bei der Ausschnitte der Skala über den vom Meßwerkspiegel reflektierten Beobachtungsstrahl mit Hilfe eines Fernrohres beobachtet werden (siehe *Bild 3.7*).

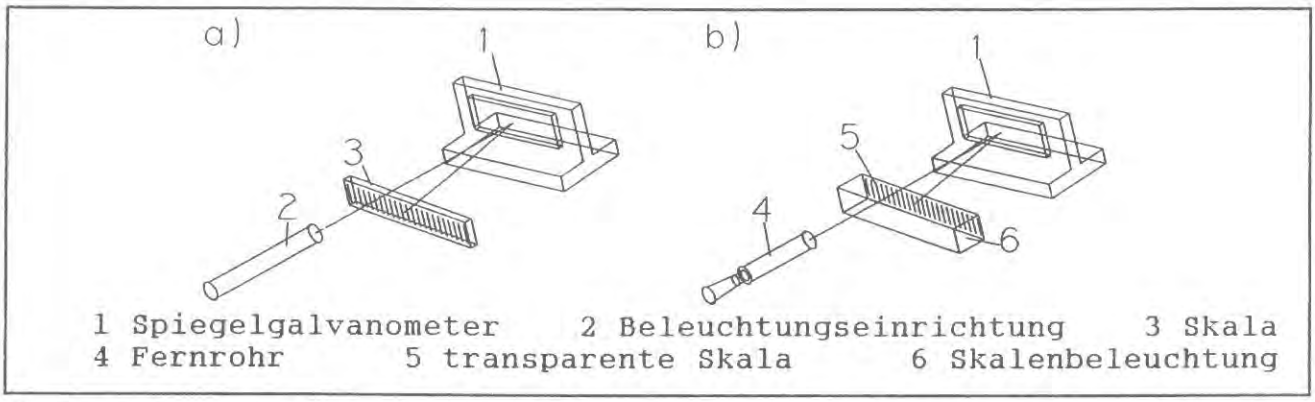


Bild 3.7 *Ablesung der Meßwertanzeige von Spiegelgalvanometern*
a) *objektiv*
b) *subjektiv*

Das **Lichtmarkengalvanometer** stellt die technische Höchstform dieser Meßeinrichtung dar (geschlossene Form des Meßinstruments in Verbindung mit Spannbandlagerung für das Meßwerk). Die mehrfache Zeigerreflexion bewirkt eine Streckung der Skala, erleichtert die Ablesung des Meßwertes und ermöglicht die Steigerung der Empfindlichkeit durch Verkleinern des Drehwinkels des Meßwerks.

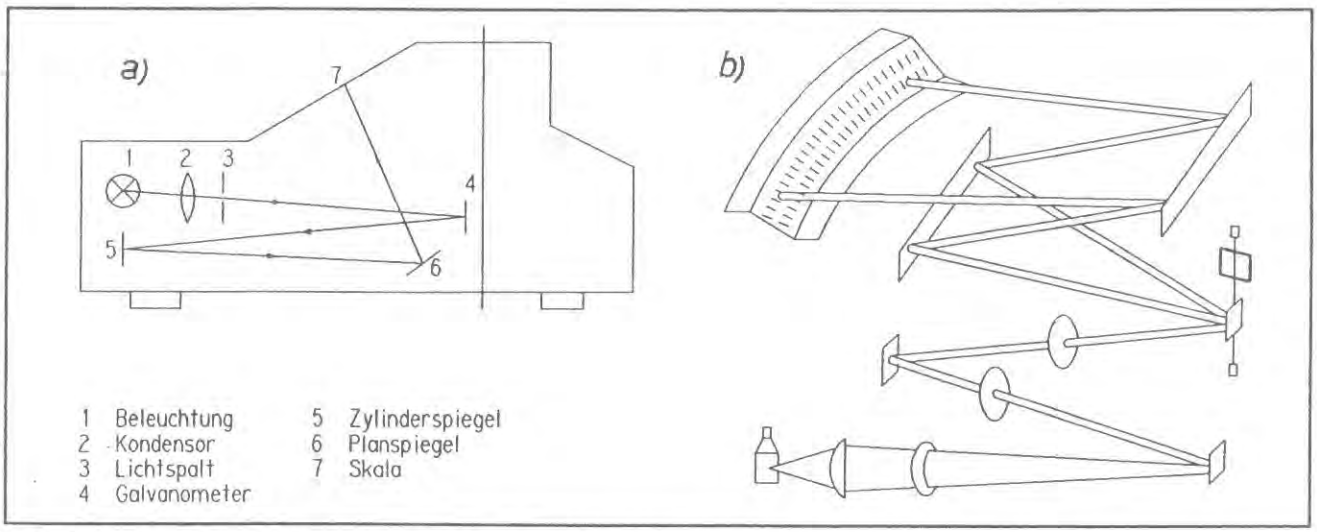


Bild 3.8 *Strahlengang in einem Lichtmarkeninstrument mit Mehrfachreflexion*
a) *mit einfacher Nutzung der Skalenlänge*
b) *mit Strahlspaltung und doppelter Nutzung der Skalenlänge*

Außerdem ermöglicht sie die Doppelnutzung der Skalenlänge durch Aufspaltung des Lichtstrahls an einem prismatischen Meßwerkspiegel (*Bild 3.8*). Das Ablesen der Meßwerte von Lichtmarkeninstrumenten jeder Art erfolgt parallaxenfrei.

3.1.3. Registriereinrichtungen

Man unterscheidet zwischen analoger und digitaler Registrierung. Bei der **analogen Registrierung** wird die Meßgröße meist als Funktion der Zeit dargestellt, deren Überlagerung als zusammengesetzte Bewegung die Schreibspur des Kurvenzuges ergibt.
Die Geräte der Analog-Registrierung enthalten Bauelemente zur Durchführung folgender drei Aufgaben:

(1) Ausführung der Auslenkbewegung analog dem Augenblickswert der Meßgröße,
(2) Ausführung des Papiervorschubs analog dem Zeitfortschritt,
(3) Ausführung der Schreibspurmarkierung auf dem Registrierpapier.

Allgemein kommen zur Registrierung analoger Meßwerte Schreiber und Oszillografen in Frage. Bei elektrischen Schreibern gibt es einerseits Linienschreiber für kontinuierliche Aufzeichnung und andererseits Punktschreiber in der Bauform der Fallbügelschreiber, wobei die Meßwerte nur in vorgegebenen zeitlichen Intervallen registriert werden.

Bei **Linienschreibern** gleitet das Zeigerende mit einer Schreibfeder (Tinte oder Filzstift) ausgerüstet über eine Papierbahn und liefert einen deutlichen und stetigen Kurvenzug. Sie neigen zum Einhaken der Schreibfeder, die auftretende Reibung zwischen Schreibfeder und Papier am großen Hebelarm des Zeigers verschlechtert die dynamischen Eigenschaften und mindert die erreichbare elektrische Empfindlichkeit außerordentlich.

Zur Registrierung von Meßwerten mit geringen Beträgen dient der **Punktschreiber**. Er findet vor allem im Bereich thermischer Größen Anwendung und benutzt ein empfindliches Meßwerk mit Spannbandaufhängung. Die Registrierung erfolgt diskontinuierlich mit Hilfe eines Fallbügels, der in festgelegten Zeitabständen den Zeiger

in rhythmischer Folge (etwa im 20-Sekundenabstand) auf das Schreibpapier drückt, das auf einer Farbunterlage gleitet.
Mit *Fallbügelschreibern* lassen sich auch mehrere Meßwerte verschiedener Systeme nacheinander aufzeichnen. Dazu wird die Farbunterlage für das Schreibpapier mit einer der Anzahl der Systeme angepaßten Farbskala ausgerüstet, die zusammen mit dem Meßwert umgeschaltet wird.

Der *Papiertransport* erfolgt mit Hilfe von Federuhrwerken mit Handaufzug oder elektrischem Aufzug und mit selbstanlaufenden Synchronmotoren. Folgende Papiervorschubgeschwindigkeiten werden für Linienschreiber verwendet:

5 - 10 - 20 - 40 - 60 - 120 - 240 - 360 - 600 - 1200 - 7200 mm/h

Die Aufzeichnung der Meßgrößen mit **Lichtzeigern** verringert die Schwierigkeiten für den Aufbau der elektrischen Meßwerke außerordentlich. Sie erfolgt mit Hilfe von lichtempfindlichen Registrierpapieren. Als Lichtquellen sind normale Glühlampen oder Quecksilberdampf-Höchstdrucklampen (hoher UV-Anteil) in Gebrauch. Eine ohne Entwicklung direkt erkennbare Aufzeichnung der Schreibspur mit UV-haltigem Licht erfordert Spezialpapier, wodurch die Papierkosten wesentlich höher sind. Mit normalen Glühlampen kann gewöhnliches Fotopapier in Rollenform belichtet werden, wobei heute der Trend auch in diese Richtung geht.
Der Störfaktor des mechanischen Widerstandes zwischen Papier und Schreiborgan entfällt dabei ganz. Signale mit Frequenzen bis zu 10^4 Hz lassen sich so aufzeichnen. Das Hauptanwendungsgebiet dieser Registrierverfahren liegt bei *Schleifenoszillografen*.

Bei der **Digital-Registrierung** erfolgt die Niederschrift der Meßwerte in Ziffernform. Allerdings muß nicht jeder Ziffernanzeige ein digitales Meßsignal zugrunde liegen. In der Digitaltechnik übernehmen Meßwertdrucker die Aufgabe des Registrierens. Dabei gibt es heute eine große Anzahl verschiedener Bauformen von Druckern. Während die analoge Form der Registrierung stetig verläuft, ist die digitale Form eine unstetige. Trotzdem kann die Genauigkeit der Aussage bei hoher Stellenanzahl in der digitalen Registrierung größer sein. Weiters besteht die Möglichkeit des maschinellen Lesens der Ziffernwerte durch einen Rechner.

3.1.4 Anzeigeinstrumente und Meßwerke

3.1.4.1 Drehspulmeßgeräte

Der Wirkungsmechanismus der Drehspulinstrumente beruht auf der Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im homogenen Magnetfeld. Das Drehspulinstrument enthält einen feststehenden Permanentmagneten, der das magnetische Feld mit der Induktion B erzeugt, und eine bewegliche Spule, die bei Stromdurchfluß I elektromagnetisch abgelenkt wird. Dem elektromagnetisch bedingten Drehmoment der Spule

$$M_e = N.I.B.l.d$$

N ... Windungszahl und l,d ... Abmessungen der Drehspule;

stellt sich ein zum Drehwinkel α proportionales Gegendrehmoment

$$M_g = -D.\alpha$$

ein, das von zwei Federn, die gleichzeitig die Stromzuführung zur Drehspule übernehmen, geliefert wird. Wegen der homogenen Flußdichteverteilung im Luftspalt ist die Beziehung zwischen Ausschlag und Strom linear und hängt damit auch von der Stromrichtung ab. Eine Umkehrung der Stromrichtung hat eine Umkehrung des Ausschlags zur Folge. Den Aufbau von Drehspulinstrumenten zeigt *Bild 3.9*.

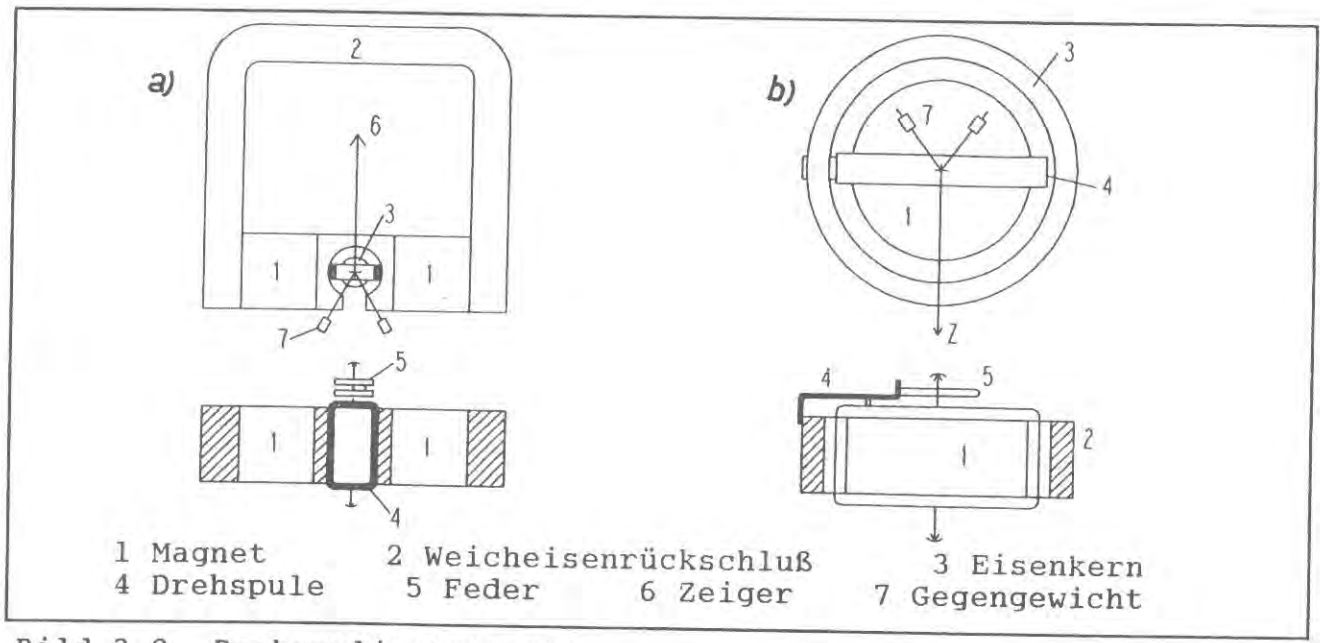


Bild 3.9 *Drehspulinstrumente*
a) *Außenmagnetmeßwerk*
b) *Kernmagnetmeßwerk*

Drehspulmeßwerke mit Dauermagnet liefern die Grundlage für Meßinstrumente zur Strom- und Spannungsmessung. Im letzten Fall muß es als Instrument mit dem Strom als natürliche Meßgröße einen konstanten Eingangswiderstand haben.

3.1.4.2 Galvanometer

Galvanometer gehören zu den Geräten, die keine feste Kalibrierung haben und denen infolge dessen keine Genauigkeitsklasse zugeordnet werden kann. Sie werden für hohe Strom- und Spannungsempfindlichkeiten, gelegentlich auch für beides durch die Verwendung eines Rähmchens mit zwei von außen elektrisch zugänglichen Spulenteilen, ausgelegt. Ihre Dämpfung erfolgt über den Widerstand des äußeren Stromkreises, für den die erforderlichen elektrischen Werte vom Hersteller angegeben werden, um den aperiodischen Grenzfall für die Zeigereinstellung zu erzielen.

Galvanometer werden hauptsächlich als Lichtmarkeninstrumente oder als Spiegelgalvanometer *[siehe 3.1.2.2]* mit einer vom Instrumentengehäuse getrennten Ableseeinrichtung ausgeführt. Zeigergalvanometer haben geringere Empfindlichkeiten und dienen meist als Indikator mit zweiseitigem Ausschlag. Sie werden vielfach in Meßbrücken und Kompensatoren verwendet.

Das **Spiegelgalvanometer** hat ein an einem Bändchen aufgehängtes bewegliches Organ, dessen Lagerung eine senkrechte Aufstellung des Meßwerks erfordert (Libelle und Stellschrauben zur Anpassung seiner Lage an den Aufstellungsort). Die beweglichen Teile können außerdem für den Transport des Gerätes arretiert werden.
Zur Anpassung der Empfindlichkeit und Dämpfung des Spiegelgalvanometers an die Besonderheiten der Meßschaltung ist sein magnetischer Kreis vielfach mit einem magnetischen Nebenschluß ausgerüstet, dessen Einstellung von außen verändert werden kann.

Das **Lichtmarkengalvanometer** (meist Spannbandaufhängung des beweglichen Organs) ist weniger störanfällig als das Spiegelgalvanometer und daher für den technischen Gebrauch besser geeignet. Seine Empfindlichkeit ist jedoch kleiner und wird mit mehreren Meßbereichen ausgerüstet.

3.1.4.3 Lichtstrahloszillografen

Lichtstrahloszillografen werden zum Aufzeichnen schnellveränderlicher Vorgänge verwendet. Sie haben eine Reihe (häufig 8 oder 12) von auswechselbaren Drehspulmeßwerken verschiedener Empfindlichkeiten zur gleichzeitigen Aufnahme verschiedener Vorgänge. Damit die Meßwerke den zeitlichen Änderungen der Meßgröße weitgehend fehlerfrei folgen können, sind ihre beweglichen Organe trägheitsarm ausgebildet und für die Verwendung in den Bereichen hoher Frequenzen auf Drahtschleifen reduziert (*Stiftgalvanometer*).

Meßwertanzeige- und registrierung erfolgen auf optischem Wege. Die beweglichen Teile tragen einen Spiegel (*Bild 3.10*), der einen Lichtzeiger auf lichtempfindliches Registrierpapier lenkt. Auf diesem wird der zeitliche Verlauf der Meßgröße fotographisch festgehalten. Die Ablaufgeschwindigkeit des Registrierpapiers ist in einem weiten Bereich einstellbar. Die Dämpfung erfolgt durch eine Dämpfungsflüssigkeit oder elektrodynamisch. Das magnetische Feld für die Meßwerke wird häufig im geschlossenen äußeren Kreis eines Dauermagneten bereitgestellt.

1 ... Spannband
2 ... Linse
3 ... Miniaturspiegel
5 ... Gehäuse
6 ... Raum für Dämpfungsflüssigkeit
7 ... Kontakte

Bild 3.10 *Spiegelgalvanometer*

3.1.5. Widerstände

3.1.5.1 Ohmsche Widerstände

Ohmsche Widerstände werden in der elektrischen Meßtechnik in außerordentlich mannigfaltiger Form angewendet, sowohl hinsichtlich des konstruktiven Aufbaus als auch des verwendeten Materials und der Größenordnung. Die Widerstandswerte liegen zwischen 10^{-5} und 10^{12} Ohm.
Widerstände dienen in Meßschaltungen zur Einstellung bestimmter Strom- und Spannungswerte und zur Realisierung veränderlicher oder fester Widerstandsvergleichswerte. Daher gibt es Bauteile, die als *stellbare Widerstände* und als *feste Normalwiderstände* ausgeführt werden.

Die Widerstandselemente sind entweder Drahtwiderstände oder Schichtwiderstände. Wegen ihrer weit stärker ausgeprägten Temperaturabhängigkeit kommen Hartkohle und Metallschichtwiderstände nur noch für sehr hoch- und höchstohmige Dekaden (1MΩ bis 1TΩ) in Betracht. In beiden Fällen wird das Widerstandsmaterial im Vakuum auf einen isolierten Trägerkörper, meist Porzellan, aufgedampft.

Der Wert eines Widerstandes ist geringfügig von der *Temperatur* abhängig. Je nach verwendetem Material kann der Temperaturkoeffizient positiv oder negativ sein. Durch einen großen negativen Temperaturkoeffizienten sinkt der Widerstandswert, was zu einer Erwärmung führt. Durch die Konvektionskühlung oder eine interne Strombegrenzung stabilisiert sich dieser Vorgang oder der Widerstand wird zerstört.

Neben dem Temperaturverhalten der Widerstände ist auch ihr *Frequenzverhalten* von Interesse. Da die Widerstände bei Stromdurchfluß ein Magnetfeld aufbauen, sind sie mit Induktivität und auch Wicklungskapazität behaftet (*Bild 3.11*). Schichtwiderstände sind durch ihren konstruktiven Aufbau wenig frequenzabhängig. Bei Drahtwiderständen sind verschiedene induktivitätsmindernde Wickeltechniken gebräulich. Diese werden meist bifilar oder in Gruppen bifilar gewickelt. Unter diesen Umständen lassen sie sich mit einer Zeitkonstanten ausführen, die eine fehlerfreie Anwendung bis 100 kHz gestattet.

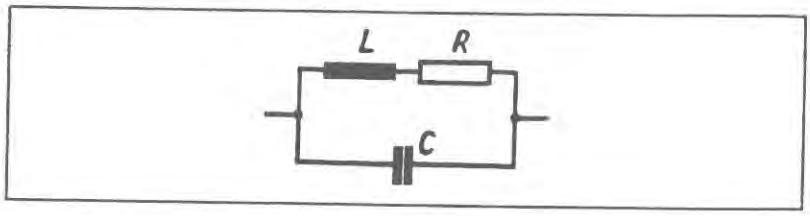


Bild 3.11
Ersatzschaltbild eines ohmschen Widerstandes unter Betrachtung seiner Blindanteile

Bauteile, wie Widerstände und Kondensatoren werden mit genormten Werten angeboten. Diese *Normwerte* unterscheiden sich in der Feinheit der Abstufung und in den zulässigen Toleranzen. Je feiner die Abstufung desto geringer sind die zulässigen Toleranzen (Tabelle 3.1). Auf den Bauteilen werden die Widerstandswerte und die Toleranz mit Hilfe von Farbringen angegeben. Entscheidend ist in der Meßtechnik für diese Bauteile eine hohe Langzeitstabilität und nicht die hohe Genauigkeit. Diese und weitere Angaben, wie über den Temperaturkoeffizienten (Temperaturbeiwert) sowie das Alterungsverhalten durch irreversible physikalische und chemische Vorgänge entnimmt man dem Datenblatt.

Die Belastbarkeit eines Widerstandes wird auch *Nennlast* genannt und ist die maximale am Widerstand umsetzbare Leistung. Wird die Nennlast überschritten, so kann es zur Zerstörung des Widerstandes kommen. Je nach Bauform verkraften Widerstände Nennlasten zwischen 0,1 und 20 Watt. Für höhere Leistungen müssen diese speziell konstruiert werden.

Für konstante Meßwiderstände hoher Genauigkeit wird die Form des Normalwiderstandes gewählt. Niederohmige Normalwiderstände sind mit je einem Anschluß für Strom und Spannung (Meßschaltung) ausgerüstet. Zwischen den Potentialklemmen liegt der Nennwert des Widerstandes.

Stellbare Widerstände werden als *Schiebe- oder Drehwiderstände* ausgeführt und als veränderliche Vorwiderstände oder als Spannungsteiler eingesetzt. Der letzteren Anwendung verdankt der stellbare Widerstand die übliche Bezeichnung Potentiometer. Mit Hilfe des beweglichen Schleifkontaktes lassen sich am Ausgang des Spannungsteilers bestimmte Spannungen bzw. Potentiale einstellen.

E6 ±20%	E12 ±10%	E24 ±5%	E48 ±2%	E96 ±1%
1,0	1,0	1,0	1,00	1,00
				1,02
			1,05	1,05
				1,07
		1,1	1,10	1,10
				1,13
			1,15	1,15
				1,18
	1,2	1,2	1,21	1,21
				1,24
			1,27	1,27
		1,3		1,30
			1,33	1,33
				1,37
			1,40	1,40
				1,43
			1,47	1,47
1,5	1,5	1,5		1,50
			1,54	1,54
				1,58
		1,6	1,62	1,62
				1,65
			1,69	1,69
				1,74
			1,78	1,78
	1,8	1,8		1,82
			1,87	1,87
				1,91
			1,96	1,96
		2,0		2,00
			2,05	2,05
				2,10
			2,15	2,15
2,2	2,2	2,2		2,21
			2,26	2,26
				2,32
			2,37	2,37
		2,4		2,43
			2,49	2,49
				2,55
			2,61	2,61
				2,67
	2,7	2,7	2,74	2,74
				2,80
			2,87	2,87
				2,94
		3,0	3,01	3,01
				3,09
			3,16	3,16
				3,24

E6 ±20%	E12 ±10%	E24 ±5%	E48 ±2%	E96 ±1%
3,3	3,3	3,3	3,32	3,32
				3,40
			3,48	3,48
				3,57
		3,6	3,65	3,65
				3,74
			3,83	3,83
	3,9	3,9		3,92
			4,02	4,02
				4,12
			4,22	4,22
		4,3		4,32
			4,42	4,42
				4,53
			4,64	4,64
4,7	4,7	4,7		4,75
			4,87	4,87
				4,99
		5,1	5,11	5,11
				5,23
			5,36	5,36
				5,49
	5,6	5,6	5,62	5,62
				5,76
			5,90	5,90
				6,04
		6,2	6,19	6,19
				6,34
			6,49	6,49
				6,65
6,8	6,8	6,8	6,81	6,81
				6,98
			7,15	7,15
				7,32
		7,5	7,50	7,50
				7,68
			7,87	7,87
				8,06
	8,2	8,2	8,25	8,25
				8,45
			8,66	8,66
				8,87
		9,1	9,09	9,09
				9,31
			9,53	9,53
				9,76

Tabelle 3.1 *Normreihen für Widerstände und Kondensatoren (mit zugehörigen Toleranzen)*

Heute gibt es zahlreiche Ausführungsformen für Frontplattenmontage sowie zum direkten Einlöten in gedruckte Schaltungen, die *Trimmpotentiometer* genannt werden und im allgemeinen zum Einstellen von Betriebswerten dienen.

3.1.5.2 Induktivitäten

Induktivitäten (Drosseln) für genaue Meßgeräte werden meist ohne ferromagnetischen Kern ausgeführt (stromunabhängige Beträge der Induktivitäten). Als Träger für die Wicklung wird vorwiegend ein Keramikkörper benutzt. Eine häufig verwendete Form der Induktivität ist das Toroid (*Bild 3.12*).

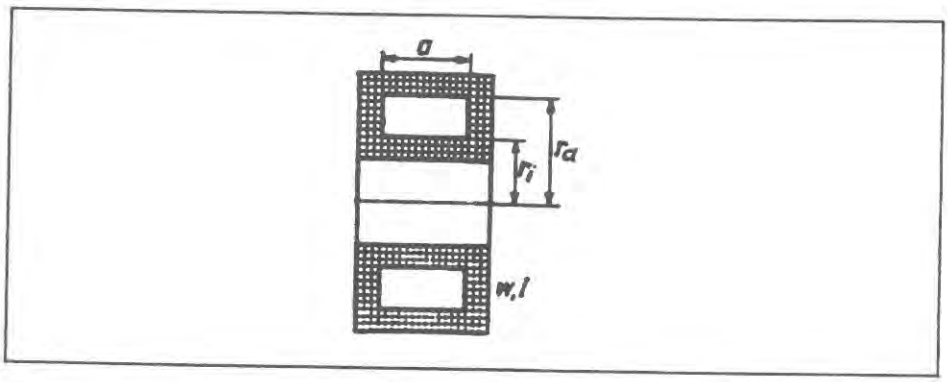


Bild 3.12
Toroid, Schnitt

Zwischen zwei Wicklungen deren Flüsse miteinander verkoppelt sind, treten Gegeninduktivitäten auf. Die Messung der Gegeninduktivität M erfolgt so, daß beide Spulen nacheinander gleichsinnig und gegensinnig in Reihe geschaltet und in beiden Fällen die Gesamtinduktivitäten La und Lb bestimmt werden. Dann ist:

$$M = (La - Lb)/4$$

Beim **Variometer** sind zwei Spulen in Reihe geschaltet. Dabei ist eine drehbar innerhalb der anderen angeordnet. Hier ist die Gesamtinduktivität nicht mehr konstant, sondern von der Lage beider Spulen zueinander abhängig.

3.1.5.3 Kapazitäten

Übliche Kapazitätswerte von Kondensatoren bewegen sich zwischen 5 pF und 0,1 F und bestimmen Bauart und Größe des Kondensators. Die Nennkapazität ist meist aufgedruckt, oder als Farbcodierung angebracht, wobei die Normreihe verwendet wird (siehe *Tabelle 3.1*).

Kapazitäten können im Gegensatz zu Induktivitäten so realisiert werden, daß Nebeneffekte über einen großen Frequenz- und Aussteuerbereich hinweg vernachlässigbar klein bleiben. Deshalb spielen in der Meßtechnik feste Normalkapazitäten sowie veränderbare Kondensatoren, deren gebräuchlichste Form der Drehkondensator ist, eine ähnlich wichtige Rolle wie Meßwiderstände.

Kondensatoren für hohe Ansprüche bestehen aus Metallplatten oder Metallfolien, zwischen denen sich als Dielektrikum Luft, Glimmer und für hohe Spannungen Preßgas befindet.

Bei Kondensatoren bilden sich elektrische Streufeldlinien zu umgebenden Schaltungsteilen hin aus und sind deshalb mit störenden *Streukapazitäten* behaftet. Um diese Nebenkapazitäten kontrollierbar zu machen, werden Meßkondensatoren in metallische Gehäuse eingebaut. Es treten dann nach *Bild 3.13* zwei Nebenkapazitäten C_{1M} und C_{2M} zwischen den Anschlüssen und dem Gehäuse auf. Bei genauen Messungen müssen diese Nebenkapazitäten berücksichtigt oder durch geeignete Meßschaltungen wirkungslos gemacht werden

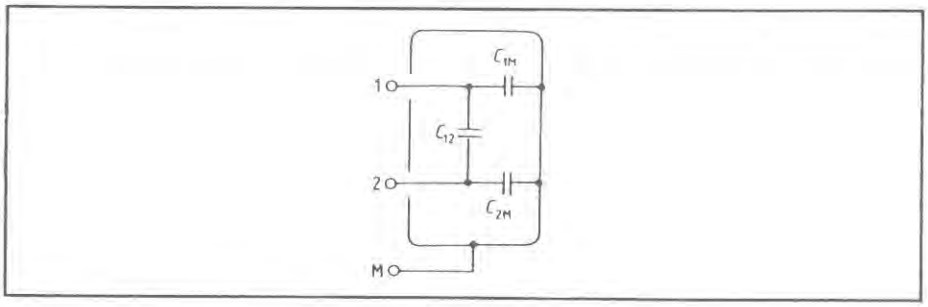


Bild 3.13
Grundsätzlicher Aufbau eines geschirmten Kondensators mit den wirksamen Kapazitäten

Obwohl die Nebeneffekte bei Kondensatoren sehr viel weniger ausgeprägt sind als bei Spulen, sind sie dennoch nicht vollständig vernachlässigbar.
Ohmsche Verluste in den Zuleitungen, Polaritätsverluste im Dielektrikum, Isolationsfehler des Dielektrikums und Zuleitungsinduktivität führen zu dem in *Bild 3.14* dargestellten Ersatzschaltbild.

Luftkondensatoren werden als Normalkondensatoren für Festwerte von 10 pF bis 100 nF mit einer Genauigkeit von 0,0001 ausgeführt. Ihr Temperaturbeiwert im Bereich von 10 bis 30 Grad liegt in der Größenordnung von 0,0001 bis 0,00005 pro K.

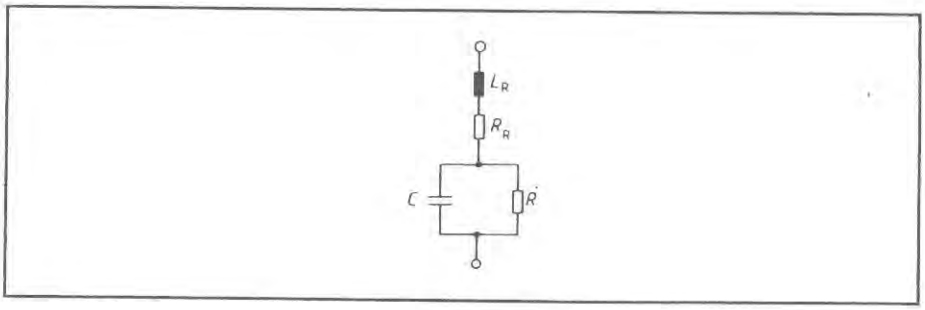


Bild 3.14
Ersatzschaltbild eines Kondensators

3.1.6 Meßwandler

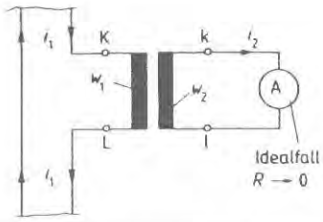
3.1.6.1 Strom- und Spannungswandler

Meßwandler transformieren Wechselspannungen oder Wechselströme auf technisch einfach meßbare Werte. Liegt die Meßgröße in einer Form vor, die ihre unmittelbare Verarbeitung im Meßgerät verbietet oder nur unter großen technischen Schwierigkeiten möglich macht, dann empfiehlt es sich, sie so umzuwandeln, daß sie danach mit herkömmlichen Mitteln erfaßt werden kann. Das ist z. B. in der Hochspannungstechnik der Fall.

Vom Meßwandler wird erwartet, daß sein Übersetzungsverhältnis im gesamten Meßbereich konstant und reell ist, d. h., daß der Quotient des Betrags von Eingangs- und Ausgangsgröße unabhängig von der Belastung konstant bleibt und ihre Phasenlage übereinstimmt. Diese Forderungen müssen aus ökonomischen Gründen auch dann erfüllt werden, wenn eine angemessene, durch die angeschlossenen Instrumente bestimmte Belastung der Ausgangsseite erfolgt.

3.1.6.2 Stromwandler

Für die quantitative Übersetzung von Strömen wird der Stromwandler verwendet. Er stellt einen *Transformator* dar, der mit seiner Primärwicklung (w_1) in die Leitung eingefügt wird, sodaß die Primärwicklung von dem zu messenden Strom $i_1(t)$ durchflossen wird. Die Sekundärwicklung wird im Idealfall über ein Strommeßinstrument mit dem Innenwiderstand Null kurzgeschlossen. Durch Schaltungszwang ist dann $u_2(t)=0$, sodaß auch $\Phi(t)=0$ bleiben muß. Daraus folgt, daß auch die resultierende Fensterdurchflutung gleich Null sein muß und die Sekundärdurchflutung gleich der Primärdurchflutung ist. Die Ströme verhalten sich dann umgekehrt wie die Windungszahlen.



Stromwandler

Idealfall:

$$u_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = 0,\ \Phi = 0,$$

$$i_1 w_1 - i_2 w_2 = 0,\ \frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1}.$$

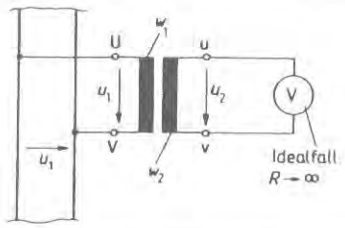
Effektivwerte:

$$\boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}}$$

Bild 3.15 *Prinzipielle Wirkungsweise von Stromwandlern*

3.1.6.3 Spannungswandler

Der Spannungswandler wird mit seiner Primärwicklung (Windungszahl w_1) an die zu messende Spannung $u_1(t)$ angeschaltet. Der magnetische Fluß $\Phi(t)$ muß sich dann zwangsläufig so einstellen, daß in der Primärwicklung eben genau die Spannung $u_1(t)$ induziert wird. Das hat aber zur Folge, daß auch in der Sekundärwicklung mit der Windungszahl w_2 eine Spannung gleicher Kurvenform induziert wird, die sich nur der Größe nach entsprechend dem Windungszahlverhältnis w_2/w_1 von der Primärspannung unterscheidet (siehe *Bild 3.16*). Entsprechend verhalten sich dann auch Mittelwerte, z. B. die Effektivwerte, wie die Windungszahlen.



Spannungswandler

Idealfall:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{w_1 \frac{d\Phi}{dt}}{w_2 \frac{d\Phi}{dt}} = \frac{w_1}{w_2}$$

Effektivwerte:

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}}$$

Bild 3.16 *Prinzipielle Wirkungsweise von Spannungswandlern*

Der induktive Spannungswandler ist ein Transformator, dessen Übersetzungsverhältnis auf einen bestimmten Betrag festgelegt wird, der sich weitgehend aus seinem Windungszahlverhältnis bestimmt. Von besonderem Vorteil ist, daß die Messung, wenn sie betriebsmäßig vorgenommen wird, meist nur in einem kleinen, durch die Schwankungen der Nennspannung der Anlage festgelegten Bereich erfolgt. Die Spannungsverteilung und damit die Übersetzung ist indessen recht kompliziert, da sie durch den ständig erforderlichen Magnetisierungsstrom und den durch die Verluste im Eisen verursachten Verluststrom überdeckt ist. Um diese Einflüsse möglichst klein zu halten, wählt man bei Spannungswandler für die reellen Wicklungswiderstände kleinere Beträge als bei

Leistungstransformatoren. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist es notwendig, einen Kompromiß zu schließen, in dem die vom Spannungswandler nach seiner Genauigkeitsklasse noch zugelassenen Betrags- und Winkelfehler verwirklicht werden können.

3.1.6.4 Spannungsteiler

Beim einfachen Spannungsteiler nach *Bild 3.17* folgt die Leerlaufspannung U_1 dem Widerstandsverhältnis $R_2/(R_1+R_2)$ linear. Da sich bei einer Verstellung des Abgriffs jedoch gleichzeitig der Innenwiderstand R_i ändert, ergibt sich im Belastungsfall ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen $R_2/(R_1+R_2)$ und U_2. Meßspannungsteiler sind deshalb in der Regel für den Leerlauf kalibriert.

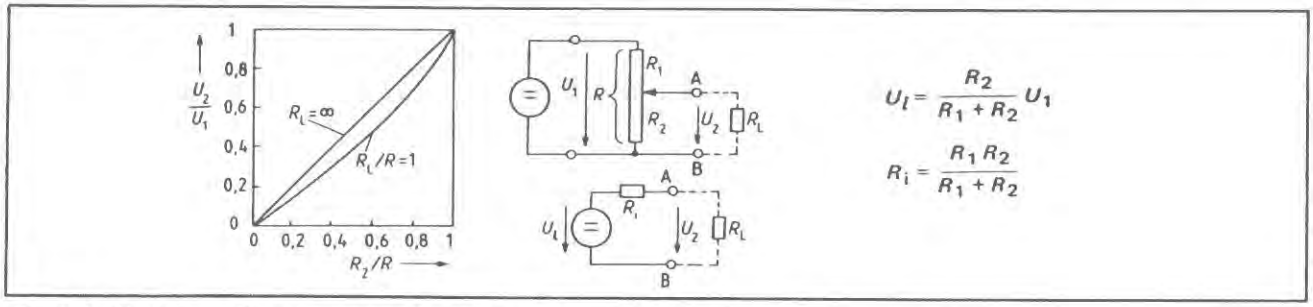


Bild 3.17 *Spannungsteiler-Grundschaltung*

Bei Spannungsteilern ist sorgfältig auf die höchstzulässige Eingangsspannung und den höchszulässigen Belastungsstrom zu achten. Besonders gefährdet ist ein Spannungsteiler in der Nähe der oberen Endstellung ($U_2 \sim U_1$; $R_1 \dashrightarrow 0$). Ein Kurzschluß des Ausgangsklemmenpaares führt hier in der Regel zur Zerstörung des Gerätes!

Für die Messung hoher Gleichspannungen werden Spannungsteiler verwendet, die aus Einzelwiderständen aufgebaut sind. Jeder dieser Einzelwiderstände ist meist mit einem Schirm versehen, dessen Potential durch das mittlere Potential des Widerstandes festgelegt wird. Als Einzelwiderstände werden häufig Schichtwiderstände benutzt (hohe Widerstandsbeträge). Die Belastbarkeit eines solchen Spannungsteilers bestimmt sich auch hier aus seinem Querstrom. Die Verwendung von besonderen Vorwiderständen in der Hochspannungstechnik ist nicht üblich, da in diesem Fall bei einer Leitungsunterbrechung am Ausgang die volle Spannung liegt.

Soll der Spannungsteiler für Gleich- und Wechselspannung verwendet werden, so ist zu berücksichtigen, daß die Beträge der Streukapazitäten durch die Schirmung auf konstante Beträge gebracht werden und zu gleichen Zeitkonstanten für alle Elemente führen, um die Frequenzunabhängigkeit des Teilverhältnisses zu gewährleisten.

3.1.7 Meßverstärker

Meßverstärker dienen zur Anhebung kleiner Spannungs- und Stromsignale auf einen höheren, meßtechnisch einfach auszuwertenden Signalpegel. Sie dienen aber auch zur Realisierung eines möglichst hohen Eingangwiderstandes bei einer Spannungsmessung oder eines möglichst geringen Eingangswiderstandes bei einer Strommessung.

Oft sind Meßverstärker Teil des Meßgeräts wie z. B. bei Voltmetern und Elektronenstrahloszilloskopen. Sie werden nach üblichen Prinzipien der Verstärkertechnik aufgebaut. Besondere Anforderungen können hinsichtlich des Fremdspannungsabstandes, der Bandbreite, der Konstanz und der stufenweisen Einstellbarkeit der Verstärkung sowie bezüglich der nichtlinearen Verzerrungen bestehen.

Bei der Anwendung des Meßverstärkers ist darauf zu achten, daß er nur in einem endlich großen Aussteuerbereich linear arbeitet. Es dürfen bestimmte höchstzulässige Werte für Ausgangsspannung und Ausgangsstrom auch nicht augenblicksweise überschritten werden, wie das bei der Übertragung zeitabhängiger Signale leicht geschehen kann. Dadurch könnte es zu Übersteuerungs- und Begrenzungserscheinungen kommen, deren Folge grobe Meßfehler wären.

Weiters hängen die zulässigen Aussteuergrenzen oft noch wesentlich von der Frequenz oder der Impulsform der zu übertragenden Signale ab. Aus diesem Grund wird das Verstärkerausgangssignal mit Hilfe eines Oszilloskops auch überprüft.

3.1.7.1 Gleichspannungsverstärker

Gleichspannungsverstärker übertragen Gleichsignale sowie Wechselsignale bis zu einer bestimmten oberen Grenzfrequenz, die bei jedem Meßverstärker stets in den Herstellerangaben enthalten sind. Beim Gleichspannungsverstärker ist die Bandbreite identisch mit der oberen Grenzfrequenz.

Diese Grenzfrequenz kann definiert werden als die Frequenz, bei der Verstärkungsfehler 1 % überschreiten, oder als die Frequenz, bei der die Verstärkung um 3 dB gegenüber ihrem Wert bei Gleichsignalen abgefallen ist, d. h. auf den $\sqrt{2}$ - ten Teil des ursprünglichen Wertes.

R_C ... Kollektorwiderstand

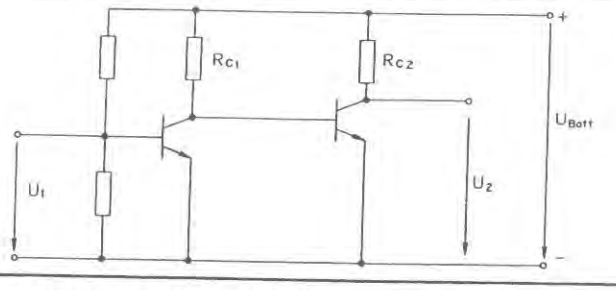


Bild 3.18 *Zweistufiger Gleichspannungsverstärker (npn-Transistor)*

3.1.7.2 Wechselspannungsverstärker

Sie werden breitbandig mit Transistoren in RC-Technik aufgebaut. Wechselspannungsverstärker übertragen nur Wechselsignale, deren Frequenz zwischen einer unteren und einer oberen Grenzfrequenz liegen muß, damit die zugehörigen Fehlergrenzen der Verstärkung nicht überschritten werden. Die Differenz zwischen den beiden Grenzfrequenzen nennt man die *Bandbreite [siehe 2.2.6.3.3]* des Verstärkers.

Die *Kopplungskondensatoren* bestimmen die untere Frequenzgrenze und verursachen lineare Verzerrungen, insbesondere bei der Verstärkung von Einzelvorgängen (z. B. Impulsen). Die Verstärkung kann durch Gegenkopplung über eine oder mehrere Stufen stabilisiert werden. Häufig enthalten Voltmeter einen speziellen Ausgang und lassen sich auch als Meßverstärker für das Nieder- und Mittelfrequenzgebiet verwenden.

C_K ... Kopplungskondensator

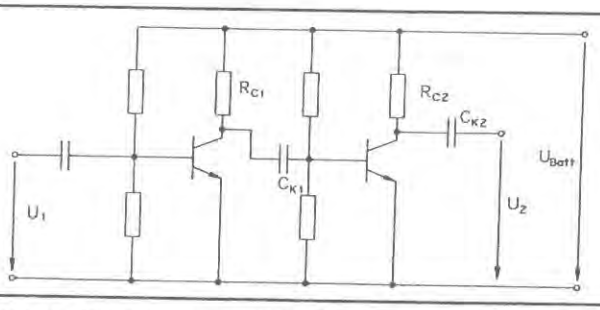


Bild 3.19 *Zweistufiger Wechselspannungsverstärker mit npn Transistoren in Emitterschaltung*

3.1.7.3 Meßverstärker für Gleich- und Wechselspannungen

Vorzugsweise für Elektronenstrahloszilloskope und Analogrechner werden breitbandige Meßvertärker benötigt, die Gleich- und Wechselspannungen gleichermaßen verstärken sollen und deshalb keine Kondensatoren im Übertragungsweg aufweisen dürfen. Die eingesetzten Schaltungen für Transistorverstärker verwenden *Zener-Dioden* als Kopplungsglieder.

3.1.7.4 Mehrstufige Verstärker

Erreicht man in einer einzigen Stufe keine ausreichende Verstärkung, so läßt man mehrere Verstärkerstufen aufeinanderfolgen (siehe *Bild 3.18* und *3.19*). Hierbei bevorzugt man schon bei reinen Wechselspannungsverstärkern eine Gleichspannungskopplung zwischen den einzelnen Stufen, um die meist räumlich großen Koppelkondensatoren und vor allem die großen Zeitkonstanten zu vermeiden, die nach Übersteuerung zu lang dauernden Einschwingvorgängen führen. Damit das Kollektorpotential nicht von Stufe zu Stufe immer weiter ansteigt, läßt man vielfach npn- und pnp-Transistoren miteinander abwechseln. Im allgemeinen sind derartige Schaltungen, sofern es sich um Wechselspannungsverstärker handelt, auch noch daraufhin durchdacht, daß eine über alle Stufen gemeinsam wirkende Arbeitspunktstabilisierung zustande kommt.

Temperaturänderungen wirken sich in erster Näherung bei den in den *Bildern 3.18* und *3.19* dargestellten zweistufigen Verstärkern auf beide Transistoren gleich aus.
Bei kritischen Anwendungsfällen müssen beide Transistoren möglichst im gleichen technologischen Arbeitsgang hergestellt werden (um eine besondere Qualität der Temperaturkompensation zu erreichen), als sogenannte "*Doppeltransistoren*" oder "*Dualtransistoren*" oder im Rahmen der *Technik monolithisch integrierter Schaltungen.*

Viele Standardschaltungen sind heute in Form monolithisch integrierter Schaltungen verfügbar. Die Entwicklung einer elektronischen Schaltung zur Lösung einer speziellen meßtechnischen Aufgabe beginnt heute vielfach damit, Kataloge von Halbleiterherstellern durchzusehen, inwieweit es bereits realisierte Teil- oder Gesamtlösungen gibt.

3.1.8 Meßumsetzer

Meßumsetzer setzen Meßsignale in eine andere Signalstruktur um. Am häufigsten kommt die Umsetzung analoger Signale (bei denen jeder beliebige Zwischenwert auftreten kann) in digitale Darstellungsformen vor (bei denen nur diskrete Zahlenwerte möglich sind), sowie der umgekehrte Umsetzungsweg. Für die weitere Datenverarbeitung ist die digitale Darstellungsweise besser geeignet.
Die innere elektronische Wirkungsweise von D/A-Umsetzern und A/D-Umsetzern wird in den *Abschnitten 3.4.5.1* und *3.4.5.2* beschrieben.

3.1.9 Meßumformer

Der Meßumformer ist eine Einrichtung, die eine elektrische oder nichtelektrische Eingangsgröße in eine damit eindeutig zusammenhängende elektrische Ausgangsgröße umformt. Es wird in der Regel eine Proportionalität zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße angestrebt.

Ein *Strommeßwiderstand* kann im Sinne dieser Definition bereits als Meßumformer aufgefaßt werden. Die Eingangsgröße ist der zu messende Strom I, der einem Millivoltmeter zugeführte Spannungsabfall U die Ausgangsgröße.
Für niederfrequente Wechselströme kann ein Meßgleichrichter *[siehe 3.2.1.2]* als Umformer eingesetzt werden. Der Ausschlag eines nachgeschalteten Drehspulmeßwerks ist dann proportional zum Gleichrichtwert des Wechselstromes.

Ein Meßumformer muß nicht in jedem Fall von der Größenordnung eines Bauelementes sein. Je nach Aufgabenstellung kann es sich hierbei auch um ein Gerät mit beträchtlichem schaltungstechnischem Aufwand handeln.

3.1.10 Filter

Filter haben die Aufgabe, Messignale nach Frequenzbereichen zu selektieren. Beispielsweise übertragen *Hochpaßfilter* hohe Frequenzen und sperren tiefe Frequenzen einschließlich Gleichsignale. Sie werden durch eine Grenzfrequenz sowie durch eine Angabe über den

Verlauf ihrer Übertragungsfunktion charakterisiert.

Passive Filter sind im wesentlichen aus Induktivitäten und Kapazitäten aufgebaut. Bei der Benutzung passiver Filter ist zu beachten, daß ihre Übertragungscharakteristik nur dann den Herstellerangaben entspricht, wenn das Filter eingangs- und ausgangsseitig mit einem bestimmten, vorgeschriebenen Nennwiderstand R_N abgeschlossen ist (*Bild 3.20 a*).

Aktive Filter enthalten Verstärker meist Operationsverstärker, Widerstände und Kapazitäten (*Bild 3.20 b*). Sie haben meist einen sehr hohen Eingangswiderstand und ausgangsseitig einen sehr kleinen Innenwiderstand, d. h. ihre Übertragungscharakteristik ist unabhängig von den äußeren Abschlußbedingungen. Sie sind wie Verstärker zu behandeln, damit ist auf ihren nur endlich großen Aussteuerbereich zu achten.

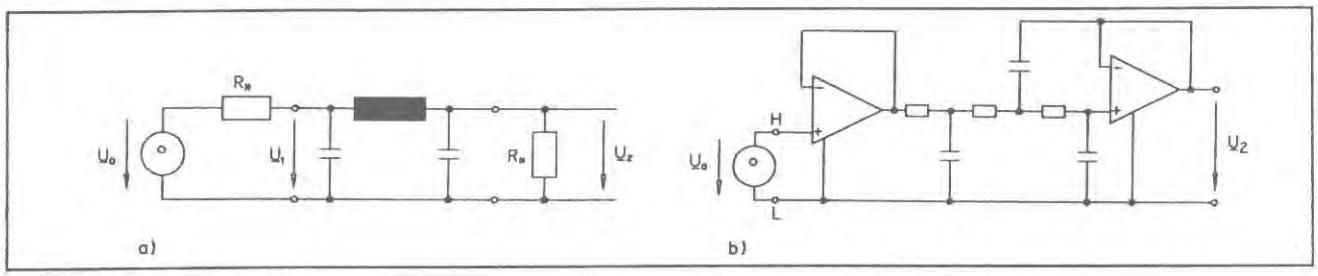


Bild 3.20 a) *Passives Filter*
b) *Aktives Filter*

3.1.11 Störeinflüsse und ihre Ausschaltung

3.1.11.1 Temperatur

Die Materialien ändern ihre elektrischen, magnetischen und mechanischen Eigenschaften mit der Temperatur. Das gilt für die Widerstände aller Leiterwerkstoffe, ganz besonders für die Halbleiter, für die Drehmomente der Spiralfedern oder der Aufhängebänder der beweglichen Organe, sowie für die magnetischen Werkstoffe und die aus ihnen aufgebauten magnetischen Kreise. Aus dem Zusammenwirken der thermischen Verhaltensweise aller die Anzeige beeinflussenden Elemente eines Meßgerätes und seiner Schaltung ergibt sich der Temperatureinfluß, der bestimmte Normwerte nicht überschreiten darf.

3.1.11.2 Schirmung

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Verminderung des Einflusses äußerer magnetischer oder elektrischer Felder auf die Meßwertbildung ist die Schirmung. Sie ist dort notwendig, wo die zur Bildung der Meßgröße im Meßgerät auftretenden elektrischen und magnetischen Felder in der Größenordnung der durch die Nähe elektrischer Anlagen oder auf natürlichem Wege zu erwartenden gleichartigen Felder liegen. Dabei spielt auch die durch die Umgebung verursachte Kapazitätsänderung (Handkapazität) eine besondere Rolle.

Schirmung elektrischer Felder setzt eine elektrisch leitende, für äußere elektrische Felder undurchlässige Hülle voraus, die alle Elemente und gegebenenfalls auch Schalter des Meßgerätes umgibt. Sie wird auf Erd- oder Massepotential gelegt, wodurch die Streukapazitäten aller störanfälligen Elemente der Meßschaltung untereinander und von außen unbeeinflußbar festgelegt werden. Die Schirmung kann z. B. durch ein im Inneren metallisiertes Isolierstoffgehäuse erreicht werden. Solche Schirme vergrößern in der Regel Streukapazitäten der Schaltung.

Für die *magnetische Schirmung* gelten grundsätzlich die gleichen Bedingungen wie für die elektrische Schirmung. Die Anwendung hochpermeabler ferromagnetischer Werkstoffe im magnetischen Kreis des Meßgerätes führt jedoch in den meisten Fällen zu einer Eigenschirmung und vergrößert die Beträge der magnetischen Feldgrößen im Meßgerät so, daß sie aus dem störenden Einflußbereich äußerer Felder rücken.

3.1.11.3 Astasierung

Häufiger als die Schirmung wird bei eisenlosen Meßwerken der astatische Aufbau für die Beseitigung störender äußerer magnetischer Felder und ihrer Einflüsse auf die Meßwertbildung angewendet. Dazu werden zwei gleiche Meßwerke verwendet, deren bewegliche Organe auf einer gemeinsamen Achse sitzen, aber um 180 Grad versetzt sind.

Dadurch wird erreicht, daß die durch ein Fremdfeld hervorgerufenen Zusatzdrehmomente in einem Fall das Meßdrehmoment vergrößern und es im anderen Fall betragsgleich vermindern. Unter diesen Verhältnissen

bleibt das Gesamtdrehmoment unverändert, vorausgesetzt, daß das Störfeld im Bereich des Meßgerätes homogen ist, was in den meisten Fällen in hinreichendem Maße gewährleistet ist.

3.2 ELEKTRISCHE MESSVERFAHREN

3.2.1 Gleichrichterschaltungen

3.2.1.1 Halbleitergleichrichter

Der Halbleitergleichrichter nimmt in der Technik elektrischer Meßinstrumente und Meßgeräte einen außerordentlich breiten Raum ein, der praktisch alle Frequenzgebiete der Wechselstromtechnik erfaßt. Seine Vorteile sind geringe Kapazitäten der Strombahnen (ungestörte Anwendung bis zu sehr hohen Frequenzen), geringer Raumbedarf und hohe Verschleißfähigkeit. Die Grundlage für den Aufbau der Halbleitergleichrichter liefern *Germanium* und *Silizium*.

Die Sperrspannung liegt für Germaniumgleichrichter bei 50 bis 100 V und für Siliziumgleichrichter höher. Die Temperaturempfindlichkeit dieser Bauelemente beschränkt ihre Anwendbarkeit auf Temperaturen bis maximal 60° C, für Germanium bis maximal 75° C und für Silizium bis 125° C. Hinsichtlich des Frequenzverhaltens ist die Germanium-Diode der Silizium-Diode überlegen. Die Anwendung der Gleichrichter für die Direktanzeige mit Drehspulinstrumenten ist gegenwärtig mit serienmäßig hergestellten Instrumenten bis zu einer Frequenz von 300 MHz möglich. Solche Meßeinrichtungen werden mit Tastkopf und kapazitivem Spannungsteiler ausgeführt. Auch die GaAs-Dioden werden immer breiter eingesetzt.
Die Grenzfrequenzen der wesentlichen Halbleitermaterialien, bezogen auf eine Basisdicke von 1 µm und einer Temperatur von 20° C, sind in *Tabelle 3.2* angegeben.

Halbleitermaterial	Grenzfrequenz MHz
GaAs	1300
Ge	1000
InP	500
Si	150

Tabelle 3.2 *Grenzfrequenzen einiger Halbleitermaterialien*

3.2.1.2 Meßgleichrichter-Schaltungen

Meßschaltungen mit Gleichrichterdioden können nach den technischen Zielen oder nach den Bedingungen, unter denen die Gleichrichtung erfolgen soll, klassifiziert werden. Danach ist zu unterscheiden zwischen:

(1) der Abwandlung einer Wechselspannung oder eines Wechselstroms in eine quantitativ adäquate Gleichspannung oder einen Gleichstrom;

(2) der Verknüpfung zweier Wechselspannungen verschiedener oder gleicher Frequenz an einem nichtlinearen Widerstand, dem Modulator, zu einem Strom, der nichtharmonische Komponenten enthält;

(3) der Regelung oder Stabilisierung elektrischer Zustände unter Nutzung nichtlinearer Widerstandseigenschaften von Halbleiterdioden.

Nach dem zweiten Gesichtspunkt ist zu unterscheiden zwischen:

(1) Einweg- oder Zweiweggleichrichterschaltungen;
(2) Mittelwert-, Effektivwert- und Spitzenwertbildner.

Im Bild 3.21 sind verwendete Gleichrichterschaltungen dargestellt.

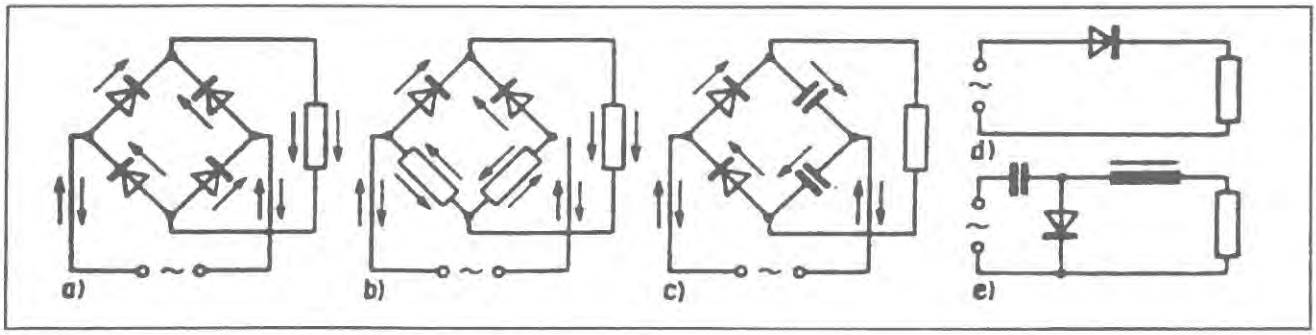


Bild 3.21 a) *Graetz-Schaltung*
b) *abgewandelte Graetz-Schaltung nach Pfannen-Müller*
c) *Spannungsverdopplungsschaltung nach Greinacher*
d) *offene Einweggleichrichterschaltung*
e) *Einweggleichrichter, nach innen geschlossen für Spitzenwerte*

ad Bild 3.21 a)

Graetz-Gleichrichterschaltung:

Doppelwegschaltung mit vier Gleichrichterelementen. Sie hat den Nachteil der Reihenschaltung von jeweils zwei Gleichrichterelementen im Gleichstrommeßkreis, wodurch die Empfindlichkeit vermindert und die Temperaturabhängigkeit gesteigert wird.

ad Bild 3.21 b)

Von Pfannen-Müller modifizierte Graetz-Gleichrichterschaltung:
Sie vermeidet die Nachteile der Graetz-Schaltung, wobei allerdings die Stromempfindlichkeit sinkt. Die in die Gleichrichterschaltung eingebauten Widerstände sind Nebenschlüsse zur Gesamtschaltung und erhöhen den Leistungsbedarf.

ad Bild 3.21 c)

Greinacher-Schaltung:
Zur Verdopplung des Spitzenwertes der Wechselspannung lädt sie die parallel zum Verbraucher liegenden Kondensatoren auf diesen Betrag gleichsinnig auf. Sie hat besondere Bedeutung für die Hochspannungstechnik.

ad Bild 3.21 d)

Einfache Einweggleichrichterschaltung:
Die Meßwertbildung wird hier vom Quellwiderstand der Meßgröße unmittelbar beeinflußt. Die Schaltung ist daher nur bei vorgegebenen konstanten Beträgen für die Meßwertbildung anwendbar.

ad Bild 3.21 e)
Einweggleichrichterschaltung mit äußerem und innerem geschlossenen Gleichstromkreis (Spitzenwertbildner).

Bild 3.22 zeigt den Spannungs- und Stromverlauf für Ein- und Zweiweggleichrichterschaltungen.

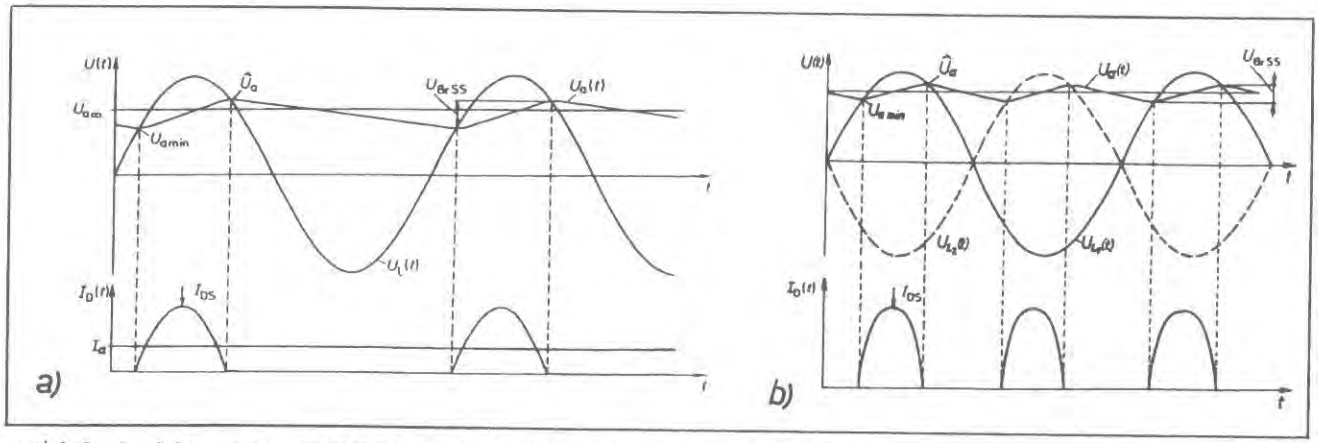


Bild 3.22 *Spannungs- und Stromverlauf bei der*
a) *Einweggleichrichterschaltung*
b) *Zweiweggleichrichterschaltung,*
jeweils mit Ladekondensator

Diese Schaltungen werden in Katalogen von Halbleiterherstellern in integrierter Form angeboten und in vielen Bereichen auch eingesetzt.

3.2.2 Gleichstrommeßbrücken

Legt man zwei Spannungsteiler aus ohmschen Widerständen an eine Speisespannung und verbindet die beiden freibleibenden Punkte dieser Spannungsteiler II und III nach *Bild 3.23*, so erhält man eine Meßbrücke bzw. die **Wheatstone-Brückenschaltung.**

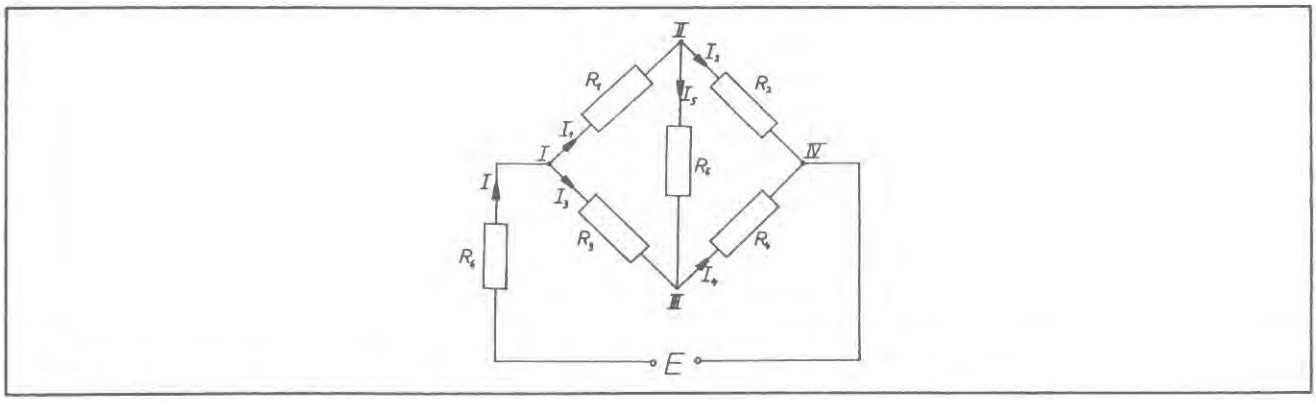


Bild 3.23 *Meßbrücke oder Wheatstone-Brücke*

Meist besteht die Aufgabe, die Widerstände R_1, R_2, R_3, R_4 so zu wählen, daß der Diagonalstrom I_5 verschwindet. Das ist der Fall, wenn die Punkte II und III auf gleichem Potential liegen und die Abgleichbedingung

$$R_1 : R_2 = R_3 : R_4 ; \qquad I_5 = 0$$

erfüllt ist. Die *Empfindlichkeit* der Meßbrücke wird von der Größe des Diagonalstromes bei geringen Abweichungen von der obigen Bedingung bestimmt.

Mit Gleichstrommeßbrücken lassen sich Widerstände, Zeitkonstanten und andere Größen, wie Temperatur, Druck, Längenänderung usw., als mittelbare Meßgrößen bestimmen, wenn der Meßwiderstand von diesen abhängig ist. Als Ausschlagbrücke, d. h. im nichtabgeglichenen Zustand, dient sie zur direkten Anzeige von Widerständen mit Hilfe eines in die Brückendiagonale eingeschalteten Meßinstruments.

Die Wheatstone-Brücke dient dem unmittelbaren Widerstandsvergleich. Die mit ihr erreichbare Genauigkeit wird von der Genauigkeit der Vergleichsnormale und der Empfindlichkeit des Nullindikators im Diagonalzweig der Brücke bestimmt. Die Empfindlichkeit ist so zu wählen, daß die kleinste Veränderung des Normalwiderstandes eine noch erkennbare Veränderung der Anzeige des Nullindikators hervorruft. Mit zunehmender Genauigkeit der Meßbrücke muß die Empfindlichkeit des Nullindikators wachsen. Die größte Genauigkeit technischer Meßbrücken liegt bei 0,00001, ihr Meßbereichsumfang zwischen 1 Ohm und 100.000 Ohm.

3.2.3 Wechselstrommeßbrücken

Wechselstrombrücken können zur Bestimmung von Widerständen, Induktivitäten, Kapazitäten, Verlustwinkeln, Frequenzen u.a.m. verwendet werden. Sie müssen nach Betrag und Phase abgeglichen werden. Bei Wechselspannung gilt die in *Abschnitt 3.2.2* genannte Abgleichbedingung sinngemäß für die komplexen Widerstände Z der Brücke. Mit $Z = R + j \cdot X$ zerfällt sie in zwei Bedingungen:

$$R_2 \cdot R_3 - X_2 \cdot X_3 = R_1 \cdot R_4 - X_1 \cdot X_4$$
$$R_2 \cdot X_3 + R_3 \cdot X_2 = R_1 \cdot X_4 - R_4 \cdot X_1$$

Daraus ergeben sich drei Möglichkeiten für den Brückenabgleich:

1. Veränderung von zwei Brückenelementen,
2. Veränderung eines Brückenelements,
3. Abgleich nicht möglich.

Im **Fall 1** kann der Brückenabgleich je nach Wahl der Abgleichelemente konvergieren oder divergieren. Die Divergenz der Brücke und damit die praktische Undurchführbarkeit des Abgleichs tritt dann ein, wenn der Einfluß jedes Abgleichelements beide Komponenten der komplexen Diagonalspannung gleichermaßen erfaßt. Hier müssen die Widerstandswerte beider Abgleichelemente in beiden Abgleichbedingungen enthalten sein.

Im **Fall 2** ist eine der beiden Abgleichbedingungen immer erfüllt.

Der **Fall 3** tritt dann auf, wenn kein Betriebsfall hergestellt werden kann, der die Diagonalspannung verschwinden läßt. Hier kann man einen phasenabhängigen Nullindikator, wobei gegebenenfalls Verstärker vorgeschaltet werden, verwenden. Damit ist ein Pseudoabgleich herstellbar, der dadurch gekennzeichnet ist, daß die Diagonalspannung als Meßgröße und die Brückeneingangsspannung als Bezugsgröße senkrecht aufeinander stehen.

Als Nullindikatoren können Elektronenstrahloszilloskope oder Kopfhörer im Hörbereich verwendet werden.

Die Messung von Induktivitäten erfolgt meist mit Hilfe von Induktivitätsmeßbrücken. In der Meßtechnik verwendete Modifikationen zeigt *Bild 3.24.*

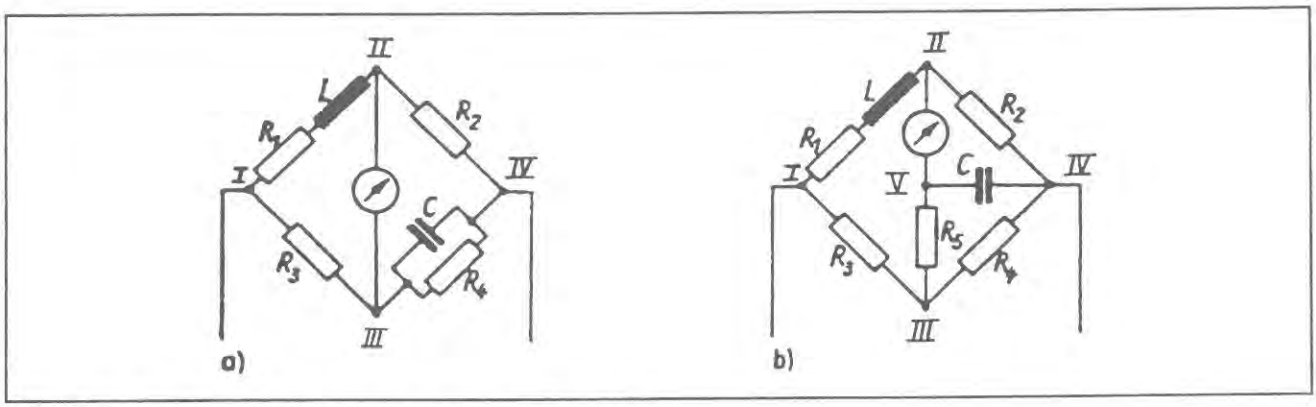


Bild 3.24 *Induktivitätsmeßbrücken*
a) *Maxwell-Wien-Brücke*
b) *Anderson-Brücke*

Die Abgleichbedingungen für die Schaltung nach a) lauten:

Abgleich nach Betrag: $R_1 = R_2 \cdot R_3 / R_4$
Abgleich nach Phase: $L = R_2 \cdot R_3 \cdot C$

Es empfiehlt sich, als Abgleichelement R_4 und C zu benutzen, da diese in beiden Bedingungen unabhängig voneinander sind und damit die Konvergenz und Schnelligkeit des Abgleichs begünstigen.

Für die Modifikation nach b) lauten die Abgleichbedingungen:

Abgleich nach Betrag: $R_1 = R_2 \cdot R_3 / R_4$
Abgleich nach Phase: $L = C \cdot [R_5 \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_4]$

Verwendet man den Widerstand R_5 für den Abgleich, dann muß L/C immer größer als $R_1 \cdot R_4$ sein, weil der Ausdruck $R_5 \cdot (R_1 + R_2)$ keine negativen Beträge annehmen kann.

3.3 ELEKTRONISCHE HILFSMITTEL

3.3.1 Halbleiterdioden

3.3.1.1 Dioden für Gleichrichterzwecke

Eine Diode ist das einfachste Halbleiterbauelement und besteht aus zwei Zonen, die unterschiedlich dotiert sind. Die beiden Zonen haben je einen Anschluß, die Kathode ist mit der n-dotierten Zone verbunden, die Anode mit der p-dotierten. Als Grundmaterial kann für die Diode Si, Ge, Cu_2O oder Se verwendet werden.

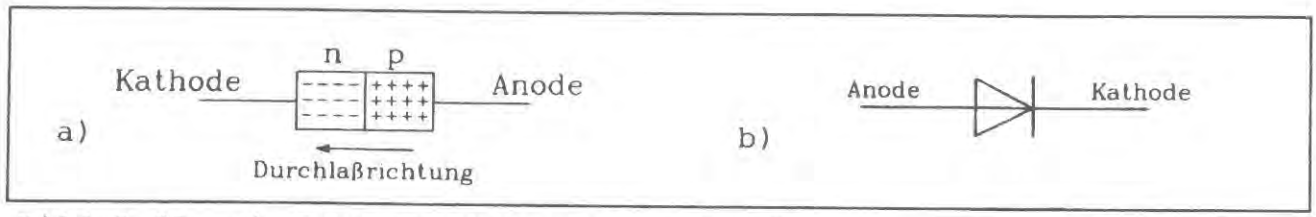


Bild 3.25 a) *Innerer Aufbau einer Diode*
b) *Schaltsymbol eine Diode*

Die Dioden weisen eine nichtlineare Kennlinie auf, die den Strom bevorzugt in eine Richtung, nämlich von der Anode A zur Kathode K, durch Anlegen einer positiven Spannung $U_{AK} > 0$ fließen lassen. Der Stromfluß in Durchlaßrichtung beginnt erst ab einem bestimmten Spannungsschwellwert, der *Schleusenspannung* U_S (bei Germanium ~ 0,4 V; bei Silizium ~ 0,7 V).
Bei weiterer Spannungserhöhung steigt der Strom rasch auf sehr hohe Werte an. Ein bestimmter Maximalwert I_{max} darf nicht überschritten werden, da die Diode sonst thermisch zerstört wird. Für die thermische Belastung ist also der Diodenstrom (in Durchlaßrichtung) maßgebend.

Bei Steigerung der Spannung in Sperrichtung $U_{AK} < 0$ nimmt zunächst der Sperrstrom langsam zu, (wobei der Sperrstrom um einige Zehnerpotenzen kleiner ist als der Durchlaßstrom und liegt z.B. für Si-Dioden im Bereich von 10 bis 100 nA) bis bei einer bestimmten Durchbruchspannug der Strom stark ansteigt. Dies führt ebenfalls zur Zerstörung der Diode.

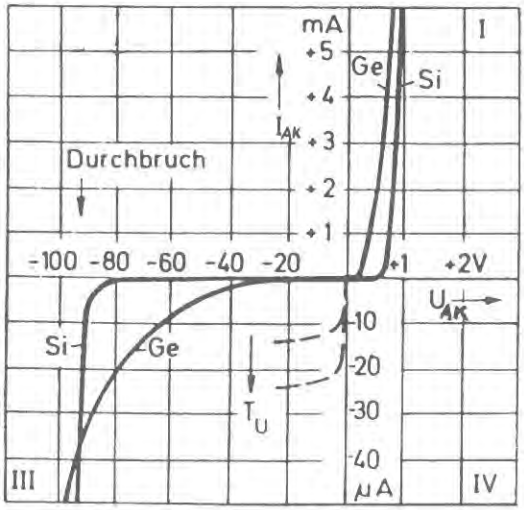


Bild 3.26
Kennlinien von Dioden

Liegt die Diode an einer Wechselspannung, so ist sie aufgrund der obigen Merkmale während der positiven Halbwelle für den Strom durchlässig und unterdrückt ihn während der in die Sperrichtung fallenden Halbwelle. Dadurch entsteht ein pulsierender Gleichstrom.

Si-Dioden weisen einen besonders geringen Durchlaßwiderstand auf und können so bis zu etlichen 100 A Durchlaßstrom gebaut werden, bei Spannungen bis in den kV-Bereich (~1200 kV). Dadurch werden Si-Dioden vorwiegend für Gleichrichterschaltungen verwendet, wogegen **Ge-Dioden** in der Hochfrequenztechnik eingesetzt werden.

3.3.1.2 Lichtemissionsdioden

Lichtemissionsdioden (**LED**, *light emitting diodes*) bestehen aus GaAs, (Ga, Al)As und GaAs-(Ga, Al)As-Heterostrukturen und emittieren Licht im Bereich des nahen Infrarot (Wellenlänge 0,8 bis 0,95 µm). Sie zeichnen sich durch

- hohe Zuverlässigkeit,
- kleine Abmessungen,
- leichte Modulierbarkeit und
- hohe Strahldichte

(im Vergleich zu anderen inkohärenten Lichtquellen) aus.
Lichtemissionsdioden sind in unterschiedlichen Gehäuseformen mit einem breiten Spektrum der Betriebsdaten käuflich. Sie werden verwendet als Signallämpchen, Lichtquelle für Lichtschranken, optoelektrische Kopplung, Ziffern- und Buchstabenanzeige. Die üblichen LED-Bauformen zeigt *Bild 3.27*.

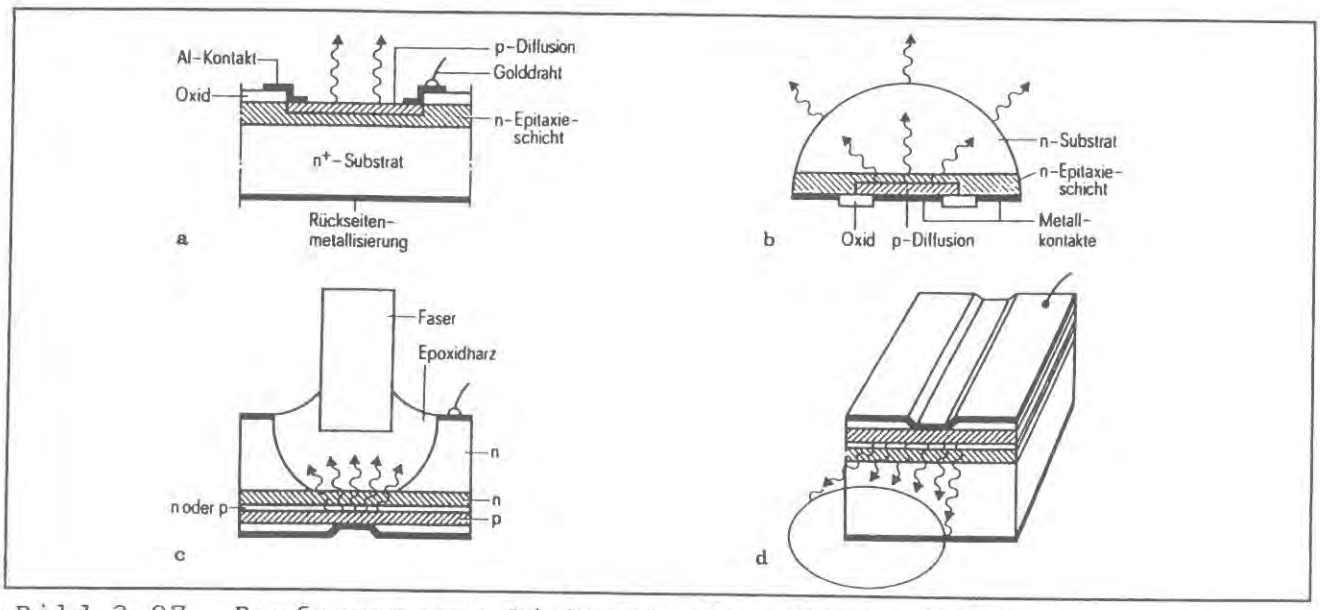


Bild 3.27 *Bauformen von Lichtemissionsdioden (LED)*
a) *Flächenemitter*
b) *LED mit Domstruktur*
c) *Burrus-Diode*
d) *Kantenemitter*

ad Bild 3.27 a)
Beim einfachen Flächenemitter kann nur ein Bruchteil von wenigen Prozent der erzeugten Strahlung die Kristalloberfläche verlassen, der Rest wird durch Totalreflexion in den Kristall zurückgeworfen.

ad Bild 3.27 b)
Durch die Domstruktur lassen sich diese Verluste vermeiden.

ad Bild 3.27 c)
Die Burrus-Diode hat besonders hohe Strahldichte und ermöglicht daher mit Hilfe geeigneter Linsen eine effektive Einkopplung in Glasfasern.

ad Bild 3.27 d)
Ähnlich liegen die Verhältnisse beim Kantenemitter. Dort ist die Feldverteilung allerdings nicht rotationssymetrisch.

3.3.1.3 Laserdioden

Wird bei einer Diode, die entsprechend *Bild 3.27 d)* aufgebaut ist, der Strom erhöht, so tritt oberhalb einer bestimmten Schwelle neben der spontanen Emission induzierte Emission auf. Ihre Kennzeichen sind das Ansteigen des Wirkungsgrades der Emission und eine schmale Linie auf dem breiten Emissionsspektrum. Sind die beiden Endflächen

des Kristalls parallel, so bilden sie einen optischen Resonator, der das in seinem Inneren erzeugte Licht zurückkoppelt. Durch diese Rückkopplung und induzierte Emission entsteht *Laseremission*.

Heute sind verschiedene Strukturen bekannt, die eine Einengung des elektrisch und optisch wirksamen Volumens bewirken. Dadurch konnte die Schwellstromdichte so weit gesenkt werden, daß Laserbetrieb bei Zimmertemperatur möglich ist. Die Alterungseigenschaften dieser Dioden sind so gut, daß sie sich für den technischen Einsatz eignen. Das Spektrum und die Winkelverteilung der Strahlung sind enger als bei Lichtemissionsdioden und hängen von der speziellen Diodenstruktur ab.

3.3.1.4 Zener-Dioden

Zener-Dioden sind speziell so ausgelegt, daß der sehr steile Stromanstieg in Sperrichtung als Arbeitsbereich genutzt wird. Bei diesen Dioden ist der Spannungsdurchbruch in Sperrichtung gewollt und wird *Durchbruch-* oder *Zener-Spannung* U_Z bezeichnet. Sie liegt je nach Diodentyp durch Änderung der Dotierungsstärke bei 1,5 bis 200 V und wird von den Herstellern mit Standardwerten der Normreihe E24 angeboten. In Durchlaßrichtung verhält sich eine Zener-Diode wie eine normale Diode.

Ihre *Strom-Spannungs-Kennlinie* (*Bild 3.28 b*) läßt einen spontanen Stromanstieg bei nur kleiner Spannungserhöhung in Sperrichtung erkennen, d.h. der differentielle Widerstand ist klein und liegt bei 10 bis 100 Ohm.

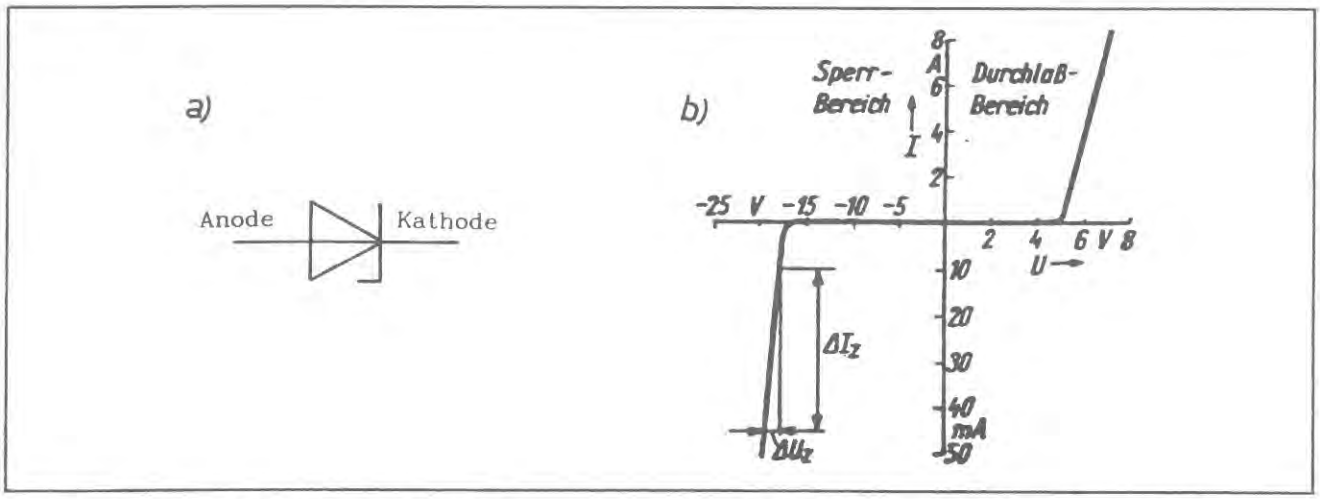


Bild 3.28 a) *Schaltsymbol* b) *Kennlinie einer Si-Leistungs-Zener-Diode*

Für die Lösung technischer Aufgaben ist mit Hilfe von Zener-Dioden die Erzeugung stabilisierter Gleichspannungen hoher Konstanz möglich.

Die Anwendung von Zener-Dioden erfolgt mit Hilfe von Brückenschaltungen, etwa nach *Bild 3.29*, die in Form von integrierten Schaltungen Einsatz finden.

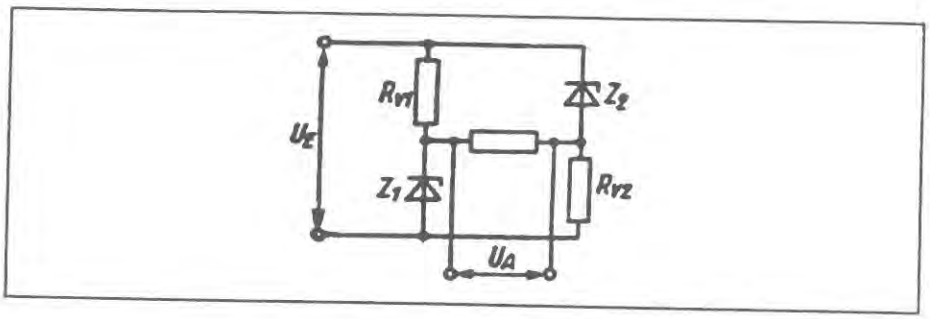


Bild 3.29
Brückenschaltung zur Spannungsstabilisierung mittels Zener-Diode

3.3.2 Transistoren

Transistoren sind stromverstärkende Halbleiterbauelemente, die man zum Schalten und Verstärken eines Signals einsetzen kann. Als Halbleitermaterial wird Silizium, Germanium und Galliumarsenid verwendet. Man unterscheidet nach dem Funktionsprinzip zwischen *bipolaren Transistoren* und *Feldeffekttransistoren*.

3.3.2.1 Bipolartransistoren

Ein bipolarer Transistor besteht aus drei unterschiedlich dotierten Schichten mit zwei pn-Übergängen (*Bild 3.30*), wobei sich die drei Schichten in zwei verschiedenen Kombinationen verbinden lassen. Man erhält dadurch npn- und pnp-Transistoren. Die drei Zonen besitzen je einen Anschluß nach außen und werden als *Emitter*, *Basis* und *Kollektor* bezeichnet.

Einen Transistor kann man sich formal auch als Zusammenschaltung von zwei Dioden vorstellen, wobei man sich einen Überblick über die Sperr- und Durchlaßrichtungen machen kann. Normalerweise betreibt man den Transistor so, daß die Basis-Emitter-Diode in Durchlaßrichtung geschaltet ist, die Kollektor-Basis-Diode in Sperrichtung.

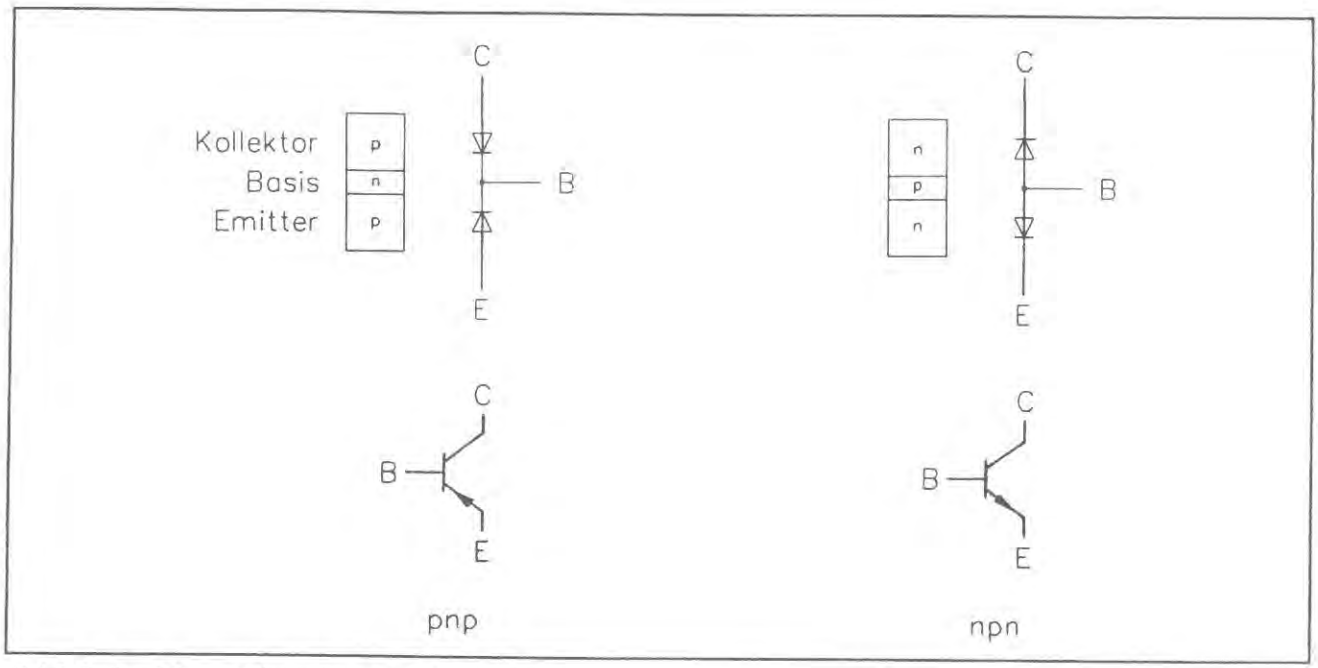


Bild 3.30 *Bipolartransistor*
a) *Interner Aufbau*
b) *Schaltsymbol*

Die *charakteristische Eigenschaft* eines Transistors ist nun, daß zwischen Kollektor und Emitter ein Strom fließt, der ein Vielfaches des Basisstroms beträgt und durch diesen gesteuert wird. Mit Hilfe des sehr kleinen Basisstroms (bzw. Steuerstroms von 10^{-6} bis 10^{-3} A) lassen sich Durchgangsströme bis in den Amperebereich steuern.

Diese Fähigkeit erklärt die Bedeutung des Transistors als Verstärkerelement in der Analogtechnik. In der digitalen Steuertechnik wird der Transistor als zeitlos arbeitender Schalter benutzt, der nur zwei Schaltzustände kennt: gesperrt und geöffnet.

3.3.2.2 Feldeffekt-Transistoren (FET)

Zum Unterschied von den bipolaren Transistoren arbeitet der Feldeffekt-Transistor nur mit einer Ladungsträgertype (Elektronen oder Löcher), daher manchmal auch die Bezeichnung *Unipolartransistor*.

Feldeffekt-Transistoren werden nicht durch einen Basisstrom, sondern durch ein elektrisches Feld gesteuert. Das bedingt eine praktisch leistungslose Steuerung, die Eingangsströme liegen im Bereich von

pA. Der FET besitzt ebenso wie der Bipolartransistor drei Anschlüsse: *Source* (Quelle) S, *Drain* (Senke) D und *Gate* G, die den Anschlüssen Emitter, Kollektor und Basis entsprechen.

Man kann zwischen zwei Grundtypen von FETs unterscheiden: den *Sperrschicht-FETs*, bei denen zwischen Gate und dem Source-Drain-Kanal ein sperrender pn-Übergang existiert, und den *IGFETs* (Isolated Gate FET), bei denen die Gate-Elektrode durch eine isolierende Schicht vom Source-Drain-Kanal getrennt ist. Wenn die isolierende Schicht eines IGFETs aus SiO_2 besteht, nennt man diesen auch *MOSFET* (Metal Oxide Semiconductor FET).
Sperrschicht-FETs werden vor allem in analogen integrierten Schaltungen eingesetzt, MOSFETs in digitalen integrierten Schaltungen.

Das *Bild 3.31* zeigt den prinzipiellen Aufbau eines n-Kanal-Sperrschicht-FETs. Die Steuerung erfolgt über die Änderung der Gates-Spannung. Ist diese gleich Null, so leitet der Transistor. Bei abnehmender Gate-Spannung wird der Kanal zwischen Source und Drain immer enger, der Widerstand nimmt zu, bis bei einer bestimmten Spannung der Kanal zur Gänze eingeschnürt ist und der Transistor sperrt.

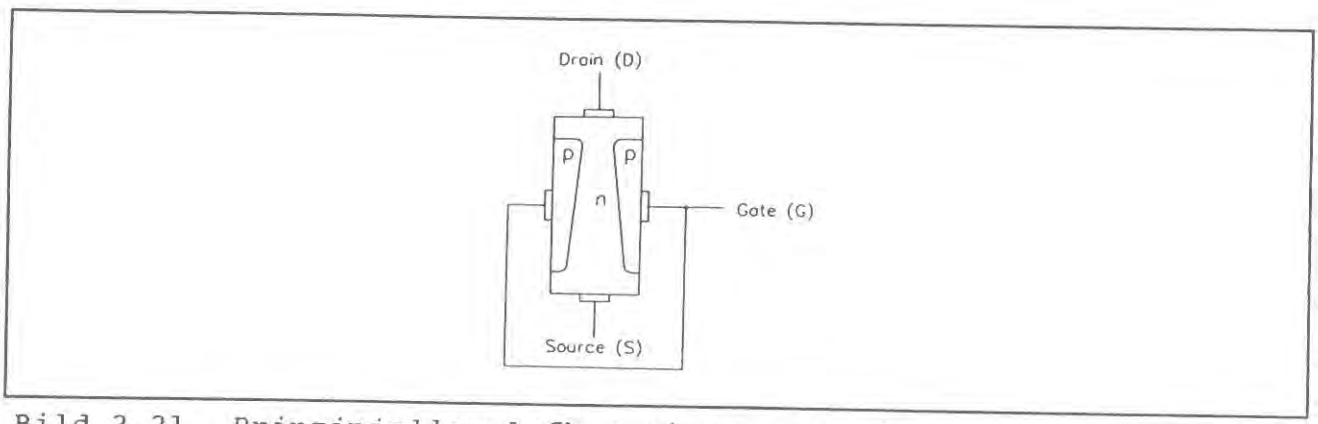


Bild 3.31 *Prinzipieller Aufbau eines n-Kanal-Sperrschicht-FETs*

3.3.3 Spannungsstabilisatoren

Die Gleichspannungsspeisung von elektronischen Schaltungen ebenso wie die von Meßschaltungen erfolgt heute in der Regel durch elektronische Spannungsregler. Es gibt eine große Zahl praktisch angewandter Schaltungen.

Als spannungsstabilisierende Elemente werden vorwiegend Zener-Dioden *[siehe 3.3.1.4]* (10 bis 20 mA), Leistungs-Zener-Dioden (1 bis 10 A) oder Halbleiterregelwiderstände (2 bis 10 mA) verwendet.

AB ... zulässiger Arbeitsbereich

U_m ... mittlere Betriebsspannung

ß .... Steigerungswinkel im Arbeitsbereich

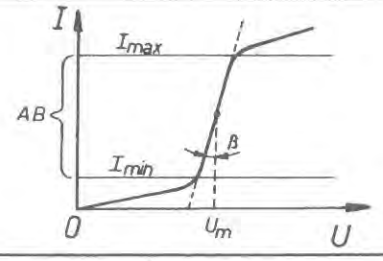


Bild 3.32 *Kennlinie eines Spannungsstabilisierenden Elements*

Höhere Genauigkeiten (0,001 bis 0,0001) lassen sich mit transistorbestückten Regelschaltungen erzielen. Aus einer inkonstanten, ungeregelten Gleichspannung wird mit Hilfe eines Transistors (Stellglied), der als steuerbarer Widerstand dient, die weniger schwankende Ausgangsspannung (Regelgröße) hergestellt. Eine Regelabweichung bewirkt am Eingang des Transistorverstärkers eine Spannung, die eine proportional verstärkte Ausgangsspannung zur Folge hat. Diese steuert ihrerseits den Innenwiderstand des Transistors so, daß er dem angeschlossenen Verbraucher mehr oder weniger Strom liefert, wodurch dessen Betriebsspannung (bis auf die Restregelabweichung) wieder auf den Sollwert gebracht wird.

3.3.4. Stromstabilisatoren

Geregelte Gleichstromstabilisatoren mit Transistoren halten den Strom bei Änderungen sowohl der Speisespannung als auch des Verbraucherwiderstandes konstant. Es werden Genauigkeiten von 0,01 bis 0,001 erreicht.

Da eine Konstantstromquelle einen hohen Innenwiderstand aufweisen soll, läßt sie sich durch eine Transistor-Emitterschaltung einfach realisieren. Bei der Konstantstromquelle nach *Bild 3.33* wird durch den Widerstand R_V und durch die Z-Diode an der Basis eine konstante Basisvorspannung erzeugt.

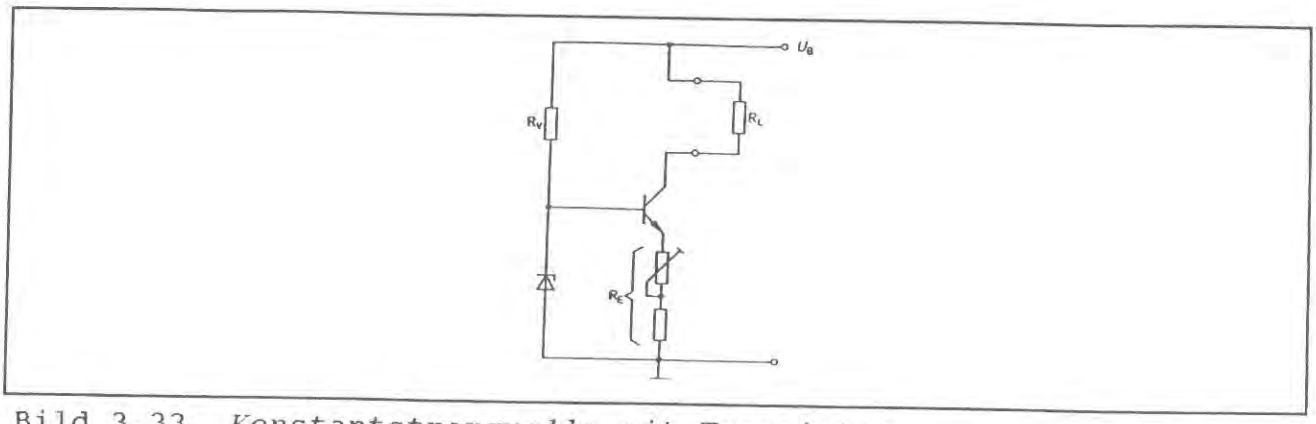


Bild 3.33 *Konstantstromquelle mit Transistor*

Unter der Voraussetzung, daß der Transistor im Arbeitsbereich betrieben wird, stellt sich ein Laststrom ein, für den gilt:

$$I_L = I_C \approx I_E = \frac{U_Z - U_{BE}}{R_E}$$

Der Widerstand R_E bewirkt bei dieser Schaltung eine Stromgegenkopplung. Steigt z. B. der Laststrom an, so steigt auch der Emitterstrom. Dadurch erhöht sich der Spannungsabfall am Emitterwiderstand. Weil die Spannung an der Basis durch die Z-Diode konstant gehalten wird, muß die Basis-Emitter-Spannung U_{BE} kleiner werden. Der Transistor wird hochohmiger, und es fließt ein kleinerer Kollektorstrom und damit auch ein kleinerer Laststrom. Da dieses Wirkungsprinzip umkehrbar ist, wird der Laststrom konstant gehalten. Die Einstellung des konstanten Stromes erfolgt durch den veränderlichen Emitterwiderstand. Eine Konstantstromquelle ist kurzschlußfest, so daß auch $R_L = 0$ Ohm betragen kann.

3.3.5 Geregelte Speisegeräte

Stabilisierte, geregelte Speisegeräte gibt es in verschiedenen Ausführungsformen sowohl für *Konstantspannungs-* als auch für *Konstantstrombetrieb*. Sie enthalten neben der meist sehr ausgefeilten Regelschaltung Gleichrichterschaltungen mit einem Transformator für die Speisung aus dem Wechselstromnetz und werden durch verschiedenen Bedienungskomfort (z. B. Geräte zur Strom- und Spannungsanzeige, elektronischen Überlastungsschutz) ergänzt.

Moderne universelle Ausführungen gestatten sowohl Konstantspannungs- als auch Konstantstrombetrieb mit kurzschlußfester Arbeitskennlinie nach *Bild 3.34*. Wird etwa bei Konstantspannungsbetrieb (Kennlinienteil A) der Strom I so groß, daß er die Überlastgrenze Ü erreicht, so geht der Regler automatisch in den Konstantstrombetrieb (Kennlinienteil B) über und umgekehrt. Beide Kennlinienteile sind getrennt einstellbar, wodurch eine bequeme Anpassung an verschiedene Speisungsaufgaben möglich ist.

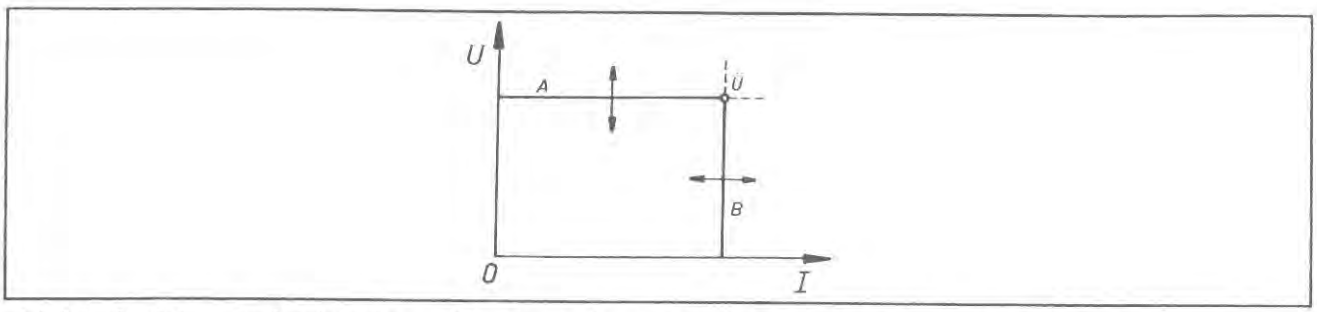


Bild 3.34 *Arbeitskennlinie eines universellen geregelten Speisegerätes*

3.3.6 Mikroprozessoren

In den letzten Jahren ist es gelungen, im Rahmen der **LSI-Technologie** (*large scale integration*) die Zentraleinheit eines Prozeßrechners (*central processor unit*, **CPU**) auf einem einzigen Siliziumkristall unterzubringen. Damit war der Mikroprozessor geschaffen, mit dem eine Vielzahl von Automatisierungsaufgaben sehr kostengünstig gelöst werden kann.

Um die *Blockstruktur eines Mikroprozessors* verstehen zu können, muß man zunächst einen ungefähren Überblick über das Zusammenarbeiten eines Mikroprozessors mit anderen hochintegrierten Bausteinen haben, damit ein kompletter, einsatzbereiter Mikrorechner entsteht.

Das *Bild 3.35* zeigt die prinzipielle Arbeitsweise eines Mikrorechners, der aus vier Komponenten besteht.

-	ROM	Read Only Memory	Nur-Lese-Speicher
-	RAM	Random Access Memory	Schreib-Lese-Speicher
-	PIA	Peripheral Interface Adapter	Ein-Ausgabe-Einheit
-	MPU	Microprocessing Unit	Mikroprozessor

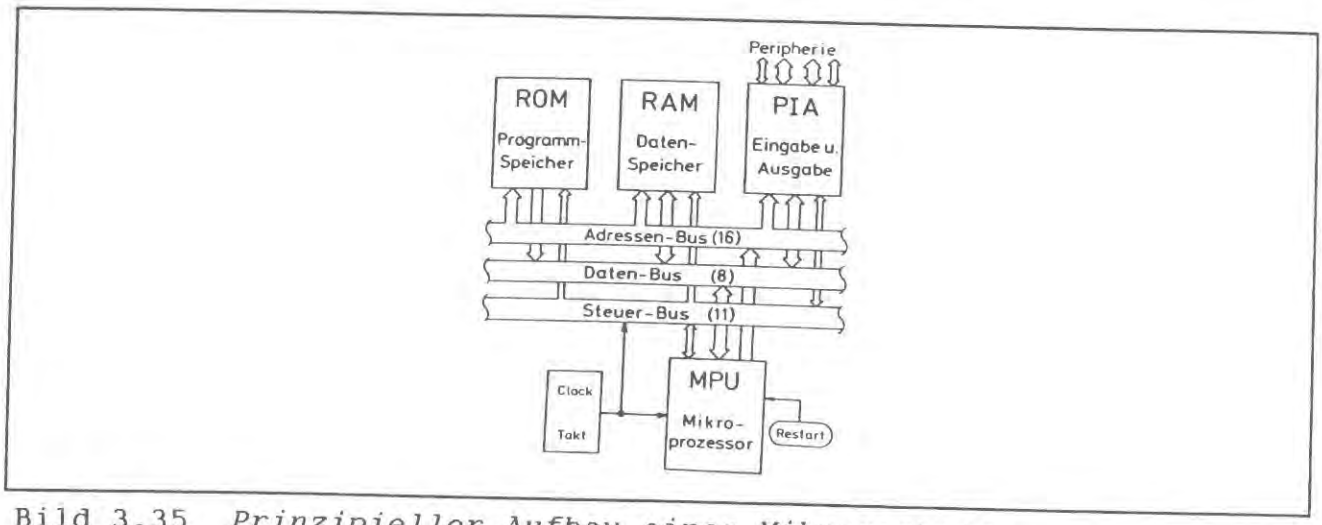


Bild 3.35 *Prinzipieller Aufbau eines Mikrorechners*

Der **Mikroprozessor MPU** steuert das gesamte System und führt logische oder arithmetische Operationen durch; ein *Festwertspeicher ROM*, der im wesentlichen das Programm für den Mikroprozessor enthält; der *Arbeitsspeicher RAM*, in dem die vorübergehend benötigten Daten, die sich aus dem Programmablauf ergeben, gespeichert werden und schließlich ein *Ein/Ausgabe-Baustein*, der die Verbindung zur übrigen Welt herstellt. Diese vier Komponenten sind untereinander durch 3 Gruppen von Leitungen, die man Bussysteme nennt, verbunden, durch die die Adressen oder Daten transportiert werden.

Auf dem *Adressenbus* teilt der Mikroprozessor dem Speicher mit, welche der möglichen Speicherzellen, bzw. ob ein Ein/Ausgabe-Baustein angesprochen werden soll.

Über den *Datenbus* kann der Mikroprozessor Daten zum Speicher oder einem Ein/Ausgabe-Baustein senden oder auch von beiden empfangen.

Der Mikroprozessor teilt über den *Steuerbus* z. B. dem Speicher mit, in welche Richtung ein Datentransfer auf dem Datenbus stattfinden soll: Entweder liest der Mikroprozessor aus dem Speicher, oder er schreibt Daten in ihn ein.

Wir betrachten zunächst *Bild 3.35*. Nach dem Einschalten und dem Ablauf einer internen Initialisierungsroutine setzt der Mikroprzessor eine bestimmte Adresse auf den Adreßbus, die im allgemeinen einen bestimmten Platz im ROM anspricht. Daraufhin erscheint auf dem Datenbus mit einer Datenbreite von 8 Bit ein unter dieser Adresse abgespeichertes Datenwort, welches dem Mikroprozessor

eine Anweisung darüber gibt, was er nun als nächste Operation ausführen soll. Mikroprozessoren "verstehen" je nach Typ einige zehn bis einige hundert derartiger Instruktionen. Aus der Abarbeitung der Instruktion ergibt sich in einem Folgeschritt wieder eine neue Adresse, unter der der Mikroprozessor dann wieder eine neue Instruktion abruft, usw. Auf diese Weise arbeitet das System fortlaufend eine Instruktionsfolge ab, die man "*Programm*" nennt. Das Programm muß vom Anwender so festgelegt ("geschrieben") und in den Speichern abgelegt sein, daß es die gestellte Meßwertverarbeitungs- oder Automatisierungsaufgabe löst. Daten, die während der Abarbeitung eines Programms variieren, werden im Schreib-Lese-Speicher (RAM) ebenfalls wieder unter bestimmten Adressennummern zwischengespeichert, abgerufen, verändert.
Eine besondere Rolle spielen die sogenannten Ein/Ausgabe-Bausteine, die ebenfalls hochintegrierte Systeme sind. An einer "*Schnittstelle*" sind sie an die rechnerinterne Organisation des Adreß- und Datenbussystems angepaßt, an einer anderen Schnittstelle jedoch an die Datenübertragungsnorm externer Geräte, wie Analog-Digital- oder Digital-Analog-Umsetzer, Drucker, Bildschirmgeräte, Tastaturen. Schließlich gehört zu einem kompletten System noch der *Taktgenerator* (Clock), meist quarzstabilisiert, der den sequentiellen Funktionsablauf synchronisiert, sowie ein Steuerbussystem zur Übertragung verschiedener Steuersignale zwischen den Bausteinen.

Die meisten heute verwendeten Mikroprozessoren arbeiten mit einer Datenbreite von acht Bit (ein Byte), d. h., daß sie jeweils eine Gruppe von acht Bit parallel verarbeiten, z. B. addieren, können. Wenn der Mikroprozessor nur jeweils Adressen mit acht Bit verarbeiten würde, so könnte man damit nur 2^8 unterschiedliche Speicherzellen adressieren. Da dies für die meisten Anwendungsfälle viel zu wenig ist, verwendet man üblicherweise zwei Byte, also sechzehn Bit, als Adresse. Damit ergeben sich 2^{16} Speicherzellen mit je einem Byte Inhalt, die der Mikroprozessor adressieren kann.

Man erkennt in *Bild 3.36* oben die Adreßbusanschlüsse, unten die Datenbusanschlüsse und links Steuerbusanschlüsse. Ein Befehlsdekoder entschlüsselt die über Daten- und Steuerbus hineinkommenden Instruktionen und löst in einem zugeordneten Steuerwerk (*Control*) entsprechende Folgeoperationen aus. Im Programmzähler (*Program counter*) wird die jeweils anzusprechende Adresse gespeichert.

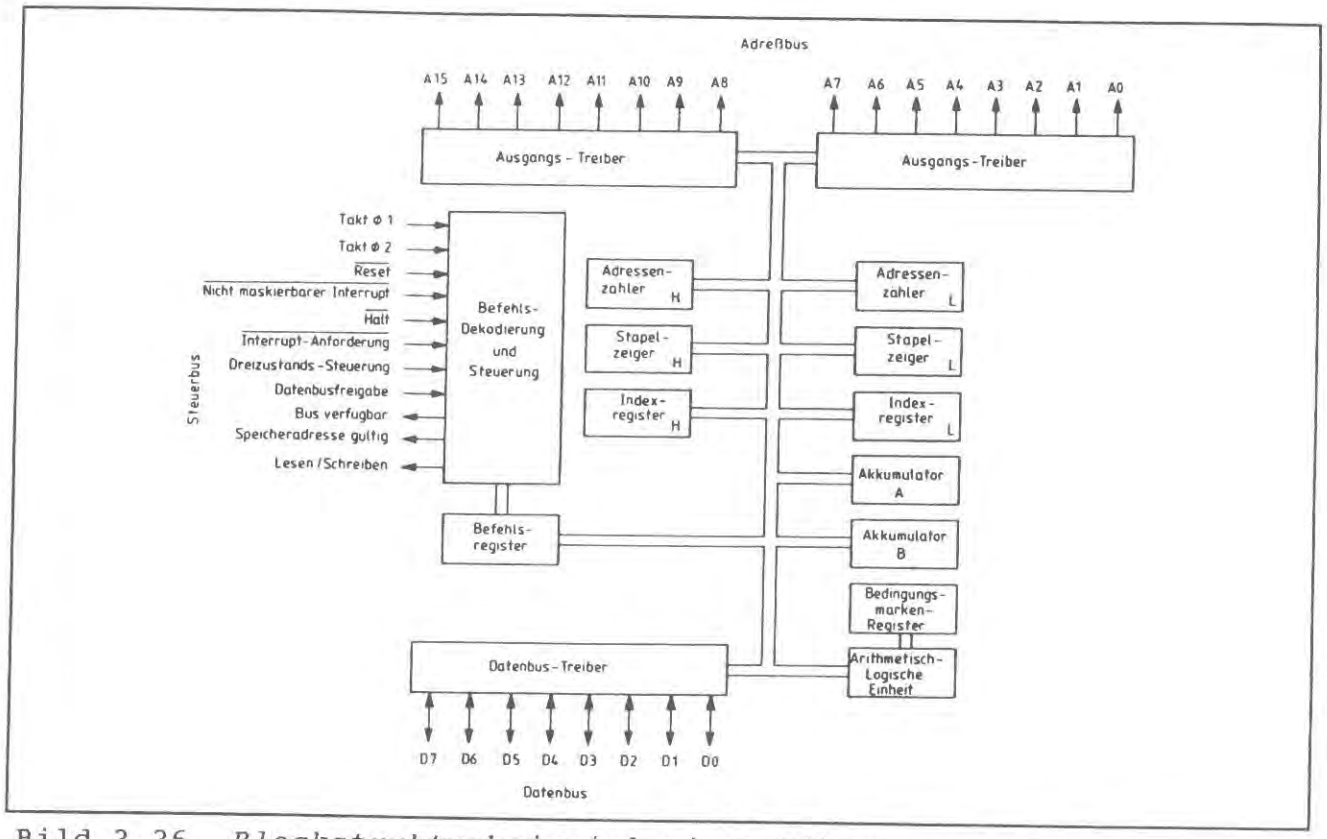


Bild 3.36 *Blockstrukturbeispiel eines Mikroprozessors*

Im Stapelspeicher (*Stack pointer*) wird die Zwischenspeicherung von Rücksprungadressen organisiert. Dadurch wird es möglich, sogenannte Unterprogramme anzuspringen und anschließend an die richtige Stelle im Hauptprogramm zurückzukehren.
Im Indexregister können Adressen oder Daten zwischengespeichert und gegebenenfalls modifiziert werden.
Die Arithmetisch-Logische Einheit (*Arithmetic-Logic unit*, **ALU**) wickelt in Verbindung mit den Akkumulatoren logische und arithmetische Operationen ab (z. B. UND-Verknüpfungen, ODER-Verknüpfungen, Additionen, Subtraktionen).
Im Bedingungsregister (*Condition code register*) können einzelne Flip-Flops gesetzt (oder rückgesetzt) werden, um beispielsweise in Abhängigkeit von bestimmten Ergebnissen logischer oder arithmetischer Operationen nachfolgende Funktionsabläufe verändern zu können.

Die Eigenschaften eines derartigen Mikroprozessors sind so komplex, daß sie im allgemeinen durch ein Handbuch beschrieben werden müssen und der Anwender sich einer längeren Einarbeitung oder Programmierschulung unterziehen muß.

3.4 ELEKTRONISCHE MESSGERÄTE

3.4.1. Allgemeines

Die elektronischen Meßgeräte und Meßverfahren ergänzen die elektrischen und elektromechanischen Meßgeräte. Sie erschließen neue Anwendungsgebiete, erhöhen den Meßumfang und die Meßgenauigkeit oder bringen Verbesserungen bezüglich wesentlicher Meßparameter. Digitale Meß-, Anzeige-, Aufzeichnungs- und Meßwertverarbeitungsverfahren nehmen eine wichtige Stellung in der Meßtechnik ein.

Verstärkung, Schwingungserzeugung, Aufzeichnung rasch veränderlicher Vorgänge, Impulszählung sowie schnelle analoge und digitale Meßwertverarbeitung sind typische Anwendungen elektronischer Einrichtungen. Während Elektronenröhren nur noch für Spezialaufgaben eingesetzt werden, bestimmen Halbleiterschaltungen unterschiedlichen Integrationsgrades die konstruktive und funktionelle Gestaltung der Geräte.

Insbesondere bei *hohen Frequenzen* sind nachfolgende Gesichtspunkte zu beachten:

3.4.2 Erdung in Meßschaltungen

Alle Erd- bzw. Masseleitungen sind zweckmäßigerweise dort zusammenzuführen, wo die Meßspannung der Schaltung zugeführt wird, also am Generator oder Meßsender (*Sternpunkterdung*). Es sind möglichst abgeschirmte Leitungen zu verwenden, wobei der Schirm die Erdverbindung herstellt. Mehrfacherdung, die zu sogenannten Erdschleifen führt, ist zu vermeiden. Diese kann unter Umständen über die Schutzerden der Geräte entstehen. Wichtig ist eine gute niederohmige Meßerde im Laboratorium. Die Ursache von Erdungsmängeln wird vorteilhaft mit Hilfe eines Elektronenstrahloszilloskops gesucht (Abbildung der Störspannungen). Übersichtlicher Schaltungsaufbau mit kurzen und sich nicht kreuzenden Leitungen verringert die Störspannungen. Die Erdung ist insbesondere in der Nieder- und Mittelfrequenztechnik zu beachten.

3.4.3 Kapazitive und induktive Entkopplung

Generatoren und Sender sind störstrahlungsfrei aufzubauen. Sekundäre Ausgänge, wie Netzzuführung, sind sorgfältig zu verdrosseln. Elektrische Felder können mit dünnen Metallfolien abgeschirmt werden, wobei Löcher in der Abschirmung zu vermeiden sind. Magnetische Felder erfordern im Niederfrequenzbereich einen ferromagnetischen Schirm mit ausreichender Dicke und hoher Permeabilität. Bei hohen Frequenzen schirmen auch Nichteisenmetalle, da der *Skineffekt* das Eindringen beschränkt. Besonders einstrahlungs- und ausstrahlungsgefährdet sind Spulen ohne geschlossenen Eisenkreis.

3.4.4 Verbindungsleitungen

Die Eigenkapazitäten und -induktivitäten der Leitungen können im Mittel- und Hochfrequenzbereich Meßfehler verursachen, wobei erstere bei Messungen an hochohmigen, letztere an niederohmigen Objekten wirksam werden. Bereits oberhalb 500 kHz ist eine Anpassung der Leitungen an den Wellenwiderstand zweckmäßig, ab 10 MHz unumgänglich, da im anderen Fall stehende Wellen auftreten. Einwandfreie *Koaxialkabel* mit geerdetem Schirm strahlen weder elektrisch noch magnetisch ab, noch nehmen sie Energie auf. Bei geringen Ansprüchen genügt das Verdrillen der Leitungen.

3.4.5 Meßumsetzer und signalstrukturändernde Meßumformer

Ein Meßumsetzer ist ein Gerät, daß an Ein- und Ausgang verschiedene Signalstruktur aufzuweisen hat *[siehe Abschnitt 3.1.8]*.
Ein Meßumformer *[siehe Abschnitt 3.1.9]* hingegen formt ein analoges Eingangssignal in ein analoges Ausgangssignal um. Hiernach ist ein Spannungs-Frequenz-Converter ein Meßumformer, denn die von ihm abgegebene Frequenz ist ein analoges Abbild der Eingangsspannung. Bei kritischer Betrachtung vermittelt andererseits ein Spannungs-Frequenz-Umformer aber auch eine Signalstrukturänderung.

3.4.5.1 Digital-Analog-Umsetzer

Oft benötigt man analoge Ausgangsspannungen, die vom Computer eingestellt werden können. Über D/A-Umsetzer lassen sich die parallelen digitalen Daten in Analogwerte umsetzen. Dabei kann z. B. ein Schritt der digital übertragenen Zahl einer Änderung der Ausgangsspannung von 10 mV entsprechen. Bei einer Datenbreite von 8 Bit reicht der Spannungsbereich dann von 0 V bis 2,55 V. Die Schrittweite entspricht etwa 0,4 % vom Endwert, so daß die Spannung schon als kontinuierlich einstellbar angesehen werden kann.

Ein verbreitetes Verfahren, mit dem sich leicht ein einfacher Umsetzer aufbauen läßt, ist das sogenannte **R-2R-Netzwerk** (*Bild 3.37*), welches direkt an die acht Datenausgänge des seriellen Empfängers angeschlossen werden kann. Die Funktion dieses Umsetzers kann man sich mit hintereinandergeschalteten Spannungsteilern verdeutlichen, deren höchstwertiger Datenausgang D7 eine Spannung von 5 V ausgeben kann.

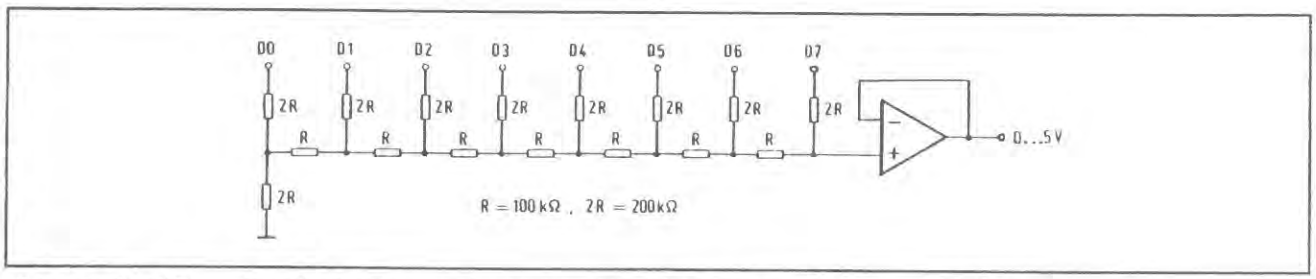


Bild 3.37 *R-2R-Netzwerk zur Digital-Analog-Umsetzung*

Für den praktischen Einsatz benötigt man einen Pufferverstärker. Die Ausgangsspannung reicht von 0 V bis nahe an die Betriebsspannung des seriellen Empfängers (5 V). Der Pufferverstärker erhält aber nur ein durch zwei geteiltes Signal, da praktisch ein Spannungsteiler mit zwei gleichen Widerständen aufgebaut ist.
Das gesamte Netzwerk hat wie der Widerstand zu D7 einen Widerstand von 200 kΩ. Der Zustand an D7 ändert die Ausgangsspannung also nur um 2,5 V. Eine Änderung an D6 wirkt sich mit 1,25 V nur halb so groß aus, da die Spannung zwei mal geteilt wird. So ist der Einfluß des nächst kleineren Datenausgangs stets halbiert und D0 wirkt sich nur noch mit ca. 20 mV aus.
Die Wertigkeit jedes Ausgangs entspricht damit genau seinem Beitrag zur Ausgangsspannung, und die Ausgangsspannung ist proportional zum Wert des digitalen Datenworts.

Es gibt jedoch viele mögliche *Fehlerquellen*, die die korrekte Funktion beeinflussen. Fehler von nur 1 % beim Spannungsteiler des Ausgangs D7 können schon nichtstetige Spannungssprünge bewirken, da dann der Fehler größer erscheint als der Einfluß des niedrigstwertigen Bits.
Eine weitere Fehlerquelle sind die Innenwiderstände der CMOS-Schaltstufen an den Ausgängen des seriellen Empfängers, die den Betrag der 200 kΩ -Widerstände um bis zu etwa 0,3 % vergrößern. Daher muß das gesamt Netzwerk relativ hochohmig ausgelegt werden, um diesen Fehler so gering wie möglich zu halten.

Die für den *Einsatz industriell gefertigter Umsetzer* enthalten meist die erforderlichen Schaltstufen zusammen mit einem R-2R-Netzwerk. Der Anschluß eines preiswerten 8-Bit-Wandlers ist in *Bild 3.38* dargestellt. Er enthält zusätzlich eine hochgenaue Spannungsreferenz von 2,55 V, sodaß die einzelnen Spannungsschritte genau 10 mV betragen. Der Baustein ist in TTL-Technik aufgebaut und kann direkt an den Datenausgang des seriellen Empfängers gelegt werden.

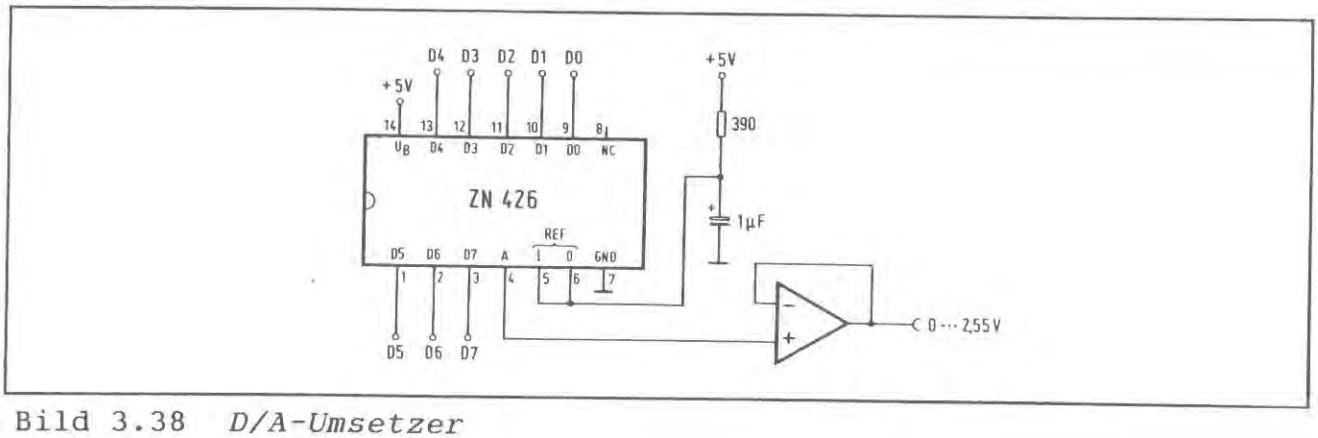


Bild 3.38 *D/A-Umsetzer*

3.4.5.2 Analog-Digital-Umsetzer

Ein D/A-Umsetzer läßt sich nicht nur zur Ausgabe von Spannungen, sondern mit Hilfe eines Komparators auch zum Messen einsetzen (*Bild 3.39*).

Der Komparator der hier mit einem Operationsverstärker aufgebaut ist, vergleicht die zu messende Spannung mit der Ausgangsspannung des D/A-Umsetzers, die an seinen Eingängen liegen (Kompensationsspannung).

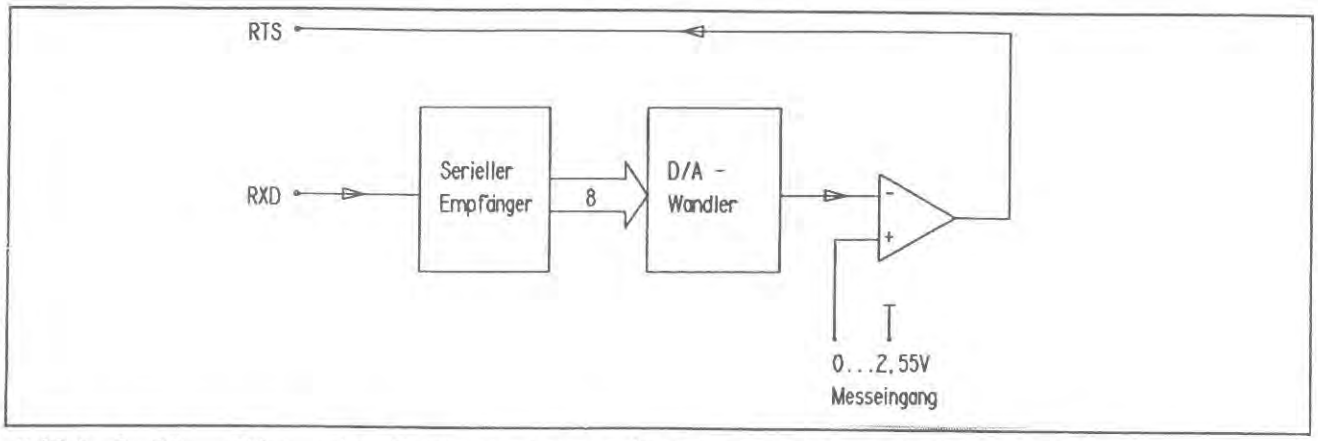


Bild 3.39 *Ein als Komparator eingesetzter zusätzlicher Operationsverstärker ergänzt den D/A-Umsetzer zu einem A/D-Umsetzer.*

Eine geeignete Steuerschaltung setzt die Eingangswerte des D/A-Umsetzers nach einem geeigneten Folgeprogramm. Durch Rückmeldung des Vergleichsergebnisses "größer/kleiner" vom Komparator an die Steuerung (Computer) wird die ausgegebene Spannung so lange verändert, bis sie der Meßspannung am nächsten kommt. Die zurückgemeldete Information läßt sich auf einer digitalen Leitung als logische Null oder Eins übertragen.

Für diesen Meßvorgang der einem Ausprobieren der gesuchten Spannung ähnelt, gibt es zwei übliche Verfahren.
Zunächst ist es naheliegend, die Spannung schrittweise zu erhöhen, bis der Komparator umkippt. Nach jeder Ausgabe muß man etwa 10 ms warten, bis die Daten seriell übertragen sind und der Komparator sich eingestellt hat. Der letzte ausgegebene Wert gilt dann als Meßergebnis. Da die Meßzeit von der Meßspannung abhängt, dies sind bei 2,5 V schon 2,5 s, ist das Zählverfahren nicht mehr sehr beliebt.

Das zweite Verfahren ist die *sukzessive Approximation* (schrittweise Annäherung). Man probiert zunächst die Mitte des Meßbereichs. Abhängig vom Ergebnis des Vergleichs mit der Meßspannung wird dann die Hälfte davon addiert oder subtrahiert. Jeder folgende Schritt ist jeweils um die Hälfte kleiner. Beim achten Durchgang hat man so das niedrigstwertige Bit ermittelt.
Diese Methode kommt mit nur acht Schritten, also ca. 80 ms für jede beliebige Spannung im Meßbereich aus.

Die sukzessive Approximation wird häufig verwendet, wobei die Steuerung meist hardwaremäßig ausgeführt wird. Integrierte A/D-Umsetzer erreichen dabei Umsetzzeiten in der Größenordnung von 10 µs.

3.4.6 Voltmeter

3.4.6.1 Vielfachmeßgeräte

Bei Vielfachmeßgeräten können mehrere Meßbereiche wahlweise eingestellt werden. Voltmeter enthalten bei Gleichspannungsmessung einen Transistorverstärker, um den Eingangswiderstand zu erhöhen und die Meßbereiche zu erweitern, sowie ein Zeigerinstrument (z. B. Drehspulinstrument). Dieses liegt somit nicht an der Meßquelle, sondern wird mit konstantem Quellwiderstand vom Verstärker gespeist. Die Rückwirkung des Meßobjekts auf die Berührungszeit, die insbesondere bei Galvanometern zu beachten ist, entfällt. *Bild 3.40* zeigt die Prinzipschaltung eines Gleichspannungsvielfachmeßgerätes.

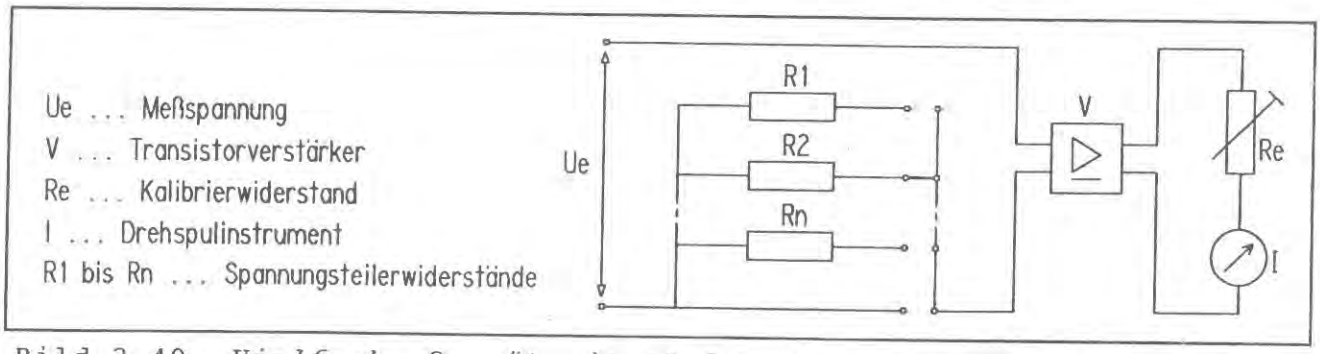


Bild 3.40 *Vielfachmeßgerät mit Gleichspannungsverstärker, Prinzip*

Für **Niederfrequenz- und Mittelfrequenzspannungsmessungen** enthalten die Geräte einen RC-Wechselspannungsverstärker mit Transistoren, der einen hohen Eingangswiderstand und abgeglichene kapazitive oder ohmsche Spannungsteiler für die Meßbereichsumschaltung hat und die notwendige Wechselleistung zum Aussteuern der Gleichrichterschaltung *[siehe Abschnitt 3.2.1.2]* bereitstellt.

Für **Hochfrequenzspannungsmessungen** erfordern die Kapazitäten und Induktivitäten der Leitungen kürzeste Verbindungen (unter 1 cm) zwischen Meßstelle und Gleichrichterschaltung, da sonst starke Meßfehler auftreten können. Die Gleichrichterschaltung wird deshalb

in einem handlichen, abgeschirmten *Tastkopf T* untergebracht, der unmittelbar an die Meßstelle herangebracht wird *(Bild 3.41)*. Auf der Leitung tritt dann nur die unkritische Spitzenspannung (Gleichspannung) auf, die in dem *Gleichspannungsverstärker GV* verstärkt und vom *Drehspulinstrument D* angezeigt wird. Infolge der hohen Ansprechschwelle des Gleichrichters können kaum Spannungen unter 10 bis 15 mV gemessen werden. Der Eingangswiderstand des Tastkopfes beträgt weniger als R/3.

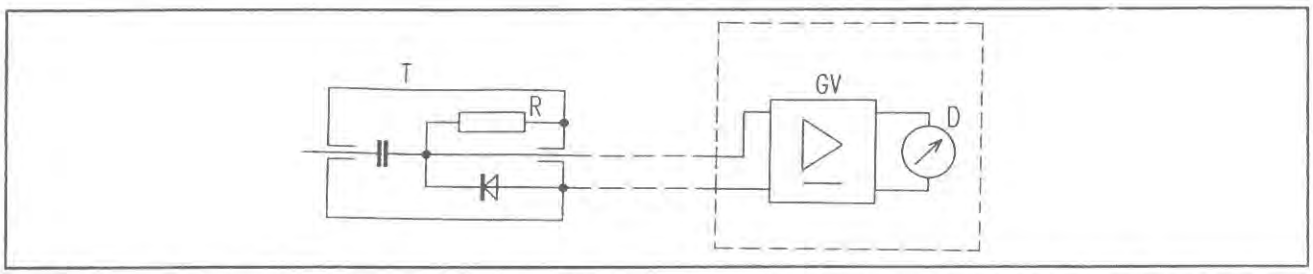


Bild 3.41 Prinzip eines Hochfrequenzspannungsmessers mit Tastkopf

3.4.6.2 Digitalvoltmeter

Die Digitalvoltmeter sind Gleichspannungsmesser, die als wesentliche Bestandteile einen Analog-Digital-Umsetzer und eine Ziffernanzeige aufweisen. Es sind vor allem folgende *Vorteile* gegeben:

a) direkte Ziffern-, Vorzeichen- und Kommaanzeige möglich;
b) einfache Ausgabemöglichkeit des Meßwerts an Drucker, Großsichtanzeigen, Datenübertragungsgeräte und andere Geräte der Digitaltechnik;
c) hohe Genauigkeit (0,01 bis 0,1 %);
d) hoher Eingangswiderstand (1 bis 1000 Megaohm erzielbar);
e) automatische Polaritäts- und Meßbereichseinstellung möglich.

Durch Vorsetzen einer *Spitzenwertgleichrichterschaltung* werden auch Wechselspannungsmessungen möglich, wobei jedoch die unter c) und d) genannten Vorteile stark gemindert werden.

Der wesentliche Bestandteil aller Digitalvoltmeter ist ein Zähler, dessen Stand nach Abschluß eines Meßvorgangs dem Meßwert entspricht. Von diesem Zählerstand werden die Ziffernanzeige und die Meßwertausgabe abgeleitet. Nach den benutzten Meßabläufen unterscheidet man *zwei Grundtypen* von Digitalvoltmetern.

Digitalvoltmeter mit Sägezahngenerator: Zur Erläuterung dieser Ausführung dient *Bild 3.42.*

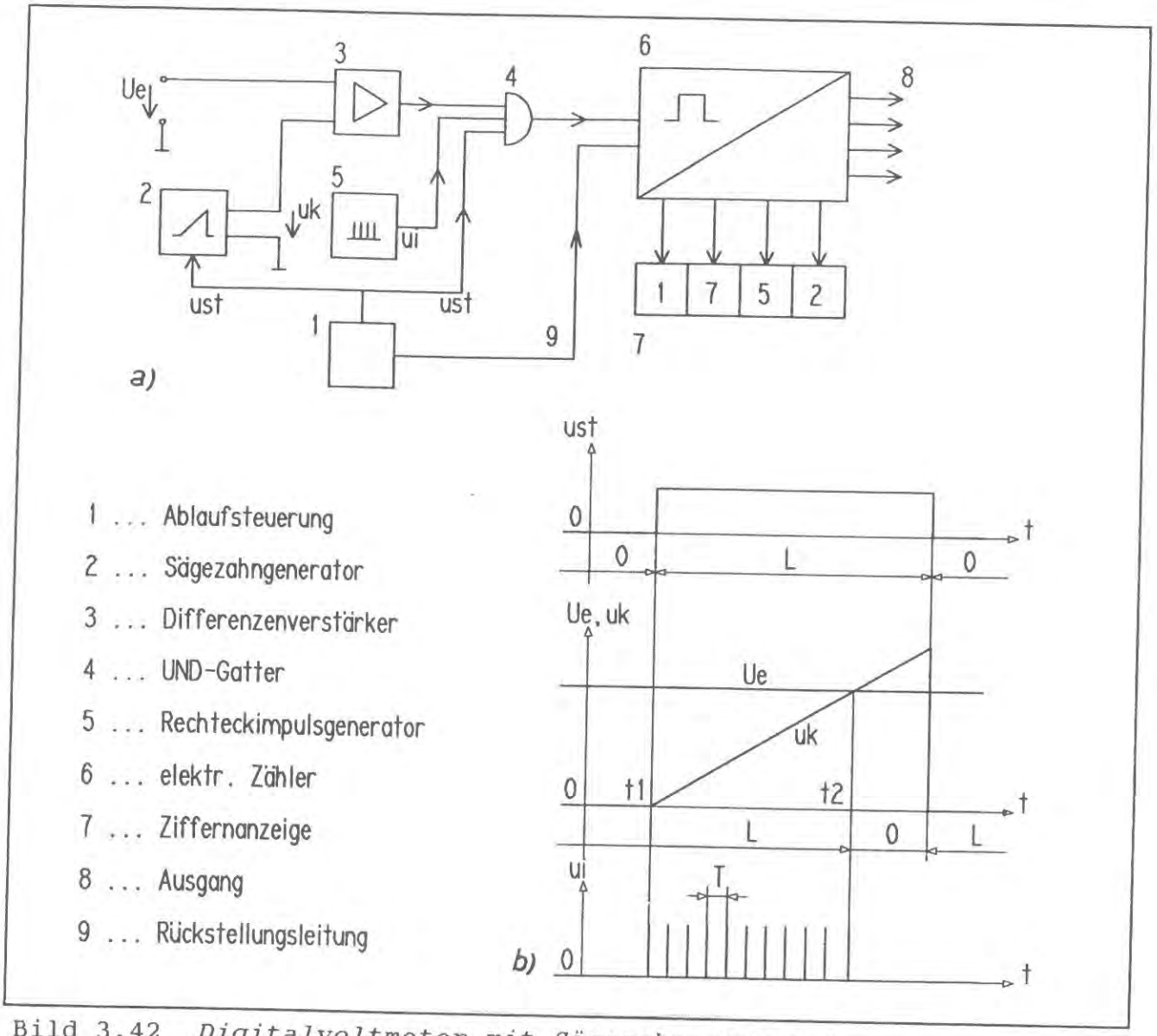


Bild 3.42 *Digitalvoltmeter mit Sägezahngenerator*
a) *Prinzipschaltung*
b) *Darstellung des Meßvorgangs*

Digitalvoltmeter mit geschalteter Kompensationsspannung: Bei diesen Geräten wird der Meßspannung eine hochgenaue, stufenweise schaltbare Kompensationsspannung gegengeschaltet. Sie wird in Abhängigkeit vom momentanen Vergleichsergebnis so lange gezielt geändert, bis die Übereinstimmung hergestellt ist. Das Verfahren entspricht einem Handabgleich, läuft jedoch automatisiert ab. Die Einstellung der Kompensationsspannung ist mit der des Digitalzählers fest gekoppelt.

3.4.7 Elektronenstrahloszilloskope

3.4.7.1 Elektronenstrahlröhre

Hauptelement des Elektronenstrahloszilloskops ist die *Elektronenstrahlröhre*, auch *Kathodenstrahlröhre* oder *Braunsches Rohr* genannt. Mit ihrer Hilfe kann ein elektrischer Spannungs- oder Stromwert in die Ablenkung eines Leuchtpunktes auf einem Bildschirm umgesetzt werden. In der Meßtechnik verwendet man vorwiegend Elektronenstrahlröhren mit elektrostatischer, also spannungsabhängiger Ablenkung. *Bild 3.43* zeigt den prinzipiellen Aufbau.

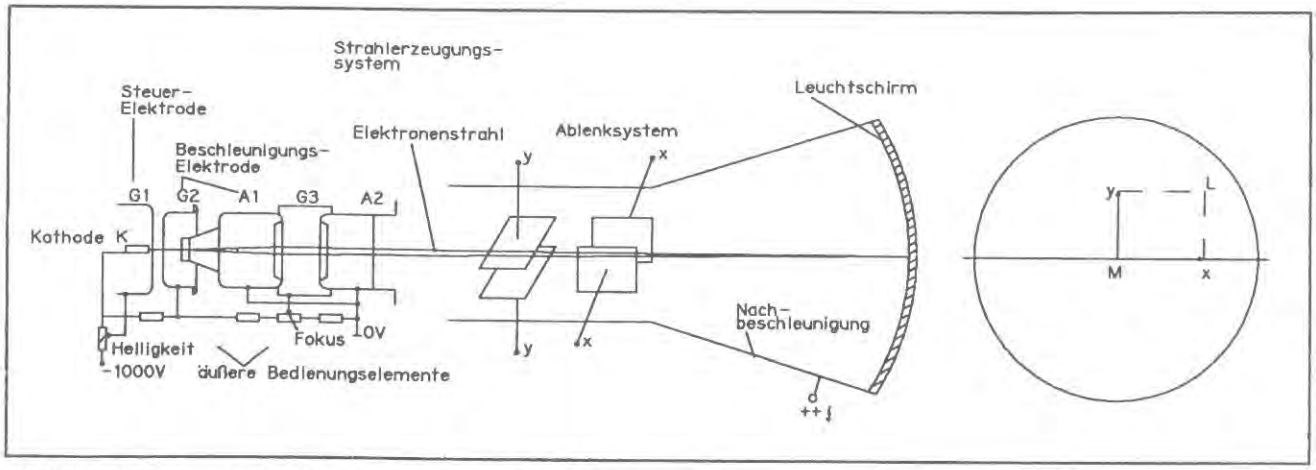


Bild 3.43 *Elektronenstrahlröhre*
a) *Aufbau und Beschaltung einer Elektronenstrahlröhre*
b) *Darstellung der Ablenkkoordinaten auf dem Bildschirm*

Die Elektronenstrahlröhren sind Hochvakuumröhren, meist aus Glas und bestehen im wesentlichen aus einer geheizten Kathode, einem Fokussierungs- und Ablenksystem sowie einem Leuchtschirm, der beim Aufprall von Elektronen Licht aussendet.

Das *Bild 3.43 a)* zeigt den Aufbau einer Elektronenstrahlröhre. Die geheizte Kathode K emittiert Elektronen und wird von einer topfförmigen Elektrode G1, dem *Wehnelt-Zylinder*, mit einem Loch für den Elektronendurchlaß umgeben. Mit Hilfe eines Potentiometers kann man das negative Potential des Wehnelt-Zylinders relativ zur Kathode ändern, das entsprechend seiner Stärke mehr oder weiniger bremsend auf die emittierten Elektronen wirkt. Dadurch wird die Stärke des Elektronenstromes und damit die Helligkeit geregelt, der nun zur Beschleunigungselektrode G2 gelangt. Diese Elektrode liegt auf einem

positiven Potential relativ zur Kathode, sodaß von ihr eine beschleunigende Wirkung auf die Elektronen ausgeht.

Das *Fokussierungssystem* (Elektronenlinse) besteht aus den Elektroden A1, G3 und A2. Die Anoden A1 und A2 haben gleiches Potential (0 V), während die zwischengeschaltete Rohrelektrode G3 auf negativem Potential liegt. Die Elektronen müssen also auf ihrem Weg von A1 nach A2 eine Potentialmulde durchlaufen, was bei ihrer negativen Ladung mit der Überwindung eines Bergsattels zu vergleichen ist. Die Stärke der Fokussierung ist mit einem Potentiometer einstellbar.

Auf ihrem Weg zum Leuchtschirm durchlaufen die Elektronen anschließend noch das *Ablenksystem* und werden durch die Y- bzw. X-Ablenkplatten vertikal oder horizontal abgelenkt. Diese Strahlablenkung beruht auf der Kraftwirkung im elektrischen Feld zwischen den Platten, das durch eine entsprechende Ablenkspannung an den Platten erzeugt wird. Die so erzielbare Ablenkempfindlichkeit, bezogen auf den Leuchtschirm, liegt in der Größenordnungen 1 mm/V.

Moderne Elektronenstrahlröhren arbeiten zur Erzielung eines hellen Leuchtpunktes mit einer *Nachbeschleunigung der Elektronen* auf ihrem Weg zwischen Ablenkplatten und Leuchtschirm.
Bei der Lichtabstrahlung unterscheidet man die *Fluoreszenz* (unverzögerte Lichtabstrahlung) von der *Phosphoreszenz* (verzögerte Lichtabstrahlung). Die Art des Leuchtens, insbesondere die spektrale Zusammensetzung des Lichtes, ist abhängig von dem jeweiligen Leuchtstoff, mit dem der Leuchtschirm beschichtet ist. Diese Stoffe setzen die von den Elektronen aufgenommene kinetische Energie in Lichtstrahlung um.

3.4.7.2 Standardoszilloskope

Die vorherrschende Form des Elektronenstrahloszilloskops ist die sogenannte Standardausführung, die periodische und kurz dauernde unperiodische Spannungen darzustellen gestattet. *Bild 3.44* zeigt das Blockschaltbild eines derartigen Gerätes.

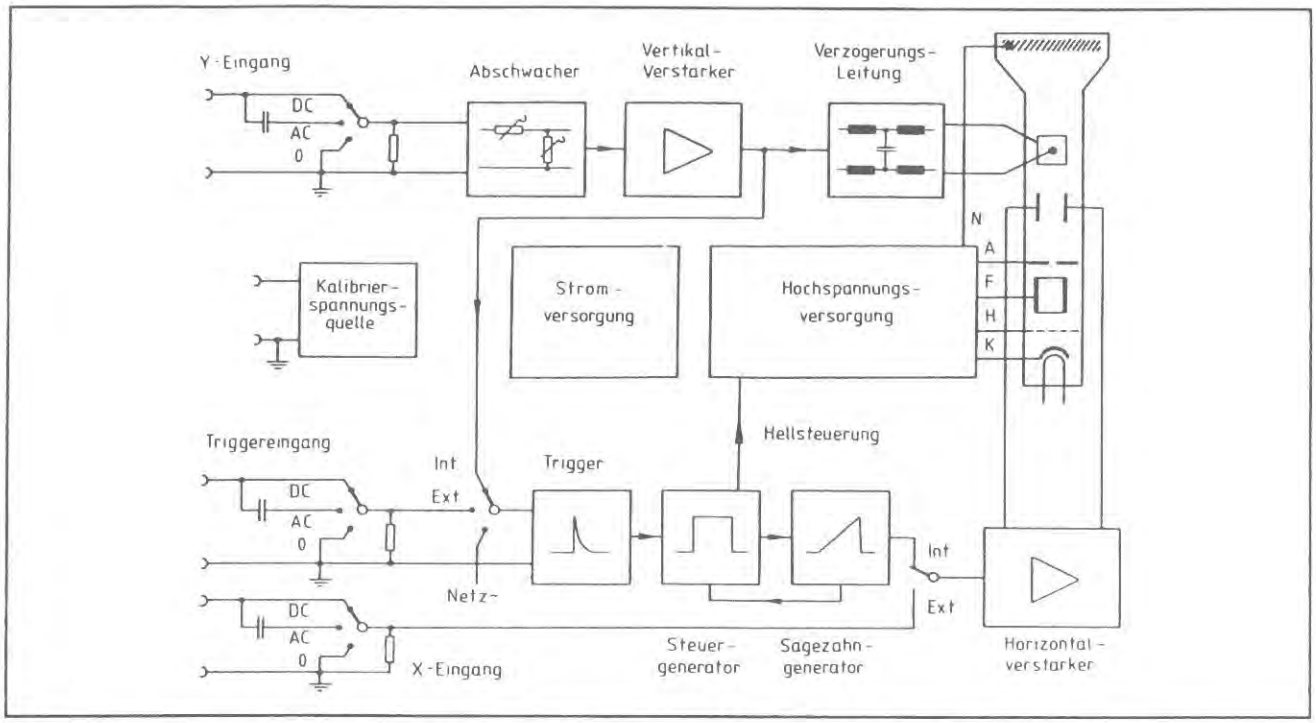


Bild 3.44 *Standardoszilloskop, vereinfachtes Blockschaltbild*

Standardoszilloskope lassen sich für zahlreiche Meß- und Prüfaufgaben benutzen. Einige wichtige Anwendungsfälle enthält *Tabelle 3.3*.

3.4.7.3 Zweistrahloszilloskop

Denkt man sich in *Bild 3.44* oben einen zweiten Y-Kanal und in der Elektronenstrahlröhre ein zweites Y-Ablenkplattenpaar ergänzt, so gelangt man zum Zweistrahloszilloskop, mit dessen Hilfe zwei zeitabhängige Vorgänge gleichzeitig beobachtet werden können. Die X-Ablenkeinrichtung ist auch hierbei nur einmal vorhanden. Dies ist ausreichend, da der Sinn einer Zweistrahldarstellung darin besteht, Zusammenhänge bzw. wechselseitige Abhängigkeiten zwischen den beiden gleichzeitig dargestellten Oszilloskopbildern festzustellen oder nachzuprüfen. Hierfür müssen beide Bilder im gleichen Zeitmaßstab dargestellt werden, und die Zeitmaßstäbe dürfen gegeneinander auch nicht verschoben sein. Im allgemeinen besteht bei einem Zweistrahloszilloskop die Möglichkeit, das Triggersignal von Kanal 1, Kanal 2, extern oder netzsynchron vorzugeben.

Ein besonderer *Vorteil* des Zweistrahloszilloskops ist, daß man stets die Gewähr hat, daß man zwei gleichzeitig ablaufende Ereignisse auf

dem Bildschirm auch tatsächlich genau übereinander, d. h. an der gleichen Stelle der Zeitachse dargestellt sieht. Ein *Nachteil* des Zweistrahlprinzips ist die technisch schwierige Konstruktion der Zweistrahlröhre, die nicht nur erhöhte Kosten verursacht, sondern auch den darstellbaren Frequenzbereich zusätzlich einengt.

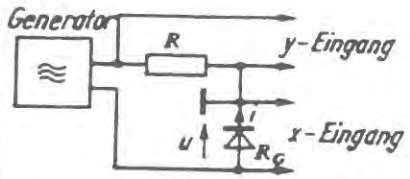
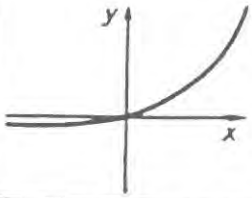
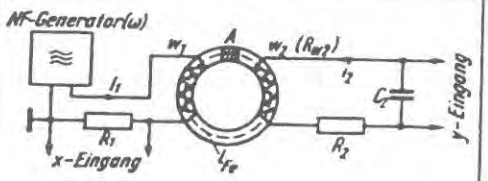
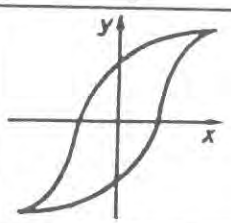
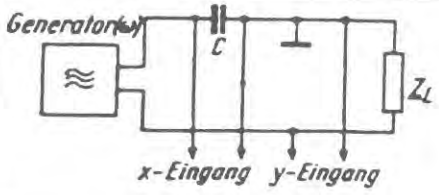
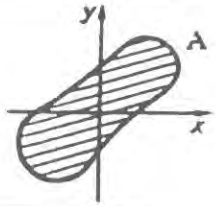
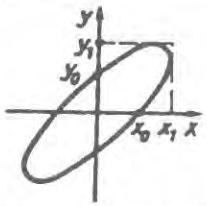
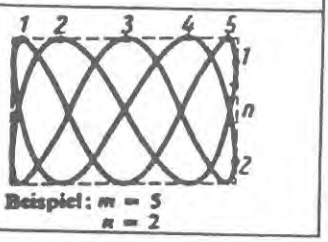
Anwendungsfall	**Meßschaltung**	**Schirmbild**
Darstellen periodischer Spannungen u(t)	u an y-Eingang	y(x)
Darstellen einmaliger bzw.in unregelmäßigen Abständen wiederholter Spannungimpulse u(t)	u an y-Eingang	y(x) nachleuchtende Oszilloskopröhre oder Abfotografieren erforderlich
Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien (Dioden, Transistoren usw.)		
Aufnahme von HB-Kennlinien von magnetischen Materialien (in Kernform)		
Wirkleistungsmessung bei Wechselstrom (an Verbraucher Z_L)		
Messung des Phasenwinkels zwischen zwei Sinusspannungen (Ellipsenmethode)	erste Spannung $U_1 \sin \omega t$ an x-Eingang zweite Spannung $U_2 \sin(\omega t+\varphi)$ an y-Eingang	
Frequenzmessung (Frequenzvergleich mit einstellbarem Normalgenerator)	mit Lissajous-Figuren: Normalgeneratorspannung mit f_N an x-Eingang, Spannung mit unbekannter Frequenz f_Y an y-Eingang	

Tabelle 3.3 *Anwendungen von Standardoszilloskopen*

3.4.7.4 Speicheroszilloskope

Speicheroszilloskope können einmalige, aber auch periodische Signale über längere Zeit auf dem Oszilloskopschirm festhalten. Das für das Auswerten sonst übliche Abfotographieren entfällt. Sie haben eine externe und interne triggerbare Auslösung des Strahls und werden im Nieder-, Mittel- und Hochfrequenzbereich eingesetzt (Untersuchung von Ausgleichvorgängen, Impulsfolgen, stochastischen Größen, von Herz-, Lungen- und Nervenvorgängen in der Elektromedizin usw.).

In der Regel benutzen Speicheroszilloskope zur Anzeige Sichtspeicherröhren, die den vom Elektronenstrahl gezeichneten Kurvenverlauf in einem (unsichtbaren) Ladungsbild bis zu einigen Tagen festhalten können. Es wird durch Auslesen mit einem besonderen Schreibstrahl sichtbar gemacht, wobei es aber in wenigen Minuten zerstört wird. Man unterscheidet deshalb die Betriebsarten "*Speichern*", "*Auslesen*" und "*Löschen*" des Bildes. Letzteres kann in etwa einer Sekunde vorgenommen werden.

Die Arbeitsweise erfolgt mit Hilfe von *Bildspeicherröhren*. Diese arbeiten im wesentlichen nach folgendem Prinzip: Hinter der Phosphoreszenzschicht (vom Betrachter aus gesehen) wird eine Speicherschicht (Target) aus vielen einzelnen, hochisolierten, metallischen Kondensatorelementen angebracht, vor der Phosphoreszenzschicht eine positiv vorgespannte Kollektorschicht (bei manchen Ausführungen auch hinter der Speicherschicht). Wird die Speicherschicht vom Schreibelektronenstrahl getroffen, so entsteht ein Sekundärelektronenstrom von den Speicherelementen zur Kollektorschicht, und die vom Schreibelektronenstrahl getroffenen Speicherelemente werden positiv aufgeladen. Das System aus Speicherschicht und Phosphoreszenzschicht wird nun mit Hilfe zusätzlicher Flutkathoden mit langsamen Elektronen gleichmäßig berieselt. Dort, wo die Speicherschicht positiv aufgeladen ist, werden die Rieselelektronen zusätzlich beschleunigt und die Phosphoreszenzschicht leuchtet heller auf. Auf diese Weise leuchtet ein einmal eingeschriebener Kurvenverlauf nach, bei neuen Speicherröhren bis zu einigen Stunden, nach einigen tausend Betriebsstunden im allgemeinen nur noch einige Minuten. Dadurch können dann auch einmalige Abläufe in Ruhe betrachtet oder bequem fotographiert werden.

3.4.7.5 Digitale Speicheroszilloskope

Bei einem digitalen Speicheroszilloskop werden von dem auf dem Bildschirm dargestellten Vorgang Abtastwerte genommen, analog-digital umgesetzt und dann digital gespeichert. Durch eine geeignete Ablaufsteuerung kann der Prozeß dann jederzeit umgekehrt werden. Die gespeicherten Digitalwerte werden wieder digital-analog umgesetzt und dann auf dem Bildschirm wiederum Punkt für Punkt abgebildet. Ein Vorgang kann auf diese Weise gespeichert bleiben, so lange die Betriebsspannung nicht ausfällt. Durch Übertragung auf einen Magnetbandspeicher kann der Vorgang unverlierbar gespeichert werden.

3.4.7.6 Sampling-Oszilloskope

Sampling- oder Abtast-Oszilloskope dienen zum Darstellen von Schwingungen auch über 500 MHz und Impulsen im Nano- und Pikosekundenbereich, die mit Breitbandverstärkern nicht mehr ökonomisch übertragen werden können. Die Meßgröße muß periodisch sein.

Beim Sampling-Oszilloskop wird dafür eine schnelle Abtasttechnik eingesetzt, um diese sehr schnellen (z. B. hochfrequente) periodischen Vorgänge abzutasten. Die Vorgänge werden analog gespeichert, um sie dann langsamer punktweise auf dem Bildschirm des Oszilloskops wiederzugeben. Dadurch können Vorgänge sichtbar gemacht werden, für die anders keine hinreichend schnellen Verstärker verfügbar wären. Hierbei wird z. B. in jeder Schwingungsperiode des darzustellenden periodischen Vorgangs ein Abtastwert genommen, der jedoch von Periode zu Periode etwas versetzt wird, d. h. jedesmal relativ zur Periode des Vorgangs etwas später genommen wird. So erhält man dann nach z. B. 100 Perioden ein vollständiges Abtastbild des Vorgangs, welches dann langsam wiedergegeben werden kann.

3.4.8 Meßgeräte für spezielle Größen

3.4.8.1 Frequenzmesser

Genaue Frequenzmessungen erfolgen heute in der Regel mit Hilfe elektronischer Zähler. Analoge Frequenzanzeiger werden dann benutzt, wenn es weniger um eine sehr genaue Feststellung der Frequenz geht, als vielmehr um einen raschen Überblick.

Resonanzfrequenzmesser: Sie enthalten einen abstimmbaren, geeichten Resonanzkreis hoher Güte, an denen das Signal über einen Vorwiderstand gelegt wird (*Bild 3.45*). An der Spannungsüberhöhung bei Resonanz, die mit einer einfachen Spitzenwertgleichrichterschaltung gemessen wird, erkennt man die unbekannte Frequenz. Die Meßgenauigkeit beträgt etwa 0,001.

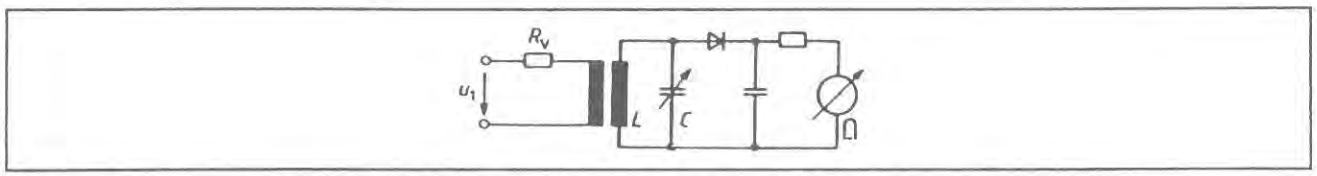


Bild 3.45 *Prinzip eines Resonanzfrequenzmeßgerätes*

Überlagerungsfrequenzmesser: Die zu bestimmende Frequenz wird mit der eines durchstimmbaren, geeichten Oszillators gemischt und die Differenzfrequenz auf Schwebungsnull abgeglichen (Kontrolle z. B. mit Kopfhörer). Der Oszillator kann mit einem zusätzlichen Quarzoszillator feingeeicht werden. Die Meßgenauigkeit beträgt bis zu 0,0001.

Frequenzmesser nach dem Kondensatorumladeverfahren: Dieses bis in den Hochfrequenzbereich brauchbare Verfahren gestattet eine direkte Anzeige der Frequenz mit einem Drehspulinstrument, wobei Genauigkeiten von einigen Prozenten erzielt werden. Das Signal darf in gewissen Grenzen von der Sinusfrequenz abweichen. Das *Bild 3.46* zeigt die Frequenzmessung nach dem Kondensatorumladeverfahren.

Die an den *Eingang 1* gelegte Wechselspannung wird in der *Eingangsstufe 2* begrenzt (Übersteuerungsschutz) und anschließend verstärkt *(3)*. Damit wird eine *Schmitt-Triggerschaltung 4* angesteuert, die als Amplitudendiskriminator wirkt und bei Überschreiten eines Schwellwertes eine Rechteckwellenspannung konstanter Amplitude mit der Frequenz f des Eingangssignals liefert.

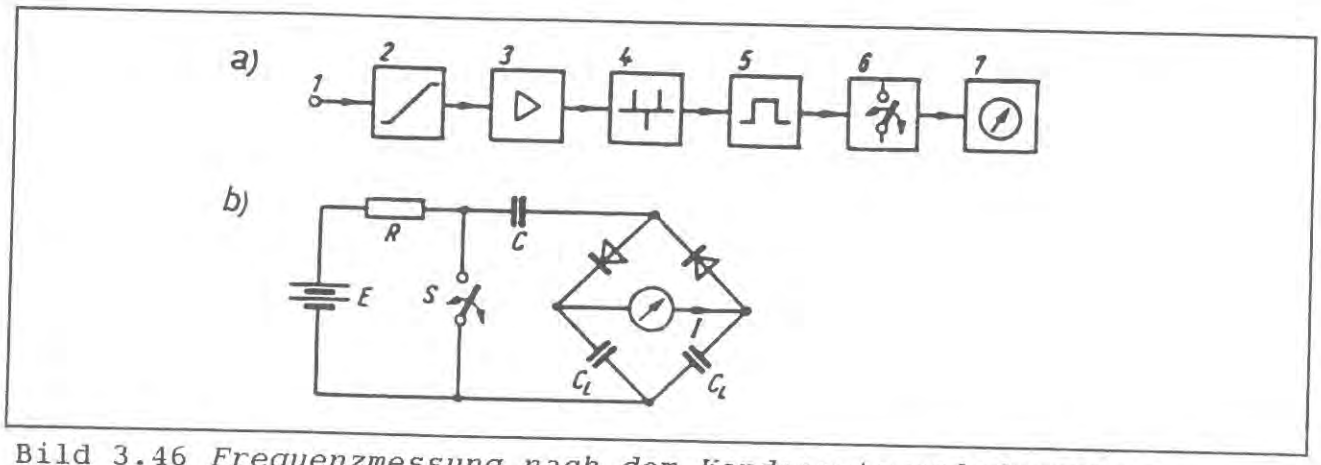


Bild 3.46 *Frequenzmessung nach dem Kondensatorumladeverfahren*
a) *Blockschaltbild eines direktanzeigenden Frequenzmessers*
b) *Prinzipschaltung für die Frequenzmessung*

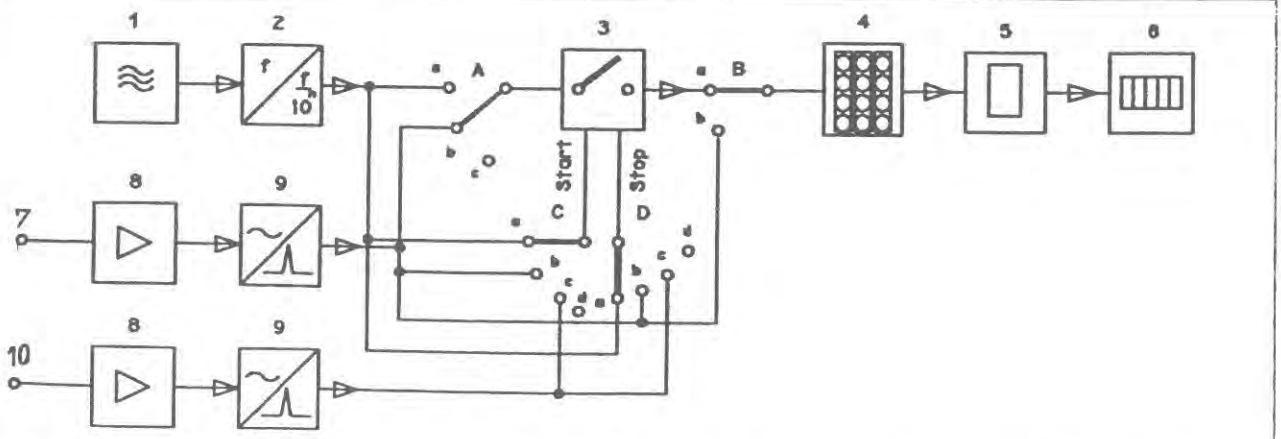
Diese wird noch differenziert. Die dadurch entstehenden positiven Nadelimpulse steuern eine *Flip-Flop-Schaltung 5*, an deren Ausgang eine Rechteckwellenspannung mit der halben Eingangsfrequenz auftritt, die weitgehend unabhängig von der Kurvenform, der Größe und dem zeitlichen Verhältnis der Nulldurchgänge der Eingangsspannung ist. Diese Rechteckwellenspannung steuert nunmehr eine *Schaltstufe 6*, die die eigentliche *Meßschaltung 7* periodisch an eine Gleichspannung legt bzw. kurzschließt.

3.4.8.2 Phasenmesser

Die Phasenmesser bzw. der Phasenwinkel zwischen zwei Wechselgrößen ist für die zeitliche Differenz streng sinusförmiger Schwingungen gleicher Frequenz definiert. Bei nichtsinusförmigen periodischen Größen bezieht man sich ersatzweise auf die Abstände der Nulldurchgänge. Die direktanzeigenden Phasenmesser, die im Nieder- und Mittelfrequenzbereich angewendet werden, arbeiten nach einem Impulsmeßprinzip. Es werden Genauigkeiten von einigen Prozenten erzielt.

3.4.8.3 Zähler

Die nach digitalen Prinzipien arbeitenden elektronischen Zähler zählen heute zu den wichtigen Hilfsmitteln der Präzisionsmeßtechnik. *Bild 3.47* zeigt das Zusammenwirken der wichtigsten Baugruppen.



1 ... Quarzgenerator, 1 MHz 2 ... dekadischer Frequenzteiler
3 ... Torschaltung 4 ... Zähldekaden 5 ... Speicher
6 ... Ziffernanzeige 7 und 10 ... Eingang für Fremdspannungen
8 ... Eingangsverstärker 9 ... Impulsformerstufe

Bild 3.47 *Blockschaltbild eines Zählers*

Die *Torschaltung 3* ist ein elektronischer Schalter, der beim Eintreffen eines Impulses auf der Startleitung die (Impuls-) Verbindung von dem Schalter A zu dem Schalter B schließt und sie beim Eintreffen eines weiteren Impulses auf der Stoppleitung wieder trennt. Jeder die *Zähldekade 4* erreichende Impuls stellt diese um eine Ziffer weiter. Der Zählerstand kann, automatisch oder von Hand gesteuert, in den *Speicher 5* gegeben und durch die *Ziffernanzeige 6* sichtbar gemacht werden. Ein *Quarzgenerator 1*, dessen Frequenz dekadisch geteilt wird *(2)*, dient als Zeitnormal.

Mit Hilfe von Universalzählern lassen sich fünf Hauptmeßaufgaben durchführen:

- Frequenzmessung,
- Periodendauermessung,
- Zeitintervallmessung,
- Frequenzverhältnismessung,
- Zählen.

Die Meßgenauigkeit ist durch die Quarzgenauigkeit 10^{-6} bis 10^{-7} zuzüglich ±1 Impuls bestimmt. Die Bedienung wird durch automatisch repetierende Auslösungs- und Löschvorgänge erleichtert.

4 MESSWERTAUFNEHMER UND SENSORIK

4.1 EINLEITUNG

Die Halbleiterelektronik eröffnet durch die enormen Fortschritte der modernen Meßtechnik und der Verarbeitung von Signalen nahezu unbegrenzte Möglichkeiten. Damit gewinnt die Kommunikation der elektronischen Geräte mit der Außenwelt entscheidende Bedeutung. Oftmals liegt dort die eigentliche Problemstellung, zumal mit den zunehmenden Möglichkeiten der Verarbeitung auch die Anforderungen an diese äußeren Schnittstellen gewachsen sind.

Dabei handelt es sich um zwei prinzipiell unterschiedliche Schnittstellen. Auf der einen Seite die Eingabe der Information, was das elektrische Gerät tun soll, auf der anderen Seite die Aufgabe der gewünschten Signale bzw. die Auflösung der notwendigen Aktion (*Bild 4.1*). Dabei können auf jeder Seite drei unterschiedliche Partnerschaften bestehen:

- die Umwelt,
- der Mensch,
- ein Speichermedium.

Die elektrische Messung meist nichtelektrischer Größen kommt in allen Gebieten der Technik zur Anwendung. Die Elektrotechnik und insbesondere die Elektronik bieten dafür die *Vorteile*:

- der Verstärkung,
- der Fernübertragung,
- des raschen Auswertens,
- der Anzeige mit Oszilloskopen sowie
- der Weiterverarbeitung mittels Rechnern.

Dabei kommen sowohl analoge als auch digitale Verfahren mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad zum Einsatz. Den Meßaufgaben entsprechend, existiert eine Vielzahl von speziellen Bauelementen, Geräten, Gerätekombinationen und Meßverfahren.
Enge Verknüpfungen bestehen zu den Gebieten Fernmeßtechnik, Regelungstechnik und Prozeßrechentechnik, wo die Meßeinrichtungen die zu übertragenden und zu verarbeitenden Meßwerte liefern. In diesen Fällen bestehen besonders hohe Forderungen bezüglich der Zuverlässigkeit unter den meist rauhen Betriebsbedingungen.

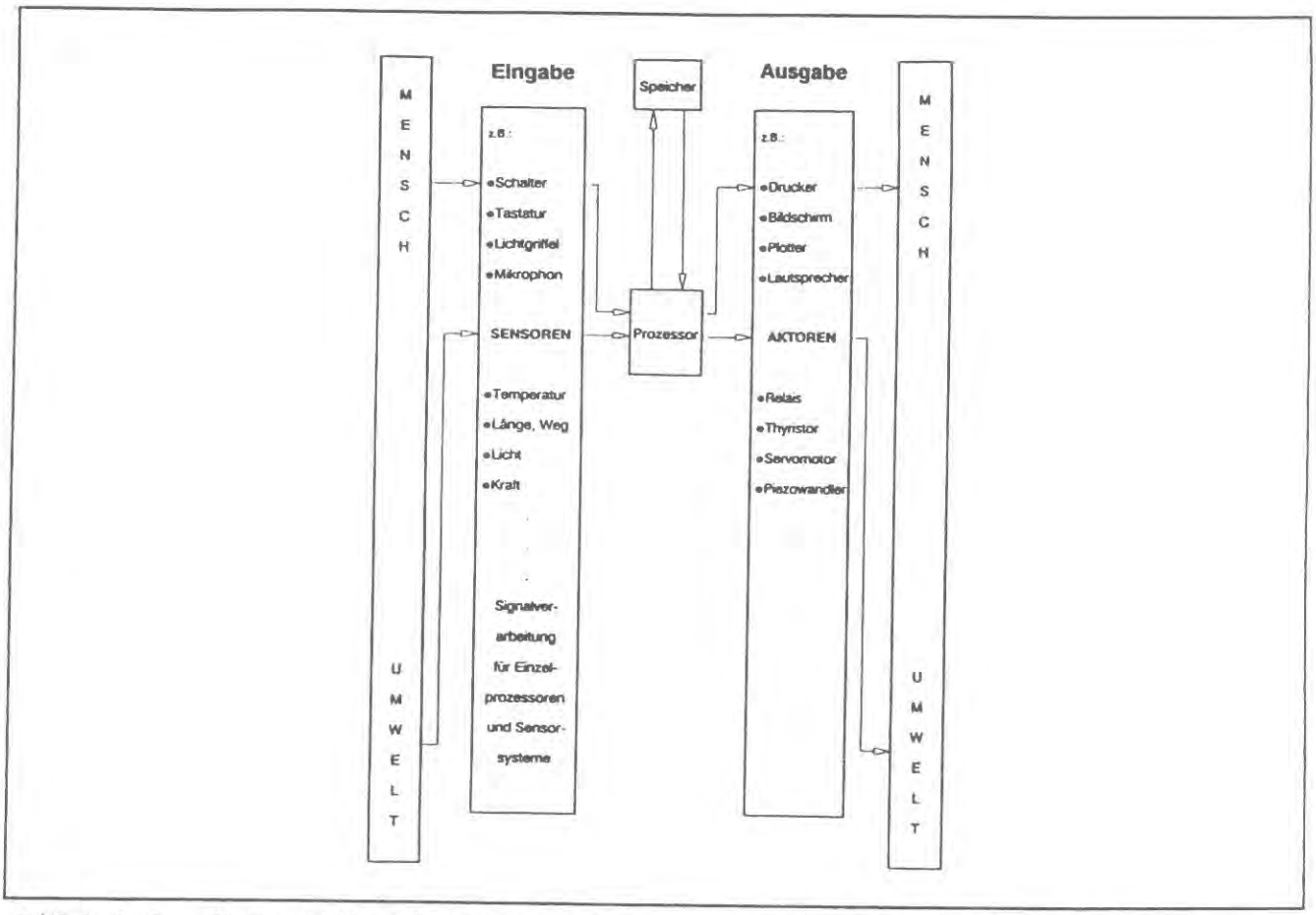


Bild 4.1 *Kommunikation der elektronischen Geräte mit der Außenwelt*

Die Aufgabe jeder Meßeinrichtung ist es, den Wert der Meßgröße zu erfassen und in ein weiterverarbeitbares Signal, das primäre Abbildungssignal, umzuwandeln. Da die Meßwerte häufig in digitaler Form benötigt und sie in Form einer analogen Spannung von den Meßeinrichtungen geliefert werden, ist die Zwischenschaltung eines Analog-Digital-Wandlers erforderlich, der nach dem Prinzip des *Digitalvoltmeters [siehe 3.3.5.2]* arbeitet. Dann können sie bequem ausgedruckt und mit Hilfe eines Kleinrechners ausgewertet werden.

4.2 MESSFÜHLER UND SENSOREN

4.2.1 Allgemeine Begriffe

Die Funktionsgruppe, welche die zu erfassende (meist) nichtelektrische physikalische Meßgröße aufnehmen und in das primäre Abbildungssignal, das in vielen Fällen von elektrischer Art ist, umwandelt, ist der Meßfühler (*in Labormeßtechnik*). Diese erste Abbildung ist dabei meist eine Transformation der Energieart des zu erfassenden Phänomens in eine andere Energieart.

Meßfühler mit mikroelektronik-kompatiblen Ausgangssignalen (gelegentlich auch ganz allgemein mit verarbeitbaren Ausgangssignalen) nennt man auch Sensoren (*Großserien*).
Die Bezeichnungen *Meßwertgeber* oder *Geber für Meßfühler* werden ebenfalls benutzt. Bei komplexeren Meßfühlern heißt das empfindliche Element *Aufnehmer* bzw. *Sensorelement*.

Über das Gebiet der Sensorik, der Signalaufnahme von der Umwelt, kann kaum ein einigermaßen klarer Überblick gegeben werden. Das liegt einerseits an der Fülle der verschiedenen, interessanten Meßdaten, seien sie mechanisch, akustisch, elektrisch, optisch oder chemisch, anderenteils daran, daß es oftmals viele verschiedene Wege gibt, wie diese Meßdaten in elektrische Signale umgewandelt werden können.

Bei der Sensorik müssen oftmals zwischen zwei Ebenen unterschieden werden: der eigentlichen physikalischen Meßwerterfassung, also dem eigentlichen Sensor, und der sich daran anschließenden ersten Aufarbeitung des Signals. Dies wird umso bedeutsamer, als für diese Aufarbeitung heute die Halbleiterlektronik mit ihren wirkungsvollen und meist auch preiswerten Möglichkeiten zur Verfügung steht.

Gerade durch diese Möglichkeiten unterscheidet sich die moderne *Sensorik* von der *klassischen Meßwerterfassung*. *Tabelle 4.1* gibt einen entsprechenden Vergleich bezogen auf die für jeden technischen Sensor entscheidenden Daten, wie Kosten, Empfindlichkeit, Linearität, Störparameter oder Art des Ausgangssignals (analog, digital) an.

Obwohl im Prinzip das gleiche erreicht werden soll, haben sich diese zwei zum Teil überlappende Domänen mit unterschiedlichem Aufgabenprofil entwickelt.

Zunächst sind naturgemäß bei einem Massenprodukt die *Kosten* entscheidender als bei einem für hochwertige Spezialaufgaben eingesetzten Fühler.

Anforderung, Eigenschaft	"klassische" Meßwertaufnehmer	Sensoren
Kosten	weniger entscheidend	entscheidend
Höhe des Ausgangssignals	möglichst hoch	weniger bedeutsam
Signal-Rausch-Verhältnis	entscheidend	entscheidend
Linearität	entscheidend	weniger bedeutsam
Störsicherheit	entscheidend	bei Digitalisierung weniger anfällig
Abhängigkeit von zusätzlichen Parametern	kaum zulässig	korrigierbar
Integrationsfähigkeit	-	sehr erwünscht
Digitalisierbarkeit	-	sehr erwünscht

Tabelle 4.1 *Gegenüberstellung Meßwertaufnehmer - Sensoren*

Um die *Kosten* zu beeinflussen, ergeben sich für die Weiterverarbeitung des Signals durch integrierte Schaltungen drei Möglichkeiten: Signalverstärkung bereitet heute kein Problem mehr. Gleichzeitig kann auch eine *Linearisierung* des Meßwertes erreicht werden. Schließlich kann die Abhängigkeit von einem zusätzlichen Parameter wie z. B. der Temperatur wieder eliminiert werden, wobei selbstverständlich dann der funktionale Einfluß bekannt sein und die Höhe über einen weiteren Sensor ermittelt werden muß.

Auch der letzte Punkt von *Tabelle 4.1*, die *Digitalisierbarkeit*, folgt aus der Wechselwirkung mit der späteren Verarbeitung. Normalerweise fällt ein Meßwert von der physikalischen Seite her analog an, und es hängt sehr von der Art seiner weiteren Verwendung ab, ob es wegen der höheren Störsicherheit in industrieller Umgebung sowie der besseren Verarbeitbarkeit notwendig oder sinnvoll ist, ihn zu digitalisieren. *Vorteile* ergeben sich aber, wenn er z. B. schon von der physikalischen Seite so erfaßt wird, daß er sich elektrisch z. B. nicht als eine Amplitude, sondern als eine Frequenz darstellt, sodaß die Perioden nur digital "gezählt" werden müssen.

Nun ist trotz dieses beträchtlich geänderten Leistungsprofils die physikalische Basis des klassischen Meßwertfühlers und des modernen Sensors nicht voneinander zu trennen, denn wenn man z. B. einen

thermischen oder magnetischen Meßwert benötigt, muß er unabhängig von der Art der Verarbeitung zunächst in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Man muß also die zu Verfügung stehenden Effekte kennen und in ihren Möglichkeiten und Grenzen bewerten.

Dem Sensor kommt für die Lösung jedes Meßproblems (und besonders für die Qualität dieser Lösung) eine große Bedeutung zu. Dies beruht darauf, daß die technische Realisierung der Umwandlung der Meßgröße in das Abbildungssignal im Gegensatz zu vielen anderen Funktionsgruppen besonders aufgabenspezifisch erfolgen muß.
Sensoren umfassen dabei heute einen sehr weiten Bereich von unterschiedlichen Arten. Dies beginnt bei einfachen Meßwertaufnehmern und reicht bis zu Meßeinrichtungen mit digitaler Verarbeitungseinheit einschließlich Mikroprozessor und zugehöriger Verarbeitungs-Software.

4.2.2 Sensorsignalverarbeitung

Der Sensor ist zwar das wichtigste, aber nur das erste Glied der Meßkette. Er liefert ein Meßsignal (im allgemeinen im Millivoltbereich), daß vor Ort mit der Sensorelektronik (*Bild 4.2*) aufbereitet wird, um es dann ungestört zum Prozessor zu übertragen.
Dabei kann das Leitungssignal:
- analog,
- zeitanalog (pseudodigital), oder
- digital sein.

Es befindet sich im allgemeinen zwischen Sensor und Prozessor ein Analog-Digital-Umsetzer, bevor das Signal im Prozessor weiterverarbeitet wird (*Bild 4.2*).
Vom *Prozessor* werden aus den angelieferten Daten Informationen über den weiteren Ablauf des Prozesses oder des Fertigungsverfahrens erzeugt. Dabei werden entweder dem Menschen Entscheidungshilfen (z. B. Text am Display) geliefert, oder es erfolgt ein direkter Eingriff durch Steuerung von Aktoren.
Zu erfolgen hat dabei die Signalaufbereitung:

- Verstärkung,
- Nullpunktkorrektur,
- Temperaturkompensation und
- Signalumsetzung in geeignetes Übergabeformat.

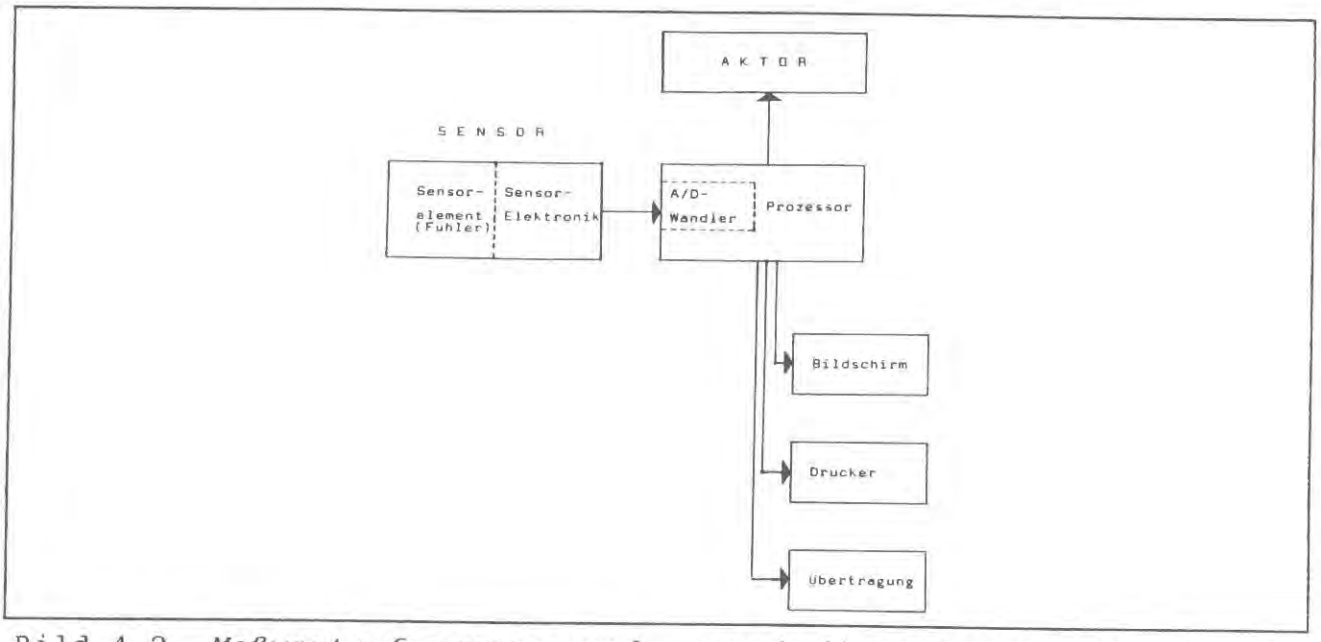


Bild 4.2 *Meßwerterfassungs- und -verarbeitungssystem schematisch*

Das *Ausgangssignal* soll nach Möglichkeit normiert sein, d. h. die Sensorempfindlichkeit soll auf vorgegebenen Wert einstellbar sein. Es bestehen hohe Anforderungen an die Sensorelektronik:

- arbeiten in rauher, störbelasteter Umgebung (wie das Sensorelement);
- Temperaturanforderungen: - 50° C bis + 150° C;
- darf nur geringe Wärme erzeugen, sodaß überwachter Prozeß nicht gestört wird;
- geringes Volumen, da Einbauraum im allgemeinen sehr knapp bemessen;
- Anzahl der Zuführungen muß minimal sein;
- Drift durch Elektronik muß klein sein in Relation zur Drift des Sensorelementes;
- Sensor soll für Massenproduktion geeignet sein, damit Kosten gering bleiben.

4.2.3 Beispiele für Sensoren durch Nutzung physikalischer Effekte

Tabelle 4.2 gibt in Form eines Überblicks einige Beispiele für Sensoren in Abhängigkeit von der jeweils zu ermittelnden Meßgröße.

Meßgröße	Sensoren
Temperatur	Bimetall-Schalter NTC-Widerstand (Heißleiter) PTC-Widerstand (Kaltleiter)
Weg,Länge,Ort	Nockenschalter optische Abtastung Dehnungsmeßstreifen Ultraschall-Reflexschranke
Drehzahl	Nockenschalter optische Abtastung Tachogenerator
Magnetfeld	magnetfeldabhängiger Widerstand Hall-Generator
Helligkeitsänderung	Fotodiode Fototransistor Fotowiderstand
Luftdruck	Silizium-Brückensensor
Luftfeuchtigkeit	kapazitiver Feuchtigkeits-Sensor

Tabelle 4.2 *Beispiele von Sensoren*

4.2.4 Unterscheidung

Nach der Art der Energiewandlung lassen sich Sensoren als *passive* oder *aktive Energiewandler* unterscheiden. Im Hinblick auf die Meßsignalbildung ist es aber anschaulicher, zwischen

- rezeptiv und
- bearbeitend zu unterscheiden.

4.2.4.1 Rezeptive Sensoren

Der Sensor wirkt als passiver Energiewandler und es wird die Energie der Meßgröße direkt in andersartige Energie umgeformt. Das Signal wird also lediglich aufgenommen und umgewandelt. Daher ist es besser diese Art als rezeptiven Sensor zu bezeichnen.
Für den Betrieb von rezeptiven Sensoren ist keine Zuführung von Hilfsenergie notwendig.

4.2.4.2 Bearbeitende Sensoren

Dabei wirkt der Sensor aktiv und es wird die Energie der Meßgröße zur Steuerung eines Signals aus einer anderen Quelle verwendet. Es erfolgt also eine Signalbearbeitung und man bezeichnet daher diesen Typ als signalbearbeitenden oder bearbeitenden Sensor ("*signal conditioning sensor*"). Man sagt auch, daß das Meßsignal noch konditioniert werden muß.
Bei diesem Sensortyp enthält der Sensor sozusagen einen Sender. Dadurch ist freie Parameterwahl mit höherer Flexibilität und eine erste Verstärkerstufe möglich.

4.3 GRUNDLEGENDE BAUFORMEN VON WEGAUFNEHMERN

Bei den meisten Wegmeßaufgaben muß man die Bewegung eines Körpers gegenüber einem anderen Körper erfassen, z. B. die Bewegung eines Maschinenteils gegenüber einem Maschinenchassis, also einen *Relativweg* messen. In diesem Fall verbindet man z. B. die Tastspitze eines Wegaufnehmers mit dem einen, sein Gehäuse mit dem anderen Körper.
In der Schwingungsmeßtechnik mißt man im Gegensatz dazu oft den *Absolutweg*, in dem man sich, unter gewissen Voraussetzungen, auf den Ort einer größeren trägen Masse bezieht.

4.3.1 Potentiometeraufnehmer

Die Bewegung eines Schleifkontaktes entlang einer Widerstandsbahn wird beim Potentiometeraufnehmer ausgenutzt. Durch Anlegen einer Speisespannung an das Potentiometer erhält man eine wegabhängige Spannungsteilung, wobei im Belastungsfall die in *Abschnitt 3.1.6.4* erwähnten Linearitätsprobleme zu beachten sind. Ergänzt man das Potentiometer zu einer Brückenschaltung, so kann je nach Einstellung des Kompensationszweiges der Brückenschaltung eine beliebige Stellung des Meßpotentiometers als Nullstellung definiert werden, indem man dafür die Brückenausgangsspannung zu Null macht.

4.3.2. Kapazitive Aufnehmer

Kapazitive Aufnehmer setzen Wegänderungen in Kapazitätsänderungen von Plattenkondensatoren um. Sie arbeiten verschleißfrei, sind einfach herzustellen, sehr genau vorausberechenbar, benötigen kleine Meßkräfte und sind auch für hohe Temperaturen extrem empfindlich. Obwohl sie diese verschieden großen Vorteile besitzen, werden sie nur in Sonderfällen benutzt, da den Vorteilen gegenüber zwei schwerwiegende *Nachteile* stehen: ihre Kapazitäten liegen in gleicher Größenordnung wie die der notwendigen Zuleitungskabel (kurze Leitungen), was leicht zu großen Fehlereinflüssen führen kann, und ihr Scheinwiderstand ist im Niederfrequenzbereich sehr hoch, sodaß nachfolgende Anpaßschaltungen sehr hohe Eingangsimpedanzen haben müssen.
Kapazitive Aufnehmer sind daher nur dann einsetzbar, wenn man sie unmittelbar am Meßort mit einem Anpaßverstärker hohen Eingangswiderstandes oder mit einem als Kapazitäts-Frequenz-Umformer arbeitenden Oszillator kombinieren kann.

Bei der *Anwendung* von kapazitiven Wegaufnehmern kann der Abstand der Platten oder die Fläche der Platten wegabhängig verändert werden, oder es wird das Dielektrikum zwischen den Platten verschoben (*Bild 4.3*).

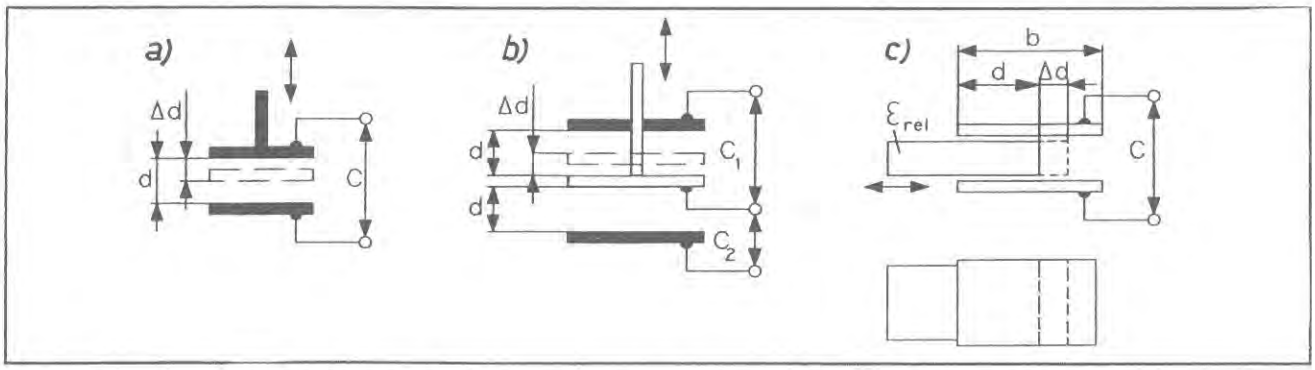


Bild 4.3 *Ausführungsformen von kapazitiven Aufnehmern*

Bei den Ausführungen nach *Bild 4.3 a) und b)* wird der Meßpunkt mit einer beweglichen Platte, bei *c)* mit dem beweglichen Dielektrikum gekoppelt. Dielektrische Wegaufnehmer haben den besonderen Vorteil, daß der bewegliche Teil keine Anschlußelektrode benötigt.

Für die einzelnen Bauformen ergibt sich näherungsweise Proportionalität der Kapazitätsänderung ΔC zur Verschiebung Δd. Für die Anordnung nach *Bild 4.3 a)* gilt etwa:

$$\Delta C/C = \Delta d/d$$

Die *Proportionalität* ist allerdings bei Aufnehmern mit Abstandsänderung nur für kleine Verschiebungen bis 1 mm (Linearitätsfehler 1 bis 3 %) gesichert. Aufnehmer mit Flächenänderung sind für größere Wege, einige cm geeignet und lassen sich leicht mit linearer oder beliebig nichtlinearer Kennlinie als sogenannte Funktionskondensatoren ausführen.

Auch *Drehkondensatoren* in zweipoligen und Differentialausführungen werden als Aufnehmer benutzt. Durch entsprechende Ausführung läßt sich gute Proportionalität zwischen dem Drehwinkel und $\Delta C/C$ erreichen.
Die Kapazitätsänderungen werden in der Regel mit wechselspannungsgespeisten Brückenschaltungen gemessen. Die Teilkondensatoren der Differentialausführungen werden in zwei benachbarte Brückenzweige gelegt. Dadurch können die Proportionalitätsfehler kompensiert werden, sodaß auch sehr kleine Verlagerungen (im Mikrometerbereich) erfaßt werden können.

4.3.3 Induktive Aufnehmer

Induktive Wegaufnehmer sind im Gegensatz zu Potentiometer-Aufnehmern robust, verschleißfrei und nicht mit Kontaktproblemen behaftet, wodurch sie in großer Zahl angewendet werden.

Das Meßobjekt wird bei induktiven Aufnehmern mit einem verschiebbaren oder drehbaren Weicheisenkern gekoppelt, der seinerseits *Induktivitäts-* bzw. *Gegeninduktivitätsänderungen* an Spulen hervorruft. Sowohl einfache als auch Differentialspulen, die mit Wechselstrom gespeist werden, kommen zur Anwendung.

Die **Spulenform** wird für die Anpassung der Empfindlichkeit des Meßsystems benutzt. *Röhrenförmige Spulen* haben einen flachen Gradienten (*Bild 4.4 a*), sie sind daher zum Messen größerer Längen geeignet. Durch konstruktive Gestaltung kann eine weitgehend lineare

Abhängigkeit der Induktivitätsänderung vom Weg erreicht werden, der bis zu 80% der Spulenlänge betragen kann.

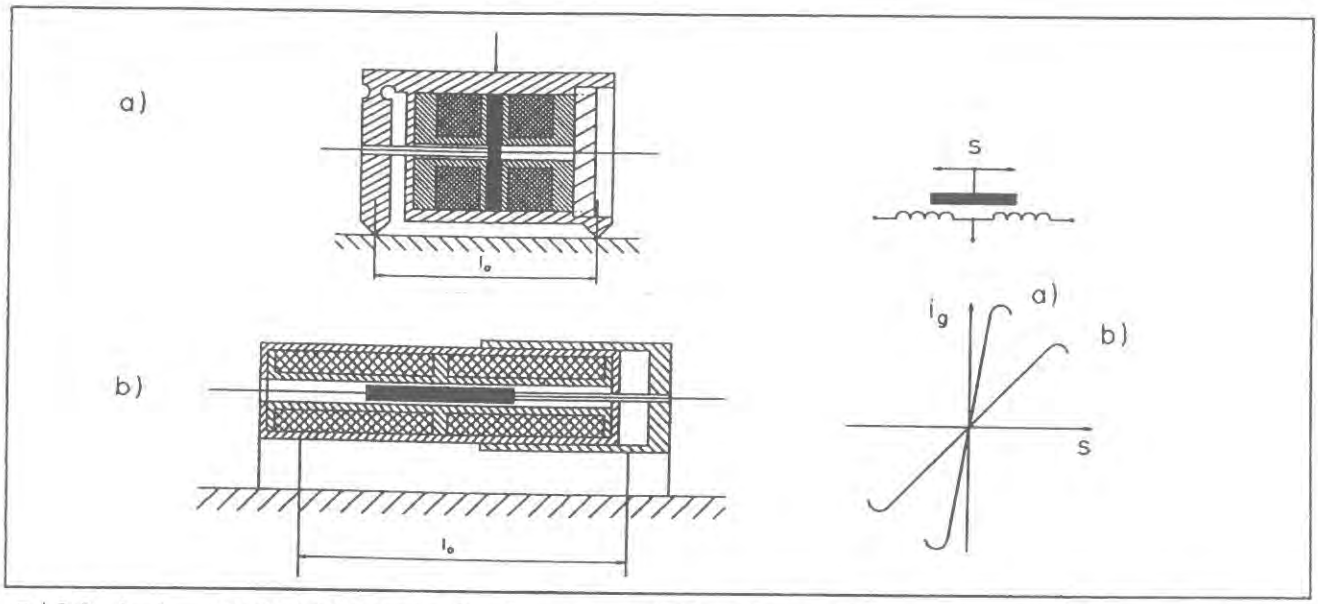


Bild 4.4 *Induktive Aufnehmer und Verlauf der Meßgröße i_g, abhängig vom Weg* a) *des Querankers bei scheibenförmigen Spulen*
b) *des Tauchankers bei röhrenförmigen Spulen.*

Im Gegensatz dazu haben *scheibenförmige Spulen* eine steile Charakteristik mit großem Übertragungsfaktor (*Bild 4.4 b*). Der induktive Aufnehmer mit Queranker dient zur Messung kleiner Wege und Wegänderungen (bis etwa 1mm). Um eine möglichst große Empfindlichkeit und eine günstige Charakteristik zu erhalten, wird der Geber meist als Doppeldrossel mit Luftspalten ausgebildet.

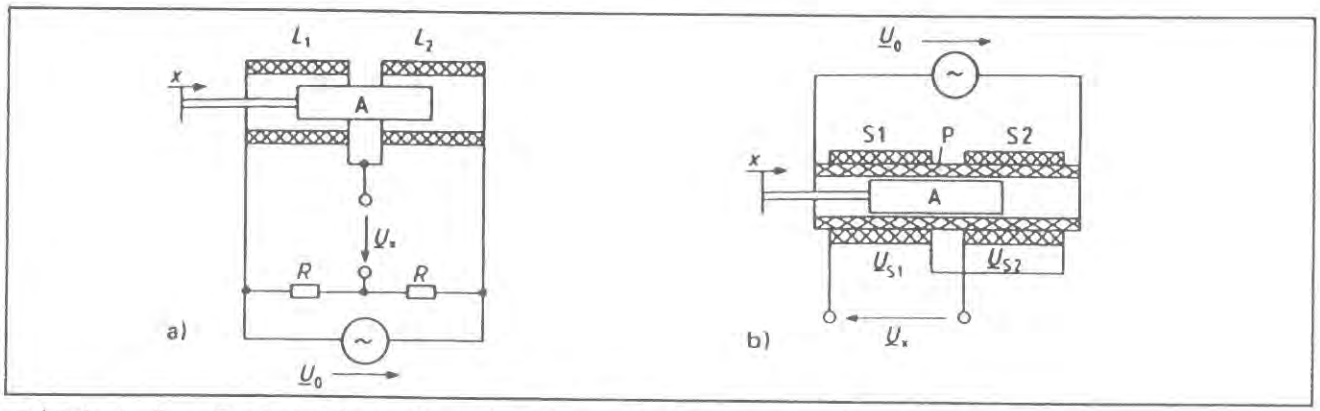


Bild 4.5 *Induktive Tauchanker-Aufnehmer für Linearwege*
a) *Differentialdrossel*
b) *Differentialtransformator*

Die Ausführung nach *Bild 4.5 a)* zeigt das Prinzip eines *Differential-Tauchanker-Aufnehmers*, dessen Induktivitätsänderung mit einer Brückenschaltung gemessen wird. Im Inneren zweier

zylinderähnlicher Spulen L_1 und L_2 bewegt sich ein Tauchanker aus ferromagnetischem Material. In Mittelstellung dieses Ankers sind beide Induktivitäten gleich groß. Bewegt sich der Anker A nach rechts, so wird L_2, die Induktivität der Spule 2, größer und L_1 kleiner. Ergänzt man das Spulenpaar zu einer Brückenschaltung, so ist diese im Idealfall in Mittelstellung des Ankers abgeglichen, während man für eine nach links oder rechts verschobene Ankerstellung eine Brückenausgangsspannung erhält. Diese Brückenausgangsspannung (*Bild 4.6*) ist in einem Fall gegenphasig, im anderen Fall gleichphasig zur Speisespannung der Brückenanordnung.

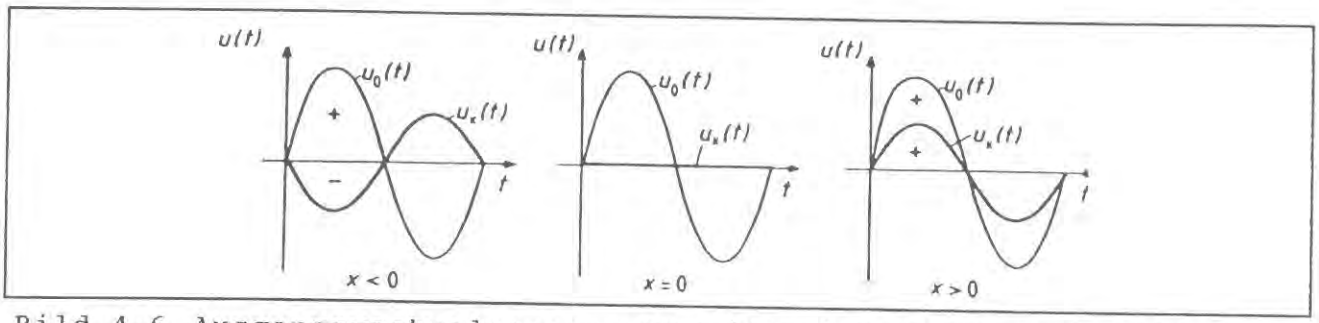


Bild 4.6 *Ausgangswechselspannungen einer Schaltung nach Bild 4.5 a) oder b) für verschiedene Ankerpositionen im Vergleich zur Speisewechselspannung*

Wünscht man ein dem Vorzeichen der Ankerverschiebung entprechendes Gleichspannungssignal, so muß das Brückenausgangssignal einem phasenselektiven Gleichrichter zugeführt werden.
Das Prinzip eines *Differentialtransformator-Tauchanker-Aufnehmers* ist im *Bild 4.5 b)* dargestellt. Dieser besteht aus einer wechselspannungsgespeisten Primärspule P und zwei Sekundärspulen S1 und S2. In Mittelstellung des Ankers A wird in beiden Sekundärspulen die gleiche Spannung induziert. Schaltet man sie gegensinnig in Reihe, wie im *Bild 4.5 b)*, so ist die Ausgangswechselspannung der Gesamtanordnung in Mittelstellung des Ankers wieder Null. Bei Verlagerung in der einen oder anderen Richtung ergeben sich wiederum Ausgangswechselspannungen, die zur Speisespannung gegenphasig oder gleichphasig sind - je nach Richtung der Verlagerung - und dann ebenfalls durch einen phasenselektiven Gleichrichter in zugeordnete negative oder positive Gleichspannungssignale umgewandelt werden können.

Allgemein ist mit den Differentilanordnungen eine bessere Linearität zwischen Verschiebung und resultierender induzierter Spannung zu erreichen.

4.4 KRAFT- UND DRUCKSENSOREN

4.4.1 Piezowiderstandseffekt

4.4.1.1 Allgemeines

Der Piezowiderstandseffekt beschreibt die Änderung des elektrischen Widerstands als Folge von mechanischen Spannungen (Zug- oder Druckbelastung). Dabei lassen sich zwei verschiedene Arten (*Bild 4.7*) unterscheiden, der longitudinale und der transversale Effekt.

σ_L , σ_T ... mechanische Spannungen

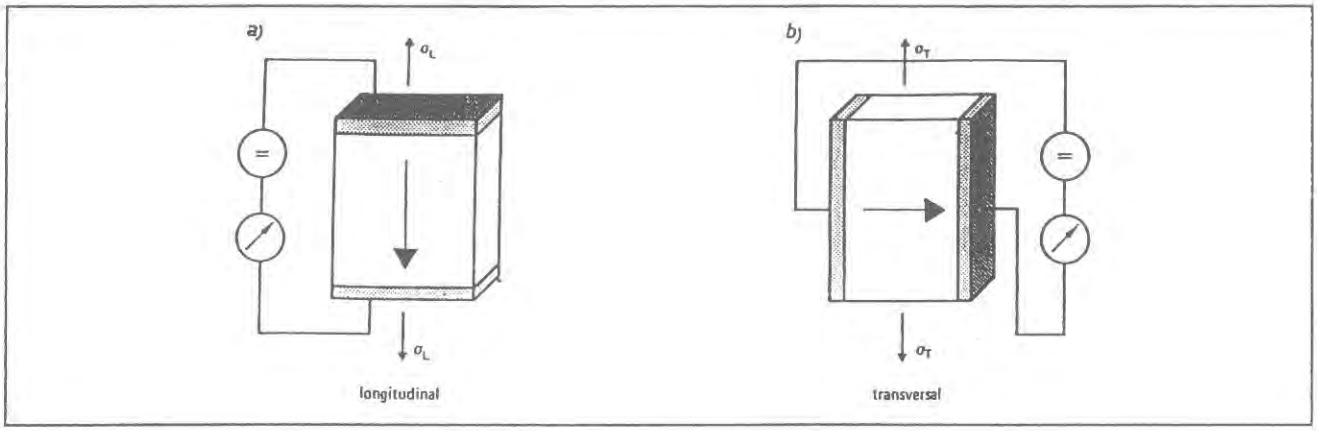


Bild 4.7 *Piezowiderstandseffekt*
a) *longitudinaler Effekt*
b) *transversaler Effekt*

Beim *longitudinalen Effekt* fließt der elektrische Strom in Richtung der mechanischen Spannung, beim *transversalen Effekt* senkrecht hiezu.

Der Piezowiderstandseffekt wirkt nicht nur dynamisch, sondern auch statisch und kann bei bearbeitenden Sensoren ausgenutzt werden. Er tritt auch auf an Kristallen ohne polare Achsen und ist besonders gut ausgeprägt bei Halbleitern, wie z. B. bei Silizium.

4.4.1.2 Dehnungsmeßstreifen (DMS)

Technisch wird der Piezowiderstandseffekt bei Dehnungsmeßstreifen genutzt. Da sich der Widerstand eines Leiters unter Einfluß einer mechanischen Verformung ändert, kann der Leiter selbst bereits als *Kraft- oder Drucksensor* eingesetzt werden.

In der Praxis ist der Leiter als dünne Schicht ausgeführt, welche über eine elektrisch isolierende Zwischenschicht an einem Verformungs- oder Federkörper befestigt wird. Die elastische Verformung des Körpers soll dabei möglichst unverändert auf den Dehnungsmeßstreifen übertragen und durch diesen gemessen werden. Dehnungsmeßstreifen sind sehr billige Meßwandler und werden im allgemeinen beim Abnehmen vom Meßobjekt zerstört.

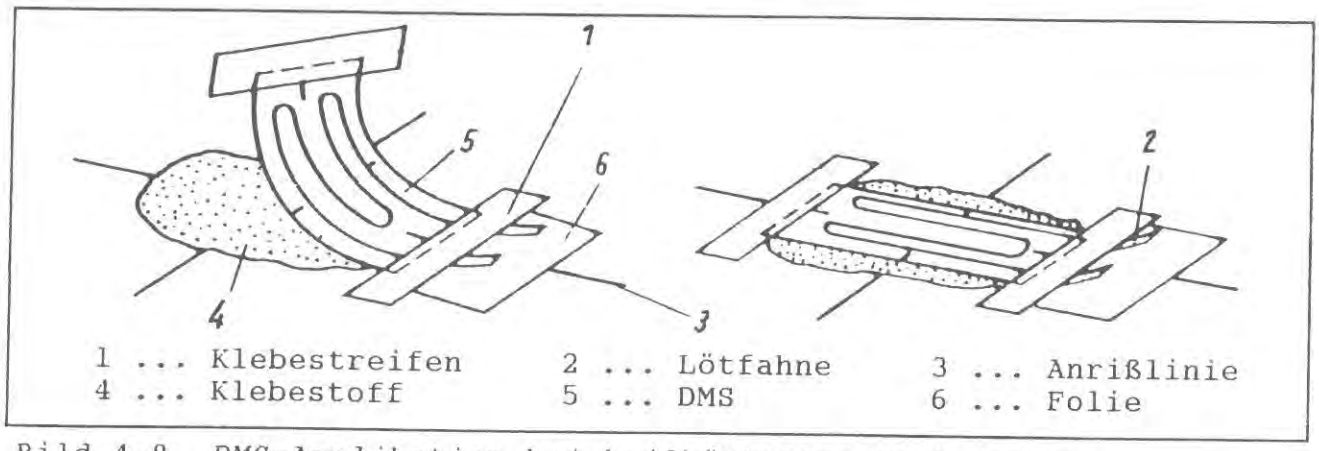


Bild 4.8 *DMS-Applikation bei heißhärtenden Klebstoffen*

Dehnungsmeßstreifen werden in unterschiedlichen Fabrikaten angeboten. Sie bestehen entweder aus Metall, wie z. B. aus Konstantan (NiCr-Legierung), Chrom-Silizium-, Platin-Iridium- und weiteren Legierungen, oder es sind dünngeätzte Streifen aus einkristallinem Silizium. *Bild 4.9* zeigt übliche Ausführungen.

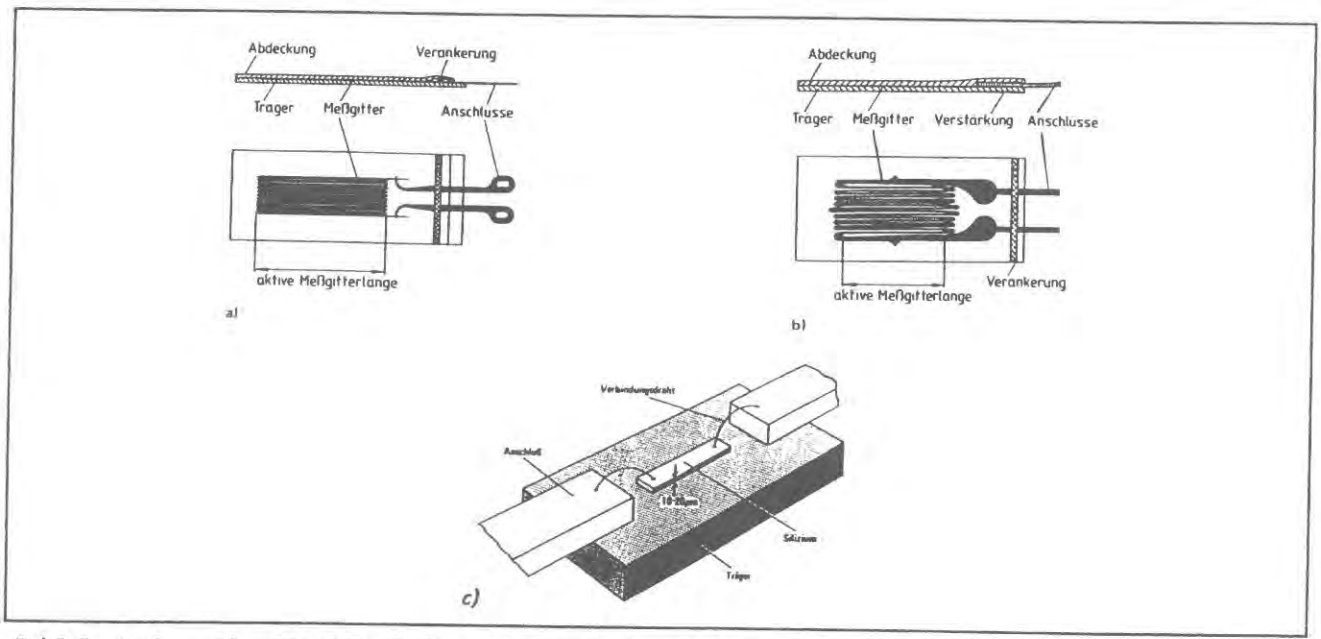


Bild 4.9 a) *Draht-Dehnungsmeßstreifen*
b) *Folien-Dehnungsmeßstreifen*
c) *Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen*

4.4.1.2.1 Metall-Dehnungsmeßstreifen

Wegen der für eine meßbare Widerstandsänderung erforderlichen großen Drahtlänge wird der Draht mäanderförmig auf einen Träger aus getränktem Papier oder Kunststoffharz aufgeklebt, oder es wird nach einem photochemischen Ätzverfahren aus einer auf einem Kunstharzträger befindlichen dünnen Metallschicht ein Mäander hergestellt. Man unterscheidet *Draht-Dehnungsmeßstreifen* und *Folien-Dehnungsmeßstreifen* (*Bild 4.9 a)* und *b)*).

Durch Strecken oder Stauchen eines Drahtes ändern sich seine Länge, seine Querschnittsfläche und sein spezifischer Widerstand. Von den drei widerstandsbestimmenden Größen eines Leiters ist also keine als konstant anzusehen. Die Änderungen sind richtungsabhängig und im elastischen Bereich proportional der wirksamen Beanspruchung.

Das Meßobjekt, auf dem der DMS fest aufgeklebt ist, wird um

$$\Delta l / l_0 = \varepsilon$$

gedehnt bzw. gestaucht. Dadurch ändert sich der Widerstand R um

$$\Delta R = k.\varepsilon.R$$

Die *Empfindlichkeit k*, auch k-Faktor genannt, hängt vor allem vom Widerstandsmaterial ab. Für Konstantan ist dabei der k-Faktor etwa 2.

Da die Dehnung ε des DMS möglichst auf den elastischen Bereich eingeschränkt werden sollte, darf auch bei Werkstoffen mit einer ausgeprägten Streckgrenze in der Regel ein Wert von 0,1 % nicht überschritten werden.
Als meßtechnische Schwierigkeit kommt hinzu, daß wegen des niedrigen spezifischen Widerstandes von Metallen die Widerstände niedrige Werte annehmen. Die Länge des DMS wird durch die Mäanderform geometrisch vergrößert, sodaß z. B. ein Standardwert von 350 Ohm erreicht wird. Bei der praktischen Messung muß der Einfluß des Zuleitungswiderstandes berücksichtigt werden. Aus diesem Grund werden die Metall-DMS wegen des Ausgleichs von Abweichungen innerhalb der Toleranzen meist in Brückenschaltungen eingesetzt (*Bild 4.10 a)* und *b)*). Man braucht dann vier Exemplare mit möglichst gleichen Eigenschaften und auch gleicher Dicke. Verwirklichen läßt sich dies in idealer Weise mit Hilfe der Technik der integrierten Schaltungen.

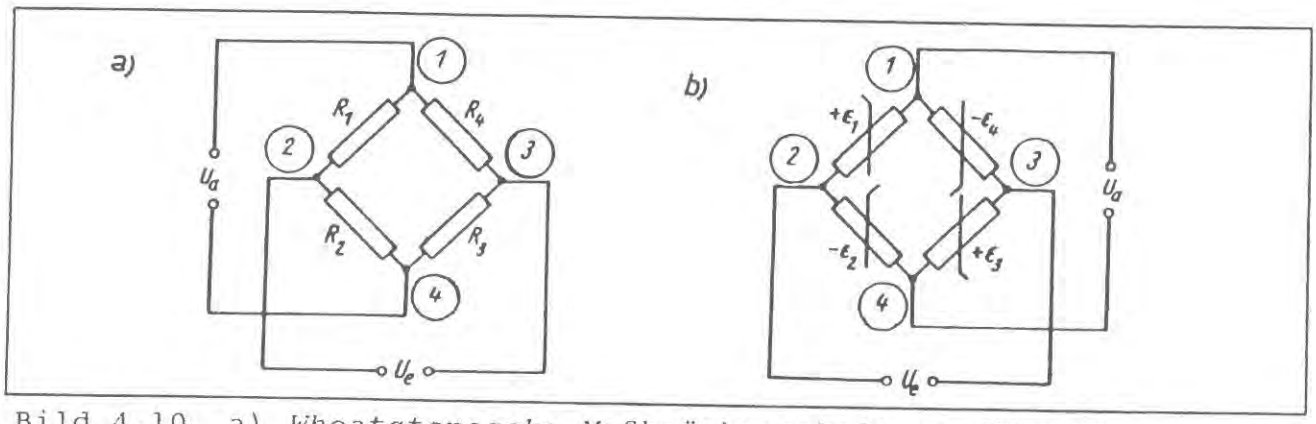


Bild 4.10 a) *Wheatstonesche Meßbrückenschaltung für DMS*
b) *DMS-Anordnung in der Meßbrückenschaltung bei unterschiedlicher Dehnung*

4.4.1.2.2 Halbleiter-DMS

Die Halbleiter-DMS (*Bild 4.9 c)*) haben gegenüber den Metalldehungsmeßstreifen den *Vorteil*, daß außer der Formänderung besonders der spezifische Widerstand einer starken Änderung unterliegt. Der k-Faktor kann daher Werte annehmen, die 180 und größer sind, sodaß die Sensorempfindlichkeit gesteigert werden kann. Angesichts der grundsätzlich kleinen Meßsignale von Metall-DMS entsteht dadurch ein beachtlicher Vorteil, der in den letzten Jahren das Interesse an Halbleiter-DMS kontinuierlich gesteigert hat.

Die entsprechenden Dehnungsmeßstreifen werden *in einem monokristallinen Halbleiterkörper hergestellt*. Da sich dünne monokristalline Schichten nur mit großem Aufwand herstellen lassen und wegen der Sprödigkeit der Halbleiter sehr bruchgefährdet sind (z. B. dürfen Silizium-DMS nur bis zu 20 µm dick sein), wird meistens eine andere Technik realisiert als bei den Metall-DMS: Die Halbleiter-DMS werden als dünne (z.B. p-leitende) Schicht in monokristalline Halbleiter-Federkörper (z. B. n-leitend) eindiffundiert, wobei die elektrische Isolation über die Sperrschicht des pn-Übergangs erfolgt.
Mit der Technik der integrierten Schaltungen können so beliebige Anordnungen von Strukturen aus Widerständen geschaffen werden (*Bild 4.11*). Dabei ergibt sich die Schwierigkeit, die dünne Siliziummembrane so einzuspannen, daß keine Hysterese auftritt. Daher wird auch der Tragring für die Membrane bei der Herstellung monolithisch in die Integration einbezogen.

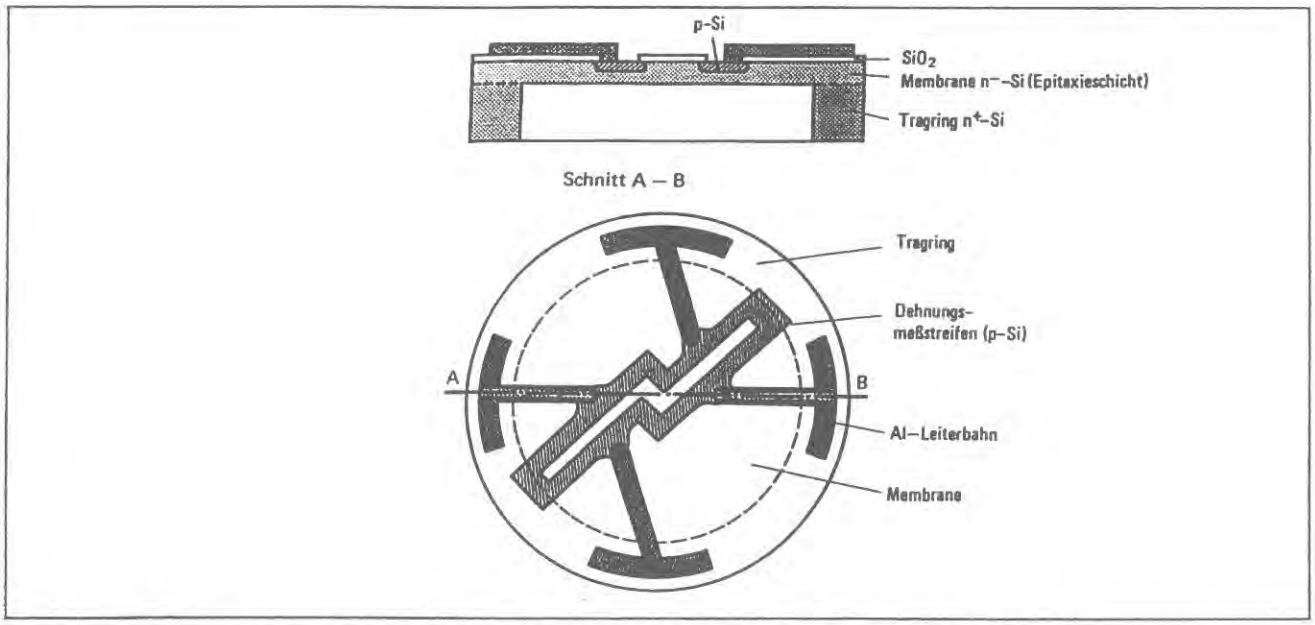


Bild 4.11 *Membrane mit integrierten Dehnungsmeßstreifen*

Nachteilig wirkt sich aus, daß sowohl der spezifische Widerstand als auch der Piezowiderstandseffekt stark von der *Temperatur* abhängen, was eine externe Temperaturkompensation erforderlich macht. Die Sperrwirkung der pn-Isolation läßt oberhalb von 150°C zunehmend nach. Weiters müssen die Halbleiterkristalle in *drucksichere Gehäuse* eingebaut werden, dabei kann eine aufwendige mechanische Verbindungstechnik erforderlich werden. Bei starker mechanischer Überbelastung führt der Sprödbruch des Halbleiterwerkstoffs zu einem Ausfall des Sensors.

4.4.1.2.3 Keramische Dehnungsmeßstreifen

Im Prinzip können für die Herstellung von Dehnungsmeßstreifen auch gut leitfähige keramische Werkstoffe, wie z. B. Titannitrit (TiN) und Titanoxinitrit ($TiO_x N_y$), eingesetzt werden, obwohl über deren piezoresistive Eigenschaften bisher relativ wenig bekannt ist. Die Herstellung dünner Schichten kann durch Synthese der keramischen Verbindung über *reaktive Sputterverfahren* erfolgen.

Ein grundsätzliches Problem bei der Synthese der Keramiken über reaktive Sputterverfahren ist die Einhaltung vorgegebener stöchiometrischer Verhältnisse der beteiligten Reaktionspartner.

Weiterhin störend ist bei Titankeramiken die hohe Affinität gegenüber Verbindungen mit Sauerstoff. Deshalb ist eine sehr sorgfältige Kontrolle der Herstellungsparameter und eine hermetisch dichte Passivierung gegenüber dem Eindringen von Luftsauerstoff erforderlich. Möglicherweise liefern in der Zukunft andere keramische Verbindungen und Herstellungsverfahren dafür bessere Randbedingungen.

4.4.1.2.4 Anwendungen

Die Anwendung von Dehnungsmeßstreifen in diskreter oder in integrierter Form ist immer dann sinnvoll, wenn mechanische Größen elektrisch gemessen werden sollen. Die wichtigsten Fälle sind:

- Dehnungsmessungen,
- Wegmessungen,
- Torsionsmessungen,
- Kraftmessungen,
- Beschleunigungsmessungen,
- Druckmessungen.

Bei **Dehnungsmessungen** werden diskrete Dehnungsmeßstreifen oder integrierte Dehnungsmeßstreifen auf das zu untersuchende Objekt gekittet. Von den verschiedensten Anwendungen sollen hier nur zwei genannt werden: Dehnungsmessungen an Brückenbauten und an Maschinenteilen.

Die **Wegmessung** kann auf eine Dehnungsmessung zurückgeführt werden, z. B. durch das Messen der Verspannungen einer Feder.

Bei **Torsionsmessungen** werden Dehnungsmeßstreifen auf einen Drehstab gekittet. Es lassen sich aber auch ganze Torsionsstäbe aus Silizium mit integrierten Dehnungsmeßstreifen herstellen. An dem Torsionsstab werden die Schubspannungen mit Dehnungsmeßstreifen gemessen, die einander radial gegenüberliegen.

Eine wichtige Anwendung ist die **Kraftmessung** (*Bild 4.12*). Ein Biegebalken aus Silizium mit integrierten Dehnungsmeßstreifen kann zur Kraftmessung bei einer Waage herangezogen werden.

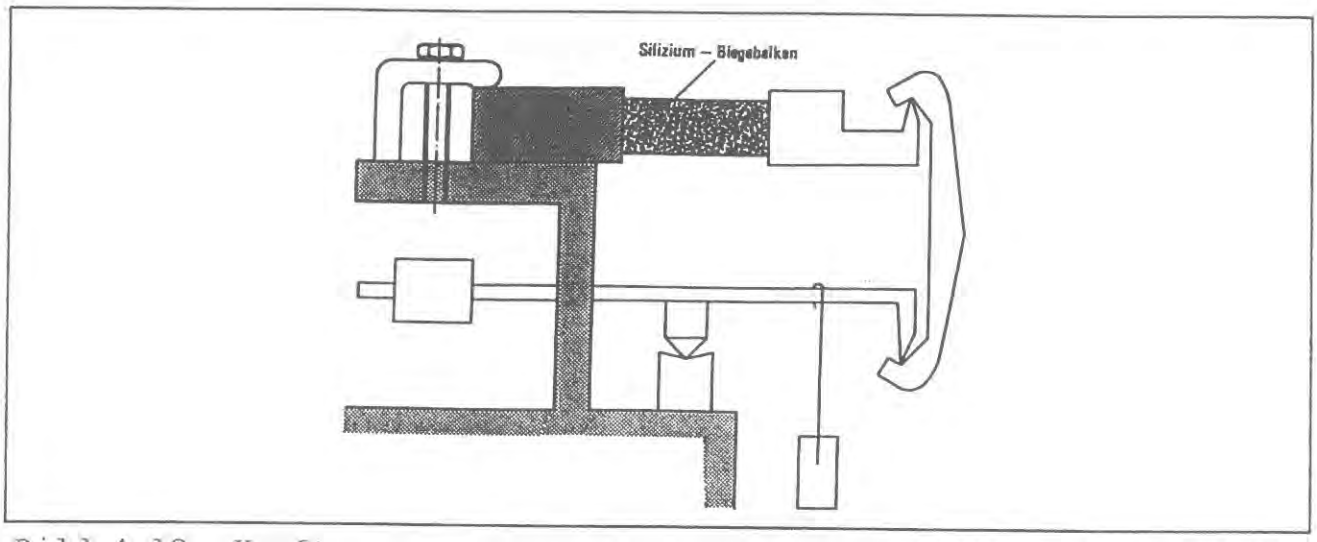


Bild 4.12 *Kraftmessung; Waage mit Biegebalken*

Beschleunigungsmessungen können auf Kraftmessungen zurückgeführt werden. Man muß zu diesem Zweck nur eine Beschleunigungsmasse (*seismische Masse*) mit einem Kraftmesser verbinden. Die Beschleunigung ist proportional zur Kraft bei konstanter Masse.

Besonders wichtig ist die Anwendung für **Druckmessungen.** Nicht nur der Druck einer Flüssigkeit oder eines Gases kann mit einem integrierten Druckmesser gemessen werden, sondern auch alle vorher genannten Arten von mechanischen Größen sind durch geeignete Vorrichtungen in einen Druck transformierbar. Ihre am meisten verbreiteten Anwendungen finden Druckmesser bei *Durchfluß- und Mengenmessungen.* Beide treten in den verschiedensten Formen in der Industrie auf, z. B. in der Chemie und in den Kraftwerken. Das Beispiel eines Absolutdruckaufnehmers zeigt *Bild 4.13.*

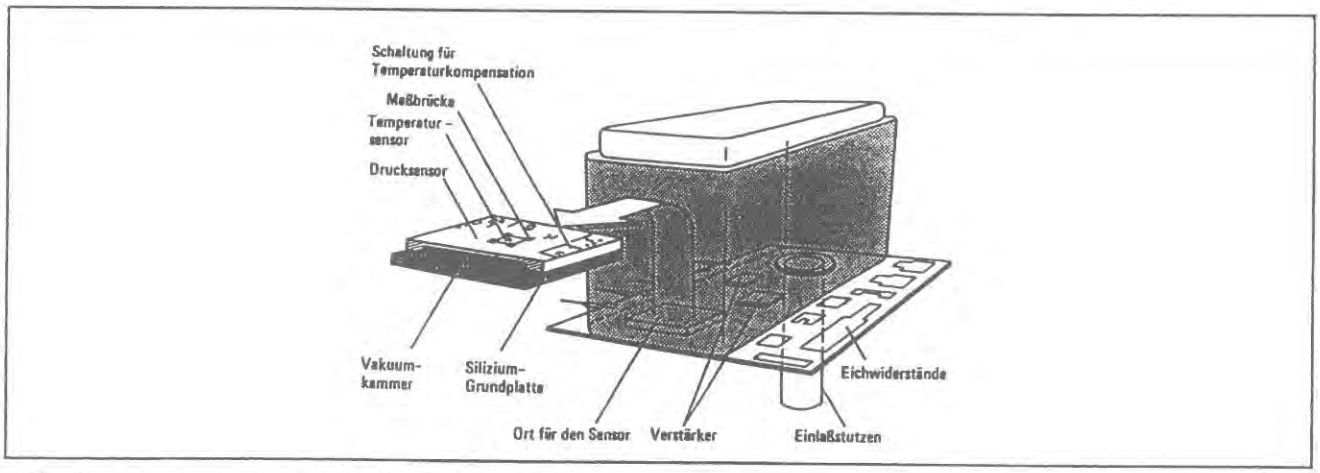


Bild 4.13 *Absolutdruckmesser; Hybridaufbau mit Verstärkern, Drucksensor vergrößert herausgeführt dargestellt*

Das Gas oder die Flüssigkeit fließen in einem Rohr, welches mit einer Normblende verengt ist. Vor der Blende herrscht ein höherer Druck als hinter der Blende. Der Differenzdruck ist ein Maß für die durchfließende Menge. Er kann auf einfache Weise mit integrierten Drucksensoren gemessen werden.

Da integrierte Drucksensoren sehr klein sind, kann dem zufolge der gesamte Sensoraufbau sehr klein gehalten werden. In extremer Weise ist dies bei biomedizinischen Anwendungen erforderlich. Dabei ist vor allem die Blutdruckmessung von großem Interesse. Sensoren mit integrierten Druckmessern können so klein hergestellt werden, daß ihr Außendurchmesser unter 1 mm liegt. Mit einem Katheder lassen sich daher Miniaturdruckmesser sogar in die Adern von lebenden Wesen einführen.

4.4.2 Piezoelektrizität

4.4.2.1 Piezoelektrischer Effekt

Wirkt eine mechanische Beanspruchung auf einen Kristall, so verschieben sich die Atome gegeneinander. Es ändern sich die Gitterkonstanten und auch die Struktur der Leitungs- und Valenzbänder. Haben die Kristalle polare Achsen, so tritt Piezoelektrizität auf, d. h. unter Druck entstehen Ladungen auf Elektroden, die mit den Kristallen verbunden sind. Der Piezoeffekt wirkt nur dynamisch, weil äußere Ladungen immer rasch gegenkompensiert werden. Sensoren, die ihn verwenden, sind rezeptive Sensoren.

Die Wirkungsweise der piezoelektrischen Sensoren beruht also auf der Eigenschaft einiger kristalliner Stoffe, auf der Oberfläche elektrische Ladung zu bilden, wenn man sie elastischen Spannungen unterwirft. Dies ist der **Piezoeffekt**, der bei Materialien, wie z. B. Quarz, Lithiumniobat, Piezokeramik, Piezopolymere, auftritt.
Die piezoelektrischen Aufnehmer sind für die Messung schnell verlaufender Vorgänge besonders geeignet, da die Ladung praktisch ohne Verzögerung gebildet wird.

Für Meßzwecke wird fast nur *Quarz* (SiO_2) verwendet, da dieses Material eine sehr geringe Temperaturabhängigkeit aufweist und wegen seines hohen Elastizitätsmoduls von etwa 8.10^{10} N/m² eine praktisch weglose Messung gestattet. Quarzkristalle sind sechseckige Prismen (*Bild 4.14*).

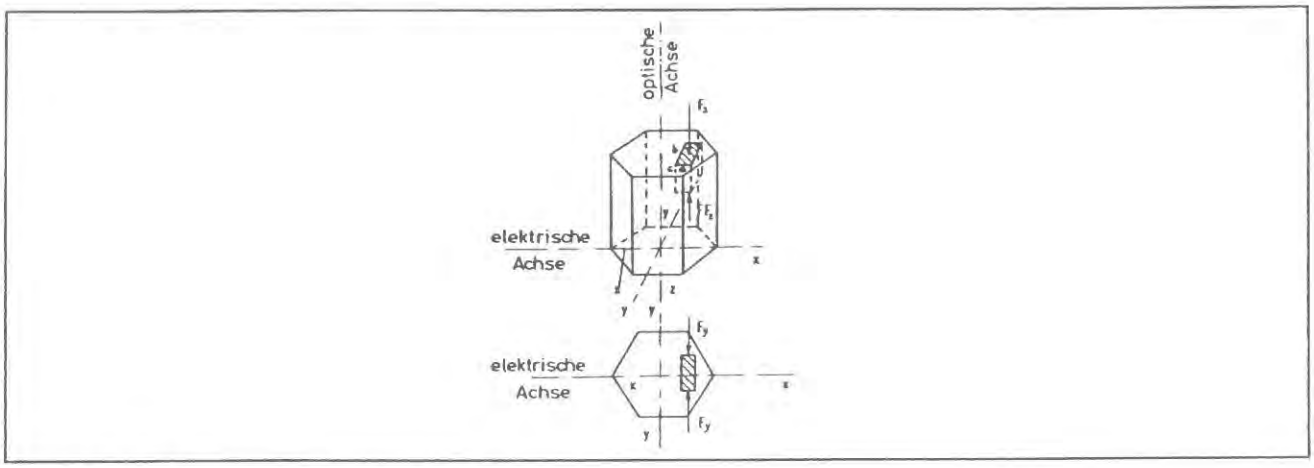


Bild 4.14 *Quarzkristall*

Man unterscheidet eine Längsachse zz, auch *optische Achse* genannt, eine *elektrische Achse* xx, die durch die Prismenkanten verläuft und eine *neutrale* oder *mechanische Achse* yy, die durch die Mitten der gegenüberliegenden Kristallflächen verläuft.
Ein aus einem Quarzkristall herausgeschnittener Quader, dessen Flächen senkrecht zu den Achsen yy und xx verlaufen, hat piezoelektrische Eigenschaften.
Eine Kraft in Richtung der Achse zz des Quaders ruft keine Ladung hervor, eine Zug- oder Druckkraft in Richtung der elektrischen Achse xx erzeugt Ladungen entgegengesetzter Polarität an den senkrecht zu dieser Achse stehenden Flächen (*Longitudinaleffekt*).
Diese Ladung beträgt:

$$Q_x = d.F_x$$

Q_x ... Ladung
d .... Konstante (Piezomodul)
F_x ... Kraft auf die Fläche

Q_x ist also von den Abmessungen des Quarzes unabhängig.
Eine Beanspruchung in Richtung einer neutralen Achse verursacht eine Ladung Q_y, die beim *Transversaleffekt* von den Abmessungen des Quarzes in x und y Richtung abhängt. Aus Festigkeitsgründen ist es nicht möglich, durch Wahl einer großen Höhe und geringen Breite beträchtliche Ladungen zu erzeugen. In der Praxis wird daher nur der Longitudinaleffekt ausgenutzt. Die Temperatur von 573°C, bei der das

Quarzgefüge in ein nicht piezoelektrisches Gefüge übergeht, nennt man die **Curie-Temperatur.**
Zur Messung der bei der Krafteinwirkung entstehenden Ladung wird die Oberfläche des Quarzes mit einer Metallschicht versehen, sodaß ein Kondensator entsteht (*Bild 4.15*).

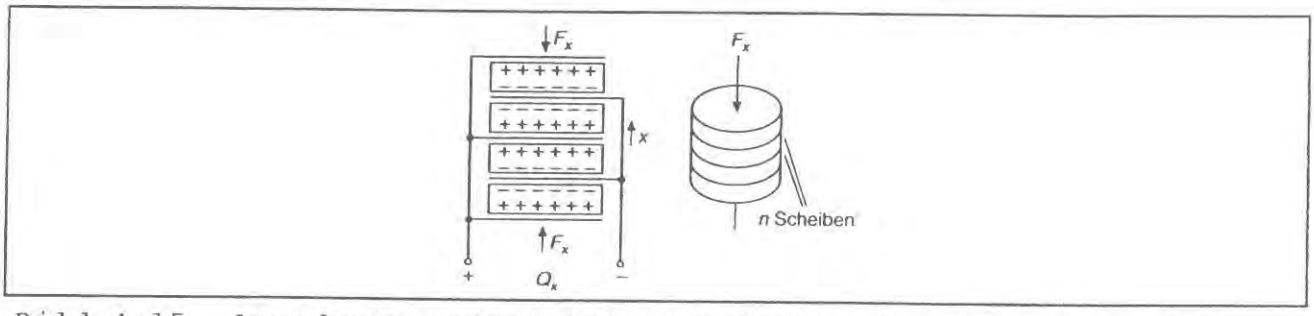


Bild 4.15 *Anordnung mehrerer Quarzscheiben in einem Sensor*

Im Hinblick auf den gesamten Herstellaufwand erweist sich ein piezoelektrischer Sensor häufig als günstiger als ein funktionsgerecht montierter Siliziumchip. Die Abmessungen des aktiven Sensorvolumens sind frei wählbar. Mechanische Anpassungstransformationen und die Möglichkeit vielfältiger Technologien führen insbesondere bei keramischen Piezomaterialien zu funktional überlegenen Lösungen.

Diesen Vorteilen steht ein genereller *Nachteil* gegenüber. Die erzeugten statischen Ladungssignale lassen sich nicht über beliebig lange Zeiten speichern. Piezoelektrische Sensoren eignen sich daher besonders zur Messung von Kraft-, Druck- oder Beschleunigungsänderungen, weniger zur Messung statischer Größen. Zudem stört gerade bei den leistungsfähigsten Piezomaterialien ein hoher Pyroeffekt.

4.4.2.2 Materialien

Die größten piezoelektrischen Effekte findet man bei den *piezokeramischen Werkstoffen.* 50 % der mechanisch aufgewendeten Energie läßt sich umwandeln. In mechanischer Resonanz sind Leistungswirkungsgrade über 95 % erzielbar.
Die Effekte bei *Einkristallen* wie Lithiumniobat (LiNbO) oder Quarz sind geringer, dafür sind Linearität, Temperaturabhängigkeit und Hysteresefreiheit hervorzuheben.

Das *Polymer PVDF* (Polyvinyldifluorid) ist in seinem piezoelektrischen Effekt mit Quarz zu vergleichen, ist jedoch mechanisch um den Faktor 30 nachgiebiger und akustisch hervorragend an Flüssigkeiten angepaßt. PVDF weist außerdem einen starken pyroelektrischen Effekt auf, der dem von piezoelektrischer Keramik vergleichbar ist.

4.4.2.3 Anwendungen

Die piezoelektrischen Sensoren können nach den Einsatzfrequenzbereichen in quasistatische, dynamische und Ultraschall-Sensoren eingeteilt werden. Bild 4.16 zeigt Sensoranwendungen des Piezoelektrischen Effekts bei verschiedenen Frequenzen.

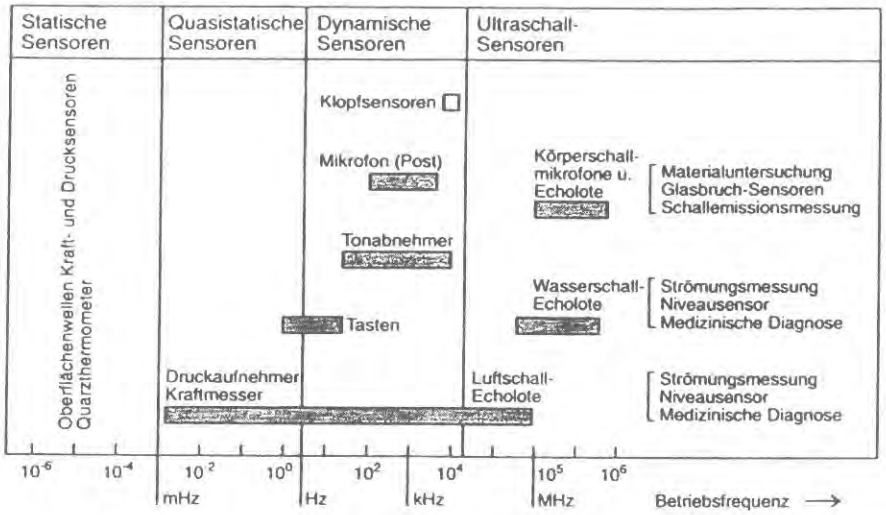


Bild 4.16
Piezoelektrische Sensoranwendungen bei verschiedenen Frequenzen

Der piezoelektrische Effekt ist auch umkehrbar (*reziproker piezoelektrischer Effekt*). Das Anlegen eines elektrischen Feldes an einen piezoelektrisch aktiven Werkstoff kann zu einer Gitterverzerrung führen. Beide Effekte haben in der Technik vielfältige Anwendungen.

Die Auswirkung von *Störgrößen*, wie thermische Ausdehnung und Pyroeffekt, müssen meist durch besondere konstruktive Maßnahmen verringert werden. Hohe Anforderungen sind an den Isolationswiderstand von Sensor- und Verstärkerschaltung gestellt. Trotzdem sind statische Messungen über Zeiträume von mehreren Minuten im allgemeinen nicht möglich. *Bild 4.17* bis *4.19* zeigt einige *Beispiele von piezoelektrischen Sensoren.*

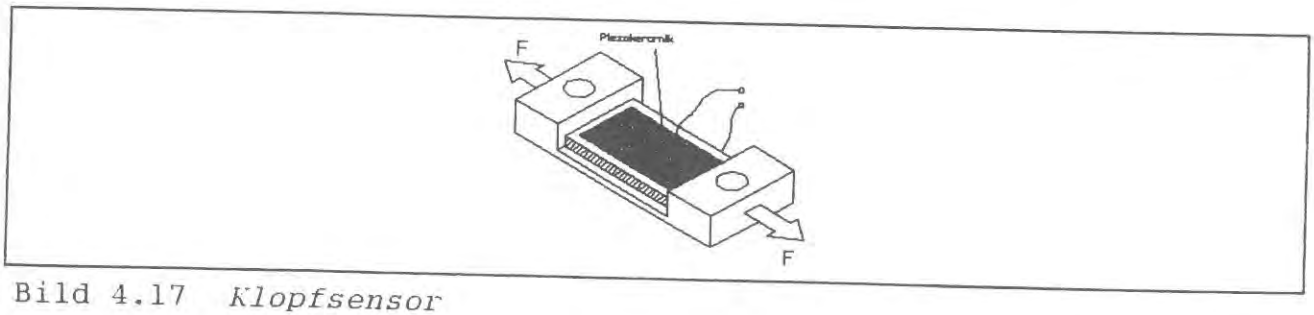


Bild 4.17 *Klopfsensor*

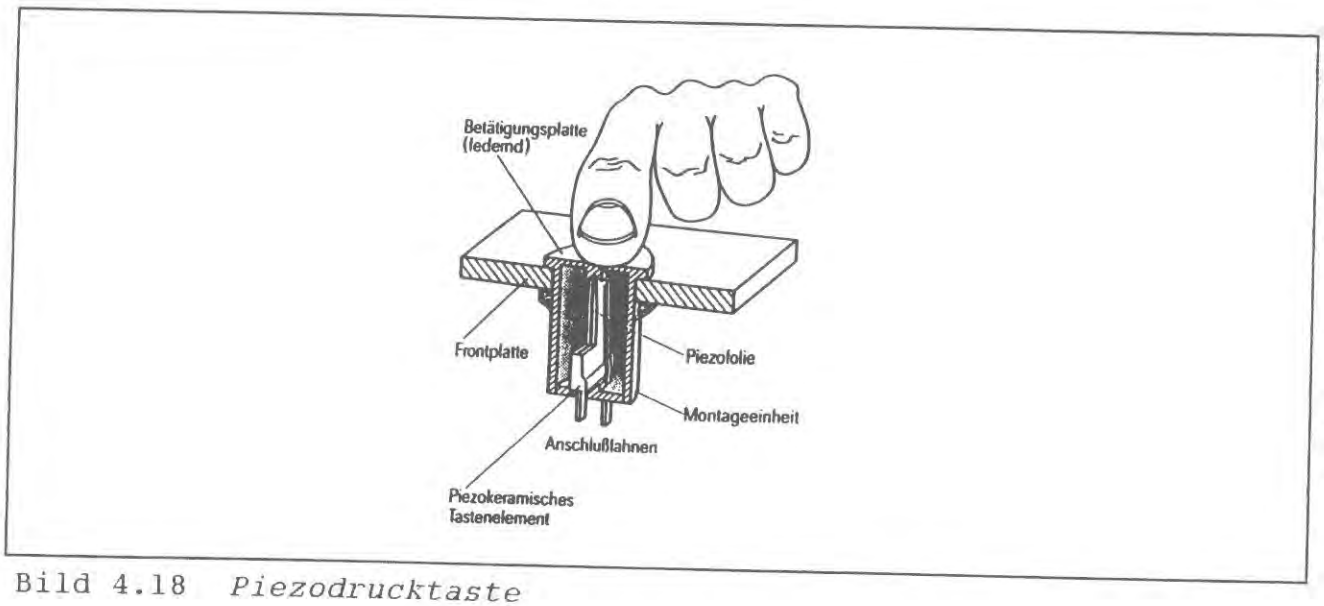


Bild 4.18 *Piezodrucktaste*

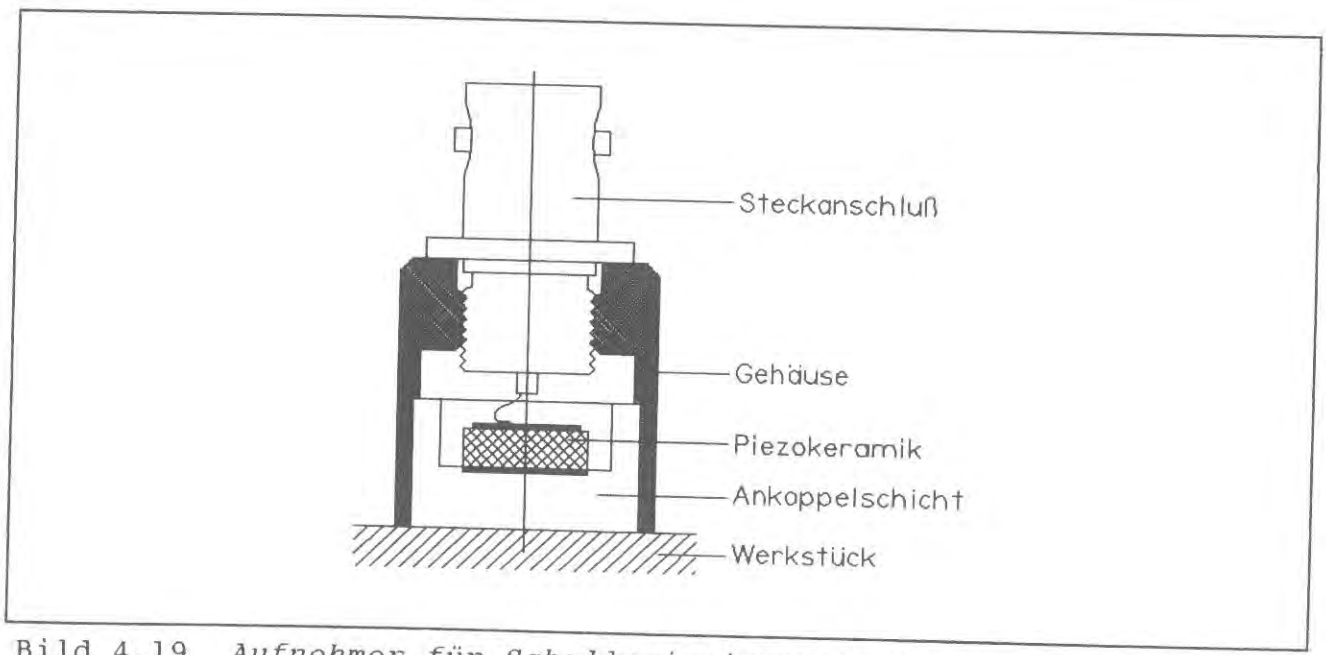


Bild 4.19 *Aufnehmer für Schallemissionsmessung*

4.5 TEMPERATURSENSOREN

Bei allen Temperaturmessungen wird die Veränderung einer physikalischen Größe unter der Wirkung von Temperaturänderungen ausgenutzt.

Zu den geeigneten *temperaturbedingten Größenänderungen* gehören die Volumenänderung, die Widerstandsänderung, die Spannungsänderung, elektrische Ladungsänderung und die Änderung optischer Eigenschaften in speziellen Stoffen.

Bei den Meßwertaufnehmern (Sensoren) nahmen ursprünglich bei der elektrischen Temperaturmessung das *Thermoelement* und das *Platin-Widerstandsthermometer* eine Vorrangstellung ein. Mit dem Aufkommen der *Heißleiter* in den Fünfziger-Jahren erfolgte eine Weiterentwicklung zu kostengünstigen Sensoren mit hoher Empfindlichkeit und guter Genauigkeit. Die Stabilität von Platindraht konnte man allerdings nicht erreichen. Seit etwa 1960 werden auch *Si-Transistoren* als Meßwertaufnehmer propagiert. Sie zeichnen sich durch ein fast lineares Ausgangssignal über den Meßbereich aus, die Reproduzierbarkeit der Kennlinie bereitet hingegen Schwierigkeiten.

In neuerer Zeit werden *Halbleiter-Temperatursensoren* auf Si-Basis entwickelt, die auf dem Effekt des Ausbreitungswiderstands beruhen. Der nächste Schritt ist voraussichtlich die Integration dieser Sensoren in komplexe Schaltungen.
In der Sensorentwicklung geht die Tendenz dahin, die Meßwerterfassung und die Signalaufbereitung zu einem digitalfreundlichen Signal in einem System als "intelligenter Sensor" zu vereinigen. Deshalb werden integrierbare Halbleiter-Temperatursensoren auf der Basis von kristallinem oder amorphem Silizium in Zukunft sehr große Bedeutung erlangen.

Tabelle 4.3 gibt einen allgemeinen Überblick über verwendete Temperatursensoren.

Sensor	Meßbereich in °C	Bemerkungen
Thermoelement	- 200 ... + 1600	kleine Signalspannung, teure Elektronik, Nullpunktkompensation
Metall-Widerstandsthermometer	- 270 ... + 850	kleine Signalspannung, teure Elektronik
Si-Elemente	- 50 ... + 150	Widerstand, Transistoren, untere Temperaturgrenze gegeben durch Gehäuse, Billigstfühler
Kaltleiter	- 30 ... + 350	steile Temperaturschwelle, billig, robust
Heißleiter	- 50 ... + 350	exponentielle Kennlinie, Kompromiß zwischen Genauigkeit und Preis
Photodiode Photoleiter	0 ... + 4000	Fernmessung, unterhalb + 400°C, Halbleiter mit kleinem Bandabstand und Kühlung
pyroelektrischer Detektor	0 ... + 4000	Fernmessung, hohe Empfindlichkeit, dynamische Messung
Dehnungsthermometer	- 200 ... + 1000	Flüssigkeitsthermometer, Bimetall, Ortsmessung
Gasthermometer	- 250 ... + 1000	physikalische Messung, sehr aufwendig, Druckmessung
Temperaturmeßfarben	- 30 ... + 1600	Farbumschlag, z.B. Flüssigkeitskristall
Quarzthermometer	- 40 ... + 300	digitales Ausgangssignal

Tabelle 4.3 *Sensoren zur Temperaturmessung*

4.5.1 Thermoelemente

Bringt man zwei metallische Leiter aus unterschiedlichen Werkstoffen in innigen Kontakt, dann läßt sich an den offenen Leiterenden eine eingeprägte, temperaturabhängige Spannung, die sogenannte **Thermospannung**, messen (*Seebeck-Effekt*).

Ein hochohmiges Zeigerinstrument mit entsprechender Skalenteilung zeigt die Temperatur t_2 der Meßstelle vermindert um die konstante Temperatur t_1 der Vergleichsstelle an (*Bild 4.20*).

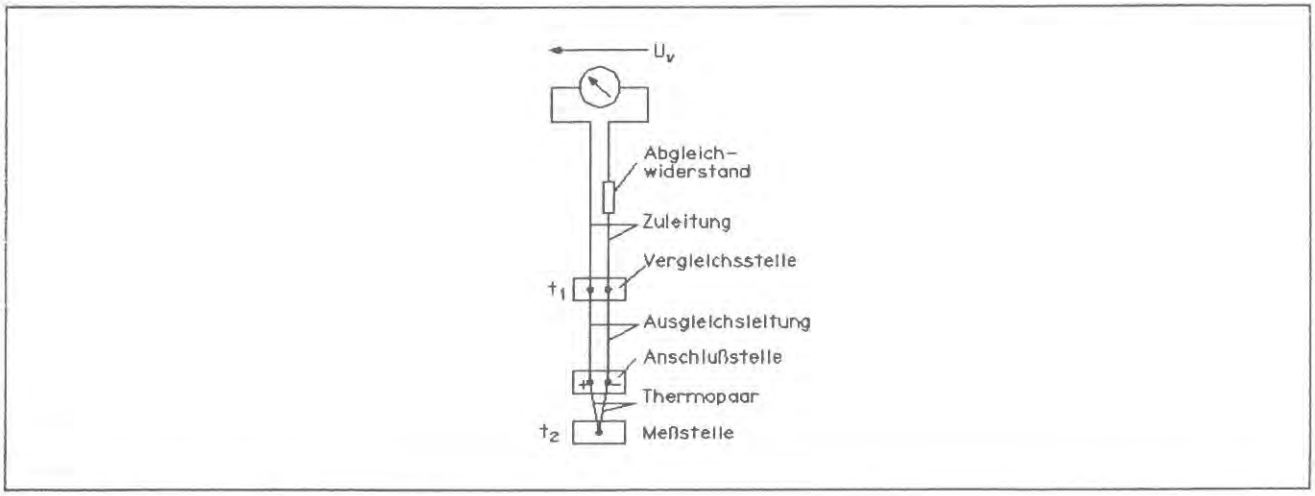


Bild 4.20 *Thermokreis*

Thermoelemente sind aufgrund ihrer einfachen Konstruktion (zweipunktverschweißte, metallische Leiter) äußerst robust und werden in Miniaturformen für Punktmessungen gebaut, bis hin zu Massivausführungen in Mantelschutzrohren aus hochwertigem Stahl oder Keramik.

Die Auswahl geeigneter **Werkstoffpaarungen** für Thermoelemente erfolgt anhand der *thermoelektrischen Spannungsreihe*. Gebräuchliche Thermopaare und ihre Meßbereiche sind auszugsweise in *Tabelle 4.4* wiedergegeben.

	Thermoelemente	**Verwendungs-bereich °C**	**Thermospannung bei 100 °C mV**
Nicht-Edel-metalle	Kupfer-Kupfernickel (Konstantan)	-200 .. +400	4,25
	Eisen-Kupfernickel (Konstantan)	-200 .. +700	5,37
	Nickelchrom-Nickel	0 .. +1000	4,095
	Nickelchrom-Kupfernickel (Konstantan)	-270 .. + 700	6,317
Edelmetall	Platin, 10% Rhodium-Platin	- 50 .. +1300	0,645
	Platin, 13% Rhodium-Platin	0 .. +1400	0,647
	Platin, 30% Rhodium-Platin, 6% Rhodium	0 .. +1500	0,033

Tabelle 4.4 *Gebräuchliche Thermoelemente*

Vorteile der Thermoelemente sind große Zuverlässigkeit, verbunden mit hoher Langzeitstabilität und sehr guter Reproduzierbarkeit der Kennlinie. **Nachteile** ergeben sich aus dem niedrigen Signalpegel in der Größenordnung einiger Millivolt und der Tatsache, daß der Seebeck-Effekt eine Kontaktspannung zur Ursache hat. Daher müssen alle zusätzlichen Kontaktspannungen im Meßkreis durch Einbau sogenannter *Ausgleichsleitungen* aus speziellem Material unterbunden werden. Die konstante Vergleichstellentemperatur bedeutet eine zusätzliche Erschwerung, auch wenn es dafür elektronische Simulationsschaltungen als Alternative gibt.

4.5.2 Heißleiter (Thermistoren, NTC-Widerstände)

Heißleiter sind Halbleiter-Keramik-Widerstände mit stark *negativem Temperaturkoeffizienten* (TK = -2 bis -5 %/K) und mit einem Arbeitsbereich von -55 bis +330°C. Der Leitungsmechanismus in der polykristallinen Mischoxidkeramik ist kompliziert und die exponentielle Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur wird in den Datenblättern durch Meßkurven angegeben. In *Bild 4.21* ist eine typische Kennlinie eines Heißleiters dargestellt.

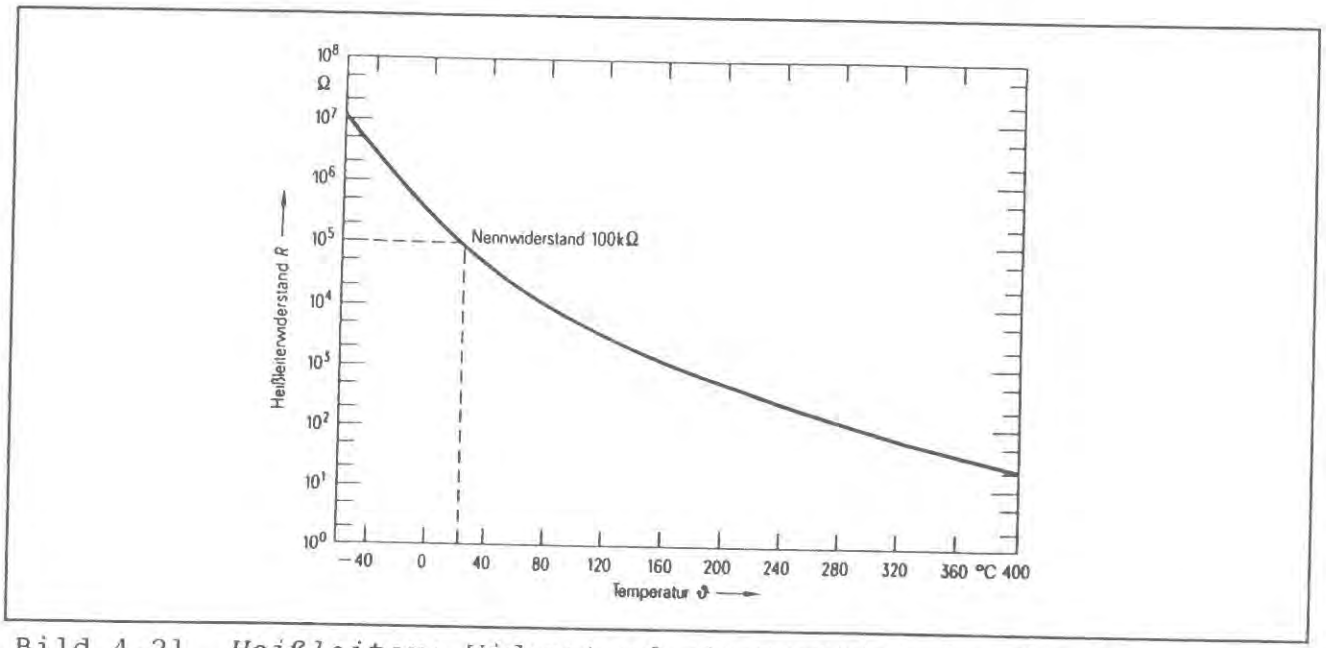


Bild 4.21 *Heißleiter; Widerstand als Funktion der Temperatur*

Heißleiter haben weite Verbreitung gefunden in der Lebensmittel- und Kunststoffindustrie, in der Kfz-Elektronik, in transportablen Betriebsmeßgeräten und in der medizinischen Technik, auch als

Fieberthermometer. Vorteilhafte Einsatzmöglichkeiten ergeben sich in der Tieftemperatur-Meßtechnik und bei speziellen physikalischen Aufgabenstellungen als Strahlungsempfänger bei Pyrometern, wo sich der Heißleiter auf der Rückseite einer schwarzgefärbten Absorptionsfläche befindet, oder als Geber in Strömungsanemometern. Ein Teil der **Anwendungen** betrifft die Temperaturkompensation von Spulen, die Arbeitspunktstabilisierung von Transistoren und die Übertemperatursicherung elektronsicher Geräte.

4.5.3 Kaltleiter (PTC-Widerstände)

Kaltleiter sind Widerstände aus polykristallinem Bariumtitanat, die in einem technologisch bestimmbaren Temperaturintervall einen großen *positiven Temperaturkoeffizienten* von +7 bis +70 %/K und eine Widerstandsänderung von mehreren Zehnerpotenzen aufweisen. Zur Beschreibung des Kaltleiter-Verhaltens greift man am besten auf typische Meßkurven der Widerstands-Temperaturkennlinie zurück (*Bild 4.22*).

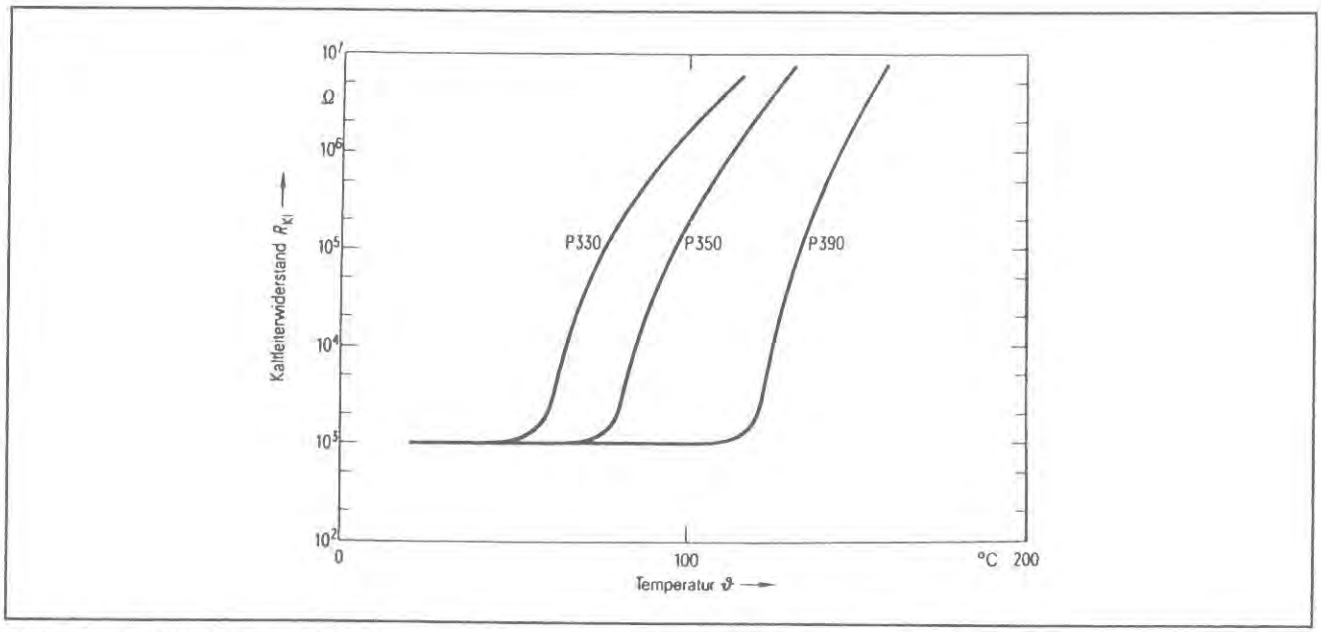


Bild 4.22 *Kaltleiter; Widerstand als Funktion der Temperatur für verschiedene Ansprechtemperaturen*

Der Kaltwiderstand bei 25°C unterliegt fertigungsbedingt großen Streuungen von ± 50 %. Hingegen kann die Ansprechtemperatur (je nach Typ zwischen 40 und 180°C) mit Toleranzen von ± 5°C eingehalten werden.

Die **Wirkungsweise** der Kaltleiter kommt dadurch zustande, daß bei ansteigender Spannung sich der Kaltleiter bis zur Ansprechtemperatur erwärmt. Eine weitere Erwärmung durch Spannungserhöhung führt wegen der raschen Zunahme des Widerstands zu einer Stromaufnahme, die in einem stationären Grenzwert mündet (*Bild 4.23*). Darauf beruht die Schutzfunktion von Kaltleitern, die, in Serie zum Verbraucher geschaltet, bei Überlastung hochohmig werden.

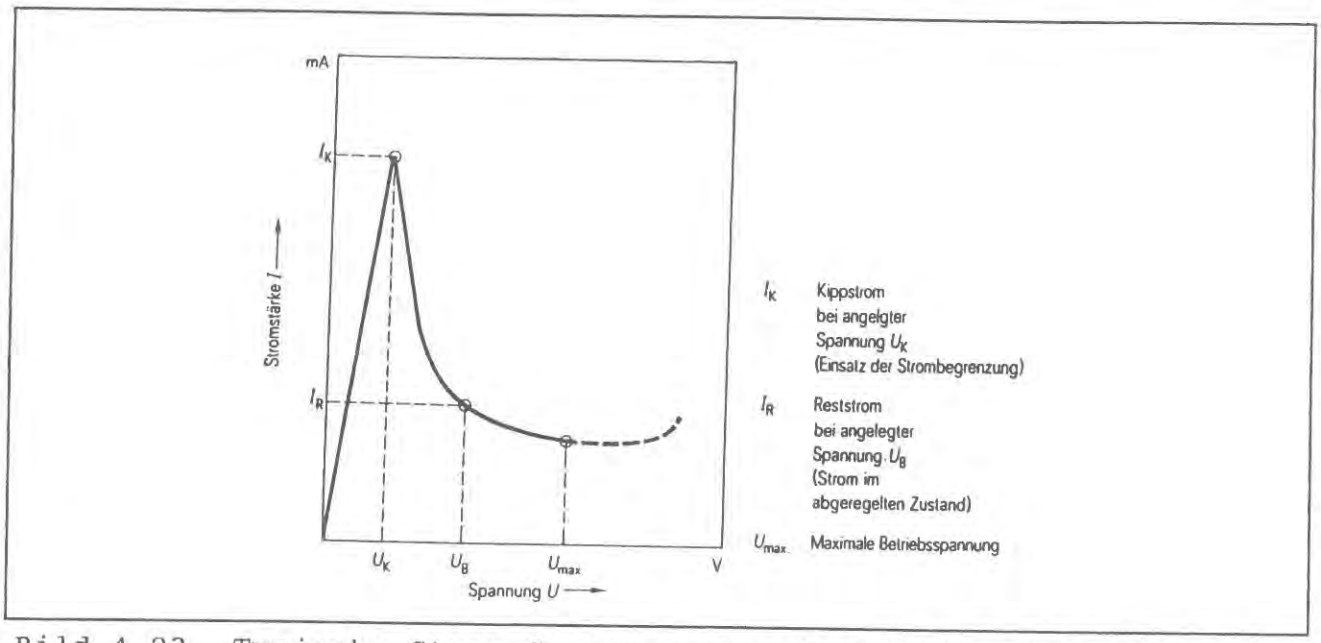


Bild 4.23 *Typische Strom-Spannungscharakteristik eines Kaltleiters*

Anwendungen:

- Grenztemperatur-Schalter (Motorwicklung, Maschinenteile, Heißwassergeräte);
- Überlastschutz (Lautsprecher, NF-Endstufe, Kleinmotoren, Leuchtstoffröhrenstarter);
- Verzögerungschaltungen (Relaisverzögerung, Entmagnetisierung bei Farbfernsehröhren, Steuerung der Anlauf-Hilfsphase von Wechselstrommotoren);
- Flüssigkeitsniveaufühler;
- Selbstregelnder Thermostat (Heißluft-Haartrockner, Wärmeplatte);

4.5.4 Pyroelektrizität

4.5.4.1 Pyroelektrischer Effekt

Die Abhängigkeit der elektrischen Polarisation von der Temperatur bezeichnet man als **pyroelektrischen Effekt.**
Pyroelektrische Materialien wie z. B. Triglycinsulfat (TGS) oder Lithiumtantalat erzeugen Ladungen bei Temperaturänderungen. Daher bewähren sich pyroelektrische Sensoren für die empfindliche Erfassung von Temperaturänderungen.

4.5.4.2 Materialien

Den höchsten pyroelektrischen Effekt besitzt Triglycinsulfat (TGS). Ein pyroelektrischer TGS-Generator zur Stromerzeugung hat dennoch einen zehnfach schlechteren Wirkungsgrad als eine Carnot-Maschine. Nachteilig ist die *niedrige Curie-Temperatur* von 50°C, die den Einsatz dieses Materials auf Temperaturen unter 40°C beschränkt. Auf Grund der niedrigen dielektrischen Verluste erweist sich LiTaO als ideales Pyromaterial für hohe Grenzempfindlichkeit.

4.5.4.3. Anwendungen

Pyroelektrische Sensoren sind Aufnehmer für Wärmestrahlung, insbesondere im tiefen Infrarot (Wellenlänge ca. 10 µm). Im Gegensatz zu Halbleiterdetektoren (z. B. HgCdTe oder PbSnTe) benötigen sie keine Kühlung. Ähnlich den Piezosensoren sind Pyrosensoren nur zur Detektion von Änderungen der Wäremstrahlung geeignet. Für statische Temperaturmessungen wird ein optischer Zerhacker (*Chopper*) in den Strahlengang geschaltet.

Pyrosensoren werden als Einzelelemente, Differential- und Quadrantenelemente sowie für pyroelektrische Vidicons in flächenhafter Matrixanordnung verwendet. Einzelelemente finden **Anwendung** in Strahlungspyrometern sowie Passiv-Infrarotsensoren für Personenüberwachungsanlagen (Alarm). Die Differential- und Quadrantenelemente ermöglichen die Lokalisierung von Wärmequellen, während die Vidicons in Wärmebildkameras zum Einsatz kommen.

4.6 MAGNETSENSOREN

4.6.1 Halleffekt-Sensoren

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Ermittlung des Leitfähigkeitstyps eines Stoffes (Strom vorwiegend durch Elektronen oder Defektelektronen getragen) ist der **Hall-Effekt.**

Man bringt einen stromdurchflossenen bandförmigen Leiter von rechteckigem Querschnitt mit der Dicke d in ein magnetisches Feld B, welches senkrecht zur Stromrichtung verläuft (*Bild 4.24*). Dadurch werden die Ladungsträger, die durch ihre Bewegung den elektrischen Strom ergeben, senkrecht zur Strom- und Magnetfeldrichtung abgelenkt (*strichlierte Pfeile*). Durch diese Ladungsverschiebung entsteht im Leiter ein elektrisches Querfeld und damit an den Längsseiten zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten P und Q eine Potentialdifferenz, die *Hall-Spannung* U_H. Diese ergibt sich zu:

$$U_H = R_H \cdot I \cdot B / d$$

I ... Strom, B ... magnetische Induktion,
d ... Dicke des Leiters, R_H ... Hallkonstante;

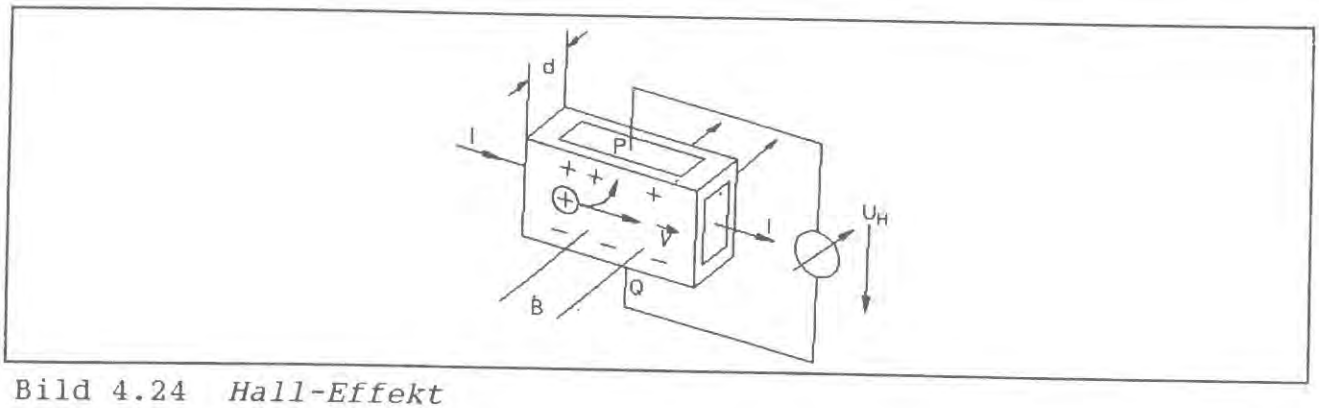


Bild 4.24 *Hall-Effekt*

4.6.2 Anwendungen des Hall-Effektes

Der Hall-Effekt kann zum Messen von magnetischen Feldern verwendet werden, da die entstehende Hall-Spannung der magnetischen Induktion proportional ist. Die entsprechenden Sensoren werden als *Hallgeneratoren* bezeichnet.

Hierbei sind die geringen Abmessungen des Testkörpers vorteilhaft. Bei einer Dicke von etwa 0,1 mm haben die Leiterplatten in der Regel eine Größe von 3 bis 10 mm mal 10 bis 15 mm. Die Ströme betragen etwa 0,1 bis 0,5 A. Mit einer magnetischen Induktion von 1 T lassen sich an den Hilfselektroden Hall-Spannungen von 0,1 bis 0,4 V gewinnen.

Ein wichtiges Anwendungsgebiet ist die kontaktlose Signalgabe, die statisch wirkt und unabhängig von Bewegungen und Geschwindigkeiten ist. Der Nulldurchgang der Hall-Spannung ist mit einer Toleranz von 0,01 mm oder besser an einer bestimmten Stelle reproduzierbar.

Durch eine geeignete Umwandlung von Kräften, Drücken, Drehmomenten und Beschleunigungen in magnetische Wegstrecken kann man mit **analogen Hall-Sensoren** auch mechanische Größen messen.
So lassen sich z. B. *Kräfte* mit einer Feder und einem an ihr befestigten Magneten in Wege umsetzen und nach dem Prinzip der axialen oder seitlichen Annäherung mit einem analogen Hall-Sensor erfassen.
Zum Messen von *Drücken* ist eine Membrane mit einem fest angekoppelten Magneten erforderlich.
Drehmomente können mit einem Torsionsstab mit aufgesetztem Ringmagnet gemessen werden, *Beschleunigungen* mit einem gedämpften Masse-Feder-System, wobei der Magnet als Masse oder Teilmasse fungiert.
Der niedrige Preis für Hall-Sensoren ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungen auf diesem Gebiet, wie z.B. für kollektorlose Gleichstrommotoren, verschleißfreie Potentiometer, Beschleunigungsmesser, aber auch zur Drosselklappensteuerung in Verbrennungsmotoren.

Digitale Hall-Sensoren werden hingegen vorwiegend zur *Drehzahlmessung* an Zahnrädern, *Positionierung* von Zylindern, Nocken, Hebeln und Wellen sowie zur benzinsparenden Zündzeitpunktsteuerung in modernen Automobiltypen eingesetzt.
Auch *codierte Stellungsmessungen* sind möglich. Beispielsweise kann eine mit dem gewünschten Code magnetisierte drehbare ferromagnetische Scheibe von einer Anzahl Hall-Sonden abgetastet werden. Diese Anordnung ist ein *Winkelaufnehmer* und wird zur Längenmessung eingesetzt.

5 RECHNERGESTÜTZTE MESSTECHNIK

5.1 PERSONAL COMPUTER

Erste *digitale Meßsysteme* entstanden im Umfeld von Prozeßrechnern. Später wurden die aufkommenden Mikrorechner um I/O-Einschübe mit A/D-Wandlern ergänzt und so für meßtechnische Zwecke nutzbar gemacht. Diese Entwicklung führte schließlich zu professionellen Meßdaten-Erfassungssystemen mit zentralem Controller und Sortimenten von Ankoppelmodellen.

Ein umfassender und kostengünstiger Einsatz digitaler Meßtechnik wurde jedoch erst durch die rasch zunehmende Verbreitung des *Personal Computer* **PC** möglich und existiert nun in verschiedenen Varianten.
Als wichtigste Variante ist dabei die große Familie der sogenannten PCs nach Industriestandard (auch IBM-Kompatible genannt) zu nennen, deren Prozessorherz ein Mikroprozessor der Typen 8088, 8086, 80286, 80386 und neuerdings auch 80486 ist.
Im *Bild 5.1* sind die wesentlichsten Komponenten eines Personal Computers dargestellt und nachfolgend aufgelistet.

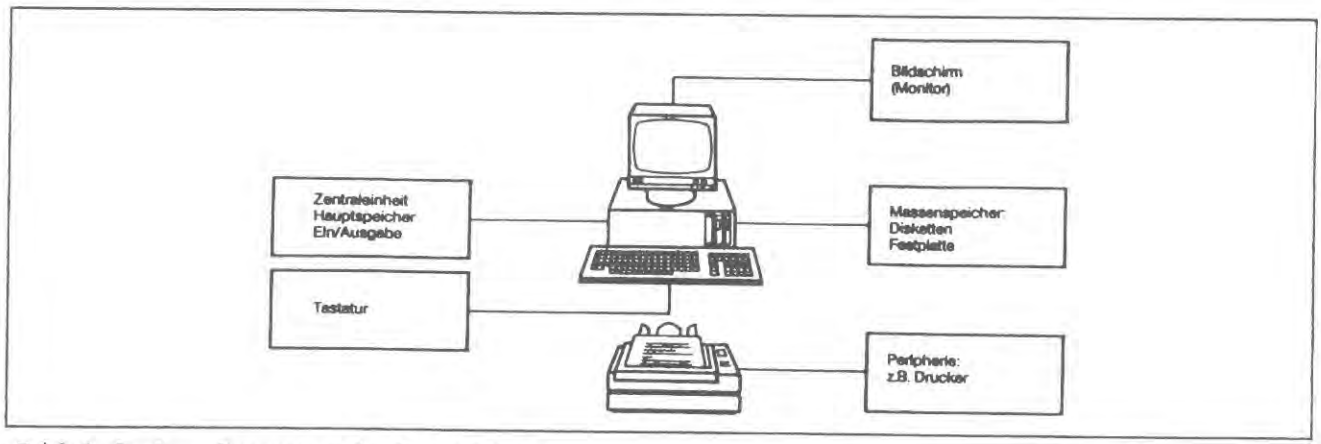


Bild 5.1 *Personal Computer*

- Zentralrechner als Auf- oder Untertischgerät mit geringem Volumen und geringer Leistungsaufnahme,
- separate(r) Bildschirm(e) in Monitorbauweise, grafikfähig,
- meist separate Tastatur zur Dateneingabe,
- "*Maus*" als optischer Zeiger anschließbar,
- Halbleiterspeicher (RAM) als Arbeitsspeicher,
- Disketten- und/oder Festplattenlaufwerke als Massenspeicher,
- eigene Drucker oder Plotteranschlußmöglichkeit.

Die *Zentralrechnereinheit* **CPU** *[siehe auch Abschnitt 3.3.6]* soll etwas genauer betrachtet werden. Sie bildet den elementaren Kern eines PCs und hat die Aufgabe neben den eigentlichen Rechenarbeiten und Datenmanipulationen die Verwaltung der sogenannten Peripherie zu ermöglichen und zu kontrollieren.
Das Rechenwerk, der Mikroprozessor, bildet die Zentralrechnereinheit. Dieser benötigt für Speicherzwecke, z. B. für seine Programme, den Arbeitsspeicher. Als Schnittstelle zur Außenwelt, über die Peripherie, sind Einheiten zur Eingabe/Ausgabe (Input/Output I/O) vorgesehen.

Damit diese Teile nun alle zusammenarbeiten können, muß der Rechner mit einem Bedienprogramm für alle diese Teile ausgestattet werden, dem sogenannten **Betriebssystem**. Dabei hat sich ebenfalls ein Standard herausgebildet, der heute bei den Rechnern mit Industrie Standard Architektur (ISA) weltweit eingesetzt wird: MS-DOS/PC-DOS das "*Disc Operating System*" von Microsoft "Windows".

Ein wesentliches Merkmal von MS-DOS ist eine Möglichkeit zur Organisation von Dateien auf Massenspeichern wie Disketten oder Festplatten in Katalogen und Unterkatalogen, die auch als *Verzeichnisse* bezeichnet werden.

Aufgrund der ständig wachsenden Rechnerleistung, der steigenden Speicherkapazität, der immer einfacher werdenden Handhabung und des enormen Preisverfalls, hat sich der Personal Computer auch in der *Meßtechnik* durchgesetzt.
Weitere **Vorteile** sind der einheitliche Standard, die komfortable Hardware- und Software-Nutzeroberfläche sowie die Offenheit des Systemkonzepts. Eine typische Grundstruktur der PC-gestützten Meßtechnik zeigt *Bild 5.2*.

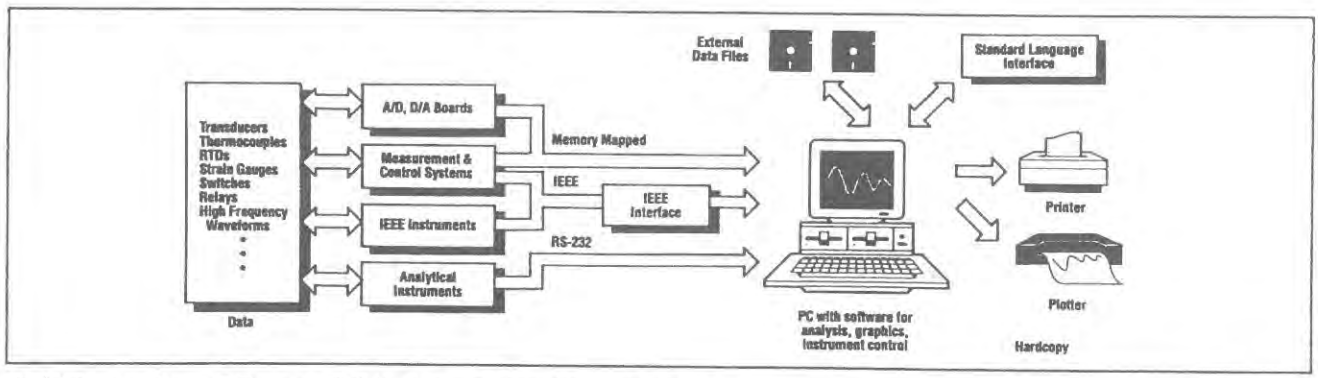


Bild 5.2 *PC-gestützte Arbeitsstation*

5.2 MEßTECHNISCHE HARDWARE-ERWEITERUNGEN FÜR PCs

Die rechnergesteuerte Aufnahme, Verarbeitung, Darstellung und Registrierung von Meßwerten wird ermöglicht durch speziell auf den Personal Computer abgestimmte Hardware und Software. Die Gesamtheit der Geräte, die zu einem Rechnersystem gehören, werden unter dem Begriff "*Hardware*" zusammengefaßt. Mit der Hardware-Konfiguration werden wesentliche Systemeigenschaften und -grenzen festgelegt: Datenerfassungsgeschwindigkeit, Meßgenauigkeit, Flexibilität und Erweiterbarkeit sowie Preis.
Die folgenden Varianten zeigen die Realisierung der meßtechnischen Instrumentierung von PCs.

5.2.1 Zusatzkarten im PC

Als einfachste und häufig kostengünstigste Lösung wird der PC durch spezielle Meßtechnik-Zusatzkarten ergänzt (*Bild 5.3 a*).

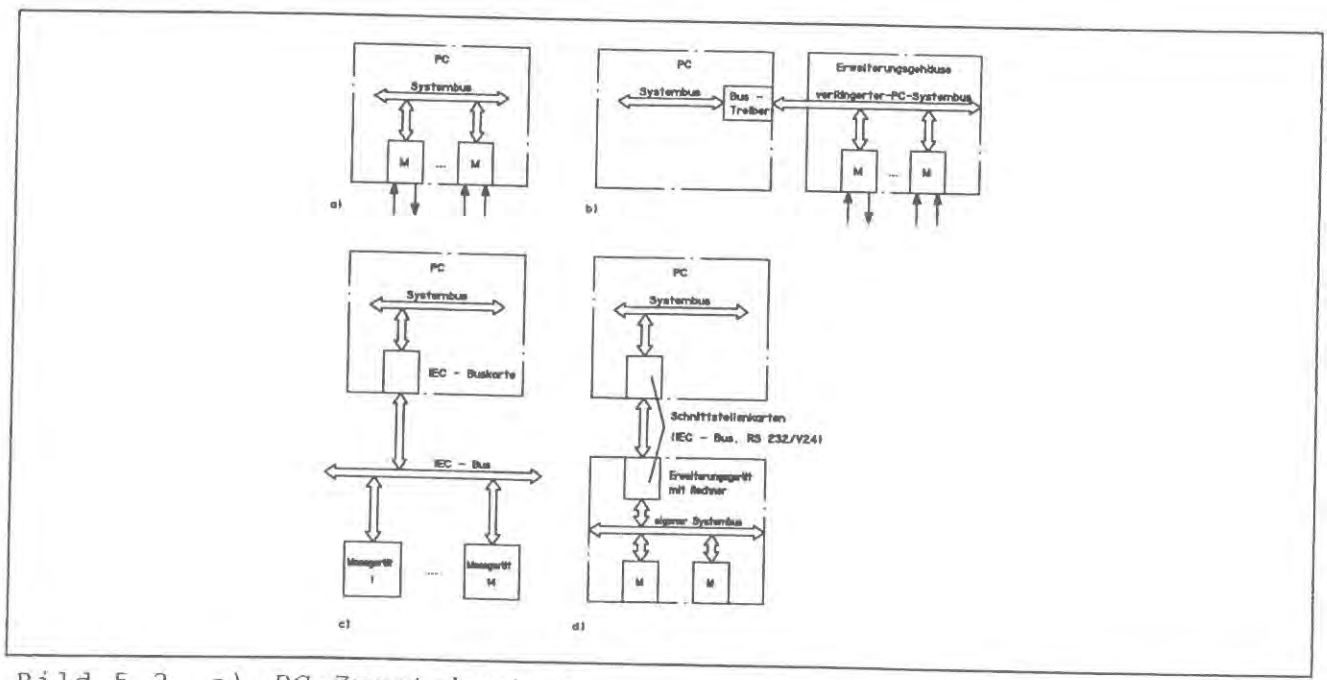


Bild 5.3 a) *PC-Zusatzkarten*
b) *Zusatzkarten im Erweiterungsgehäuse*
c) *IEC-Bus-Struktur*
d) *Kopplung PC-Erweiterungsgerät*

Die Verbindung mit dem Systembus erfolgt auf freien Steckplätzen des PCs über direkte Steckverbinder. Die Anschlüsse nach außen sind an der Rückseite zugänglich. Diese Erweiterungen eines PCs bzw. eines PC-Meßgerätes durch Zusatzkarten bis zu einem intelligenten System, ist in *Bild 5.4* dargestellt.

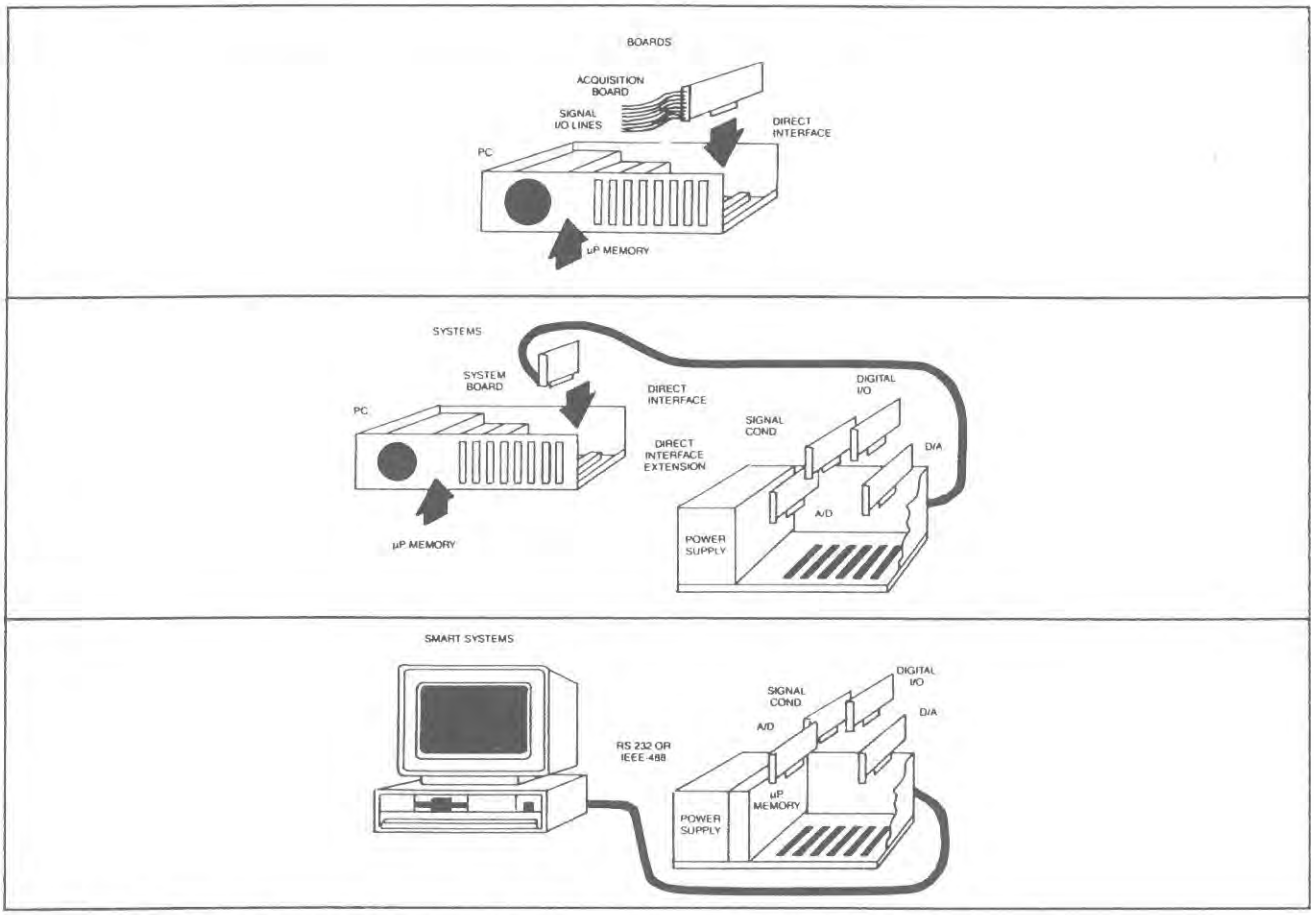


Bild 5.4 *Meßtechnische Instrumentierung eines PCs*

Die freien Steckplätze des PCs nehmen hier die Baugruppen mit Meß- und Steuerfunktionen auf. Durch die Kopplung mit dem internen Systembus wird der PC zum Meßinstrument, dessen Meßfunktionen durch spezielle zur Zusatzkarte gehörende Software verfügbar gemacht werden.
Diese Struktur ermöglicht die Befehle des Mikroprozessors rasch zu beantworten. Direkter Speicherzugriff beschleunigt die Aufnahme und den Datentransfer zum und vom Speicher. Zusatzkarten, D/A-Wandler, digitale I/O-Kanäle, Zwischenverstärker und andere Produkte steigern Messung und Steuerungsanwendungen. Hinzu kommen Karten, die Zähler, Optokopplerstrecken oder Relais enthalten. Auch Funktionsgeneratoren und Schrittmotorsteuerungen werden als PC-Zusatzkarten realisiert. Systeme, die für sehr hohe Abtastfrequenzen ausgelegt sind, enthalten einen eigenen Zwischenspeicher.

Zu jeder Karte gehört eine *Treibersoftware*, deren Funktionen aus Basic oder einer anderen Hochsprache heraus aufrufbar sind. Neben Grundelementen, wie analoge und digitale Ein- und Ausgabe, sind Routinen zur Handhabung von Datenfeldern sowie einfache

Datenprogramme üblich. *Hilfsprogramme* unterstützen Installation, Kalibrierung und Test.

Karten mit komplexerem Funktionsumfang enthalten PC-seitig immer komfortable Bedienoberflächen. Diese Entwicklung führte zu vollständigen Meßgeräten auf Steckkarten mit virtuellen Frontplatten auf dem Bildschirm. Die Bedienung erfolgt graphikorientiert und menügeführt über Maus und Tastatur.

Das Konzept der PC Zusatzkarten wird allerdings nicht sämtlichen meßtechnischen Anforderungen genügen können. Das ergibt sich bereits aus der *begrenzten Zahl freier Steckplätze* im PC. Auch die Anschlußmöglichkeiten von Meß- und Steuerleitungen an der PC-Rückseite sind aus Platzgründen eingeschränkt. Zur Abhilfe bieten dafür einige Hersteller Adapter mit externen Klemmenfeldern an.

Entscheidende Einschränkungen aber kann die im PC herrschende Störstrahlung bewirken. Das Problem nimmt mit der Erhöhung der Taktfrequenz moderner PCs zu, gleichzeitig aber führen ein höherer Integrationsgrad der Bauelemente sowie kompakteres Leiterplattendesign zu verringerter Störemission. Seitens der Hersteller von Meßtechnikkarten richten sich Maßnahmen der Schirmung, Masseführung usw. auf größtmögliche *Störfestigkeit*. Bestimmte Meßaufgaben jedoch, die z. B. eine hohe Verstärkung kleiner Eingangsspannungen oder hochauflösende A/D-Wandlung erfordern, sind innerhalb des PCs meistens nicht mehr beherrschbar.

5.2.2 Personal-Instrumentation-Box (PIB)

Als Alternative zu den Zusatzkarten bietet sich die PIB an (*Bild 5.3 b*). Die Baugruppen mit der Meßelektronik werden von einem eigenen Baugruppenträger, einer Personal-Instrumentation-Box, aufgenommen. Die Ankopplung an den PC erfolgt mit Hilfe von *Standard-Schnittstellen* oder einer *speziellen Bustreiber-Karte* im PC. Derartige Systeme sind zum Teil mit eigener Intelligenz ausgestattet, die den PC z.B. von der Steuerung der Meß- und Prüfabläufe entlastet.

Dieses Konzept ermöglicht Fragen der elektromagnetischen Verträglichkeit, der Kabelanschlüsse usw. entsprechend der meßtechnischen Anforderungen zu lösen. Die Anzahl freier Steckplätze kann wesentlich größer sein als im PC. Zum Einsatz kommen in der Regel Zusatzkarten des PC-Sortiments.

5.2.3 PC-Meßgeräte

Die Erweiterung des PCs mit einer *IEC-625-Bus-Interface-Karte* eröffnet besondere Möglichkeiten. Der PC wird damit zum Controller eines standardisierten Meßtechnik-Busses.
Die Meßgeräte sind mit dem PC über den IEC-Bus (**IEC** = *International Electronical Commission*) verbunden und bilden mit ihm eine Funktionseinheit mit klarer Aufgabenteilung (*Bild 5.3 c*). Die räumlich vom PC getrennt aufgebauten PC-Meßgeräte sind zuständig für die Erfassung und Aufbereitung der Meßgrößen. Alle Bedienfunktionen sowie die meßtechnische Auswertung, Anzeige und Registrierung sind dagegen über die PCI-Software in den PC integriert (**PCI** = *Personal Computer Instruments*). Dieses Konzept ermöglicht für alle PC-Meßgeräte eine einheitliche graphikorientierte Benutzeroberfläche.

Den beschriebenen Lösungen ist gemeinsam, daß die Zusatzkarten durch den Prozessor des PCs verwaltet werden, welcher auf deren Datenregister in gleicher Weise zugreift, wie auf Bereiche des eigenen Speichers (*memory mapped*).

Die Variante nach *Bild 5.3 d*) geht von einem externen Erweiterungsgerät aus, das einen eigenen Rechnerkern mit CPU, Programm und Datenspeicher besitzt und unabhängig vom PC Entscheidungen trifft. PC und Erweiterungsgerät sind über eine standardisierte Schnittstelle verbunden (z. B. *RS 232/V.24* oder *IEC-625-Bus*).
Mit *speziellen Interfaces* werden Übertragungsentfernungen im Kilometerbereich oder auch Vernetzungen möglich. Ein eigener Systembus führt auf eine Anzahl von Steckplätzen, wobei auch hier häufig Kompatibilität zu den PC-Karten besteht.

Programmierung der Messung und Auswertung der Meßdaten geschehen am PC, während die Messung selbst einschließlich Datenübertragung vom Rechner des Erweiterungsgerätes gesteuert wird.

5.3 MEßWERTAUSGABE DURCH PERSONAL COMPUTER

Die Art der Meßwertausgabe ist wesentlich bestimmt durch die *Benutzerschnittstellen*. Gemeint sind damit alle Hardware- und Software-Einrichtungen, aus denen sich die Benutzeroberfläche zusammensetzt.
Zu den *Hardware-Elementen* der Benutzeroberfläche gehören vor allem: Tastatur, Maus, Bildschirm und Drucker. Für viele meßtechnische Aufgaben sind heute die grafischen Fähigkeiten der Ausgabegeräte (Bildschirm und Drucker) notwendig.
Die *Software-Elemente* der Benutzeroberfläche betreffen einerseits unterstützende Bedienungsprogramme für meßtechnische Hardware-Erweiterungen für PCs und andererseits Standard-Programmpakete zur Erfassung, Auswertung,Präsentation und Dokumentation von Meßdaten.

5.4 DATENÜBERTRAGUNGSSYSTEME

5.4.1 Verbindungsstrukturen bei Meßsystemen

Grundsätzlich muß zwischen Schnittstellen für *bitparallele* und *bitserielle Datenübertragung* unterschieden werden. Im allgemeinen haben bitparallele Schnittstellen den Vorteil einer größeren Übertragungsgeschwindigkeit, bitserielle dagegen den Vorteil eines geringeren apparativen Aufwands.

Bei der Zusammenschaltung von mehr als zwei Geräten zu einem Meßsystem können verschiedene Verbindungs-Strukturen vorliegen. *Bild 5.5* zeigt zwei wichtige *Beispiele*.

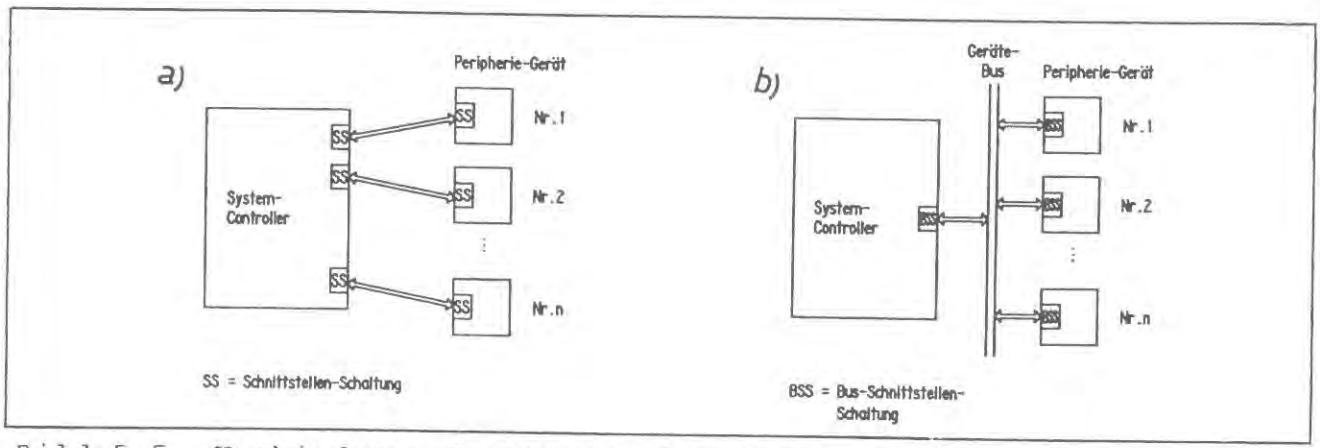


Bild 5.5 *Verbindungs-Strukturen bei Meßsystemen*
a) *sternförmige Struktur*
b) *Bus-Struktur*

Eine **sternförmige Struktur** liegt dann vor, wenn im Controller für jedes anzuschließende Gerät eine eigene bilaterale Schnittstelle vorgesehen wird (*Bild 5.5 a*). Diese Lösung erfordert einen mit der Zahl der anzuschließenden Geräte wachsenden Aufwand für die Schnittstellen-Schaltungen und für die Verkabelung. Der Vorteil liegt in der recht einfachen organisatorischen Abwicklung der Datenübertragung. Beispiel für eine zweiseitige Schnittstelle ist die *bitserielle RS232-Schnittstelle*.

Eine Alternative zur sternförmigen Struktur ist die **Bus-Struktur** (*Bild 5.5 b*). Hier wird im Prinzip nur ein durchgehendes Verbindungskabel mit Anzapfungen und nur eine Schnittstelle im Controller benötigt. Der Aufwand steigt mit der Zahl der anzuschließenden Geräte kaum an. Nachteilig wirkt sich aus, daß Datenübertragungen verschiedener Gerätepaare nicht gleichzeitig sondern nur nacheinander abgewickelt werden können. Als Beispiel für eine Bus-Schnittstelle sei der anschließend behandelte *IEC-Bus* angeführt.

Digitale Bus-Systeme, im Sinne der Gerätetechnik, dienen dem Austausch von Steuersignalen und Daten zwischen verschiedenen Baugruppen oder Geräten, die im Rahmen einer Meß- oder Automatisierungsaufgabe zusammenwirken müssen.
Sie bestehen aus aufeinander normgemäß abgestimmten Logiksystemen in den einzelnen beteiligten Geräten, die den Aufbau, den Ablauf und den Wiederabbau der Datenverbindungen steuern und überwachen, aus Leitungssystemen, welche für Nahbereichsverbindungen in der Regel vieladrig, für Fernbereichsverbindungen nach Möglichkeit zweiadrig (z. B. koaxial, rein seriell) sind, sowie schließlich aus gerätespezifischen Anpassungsschaltungen innerhalb der einzelnen Geräte.

Entwicklungsziel ist jeweils eine möglichst weitgehende, allgemeine Normung, um zu erreichen, daß Geräte verschiedener Hersteller an ein derartiges Bussystem angeschlossen werden können und dann nach Möglichkeit sofort störungsfrei mit den übrigen beteiligten Geräten zusammenwirken können. In den nachfolgenden Abschnitten sind einige Beispiele für Bus-Systeme angeführt.

5.4.2 Grundlagen von Bus-Systemen

Ein Bus-System in der elektronischen Gerätetechnik kann am besten mit einem wirklichen Bus-System verglichen werden, woher diese Bezeichnung auch herrührt (*Bild 5.6*).

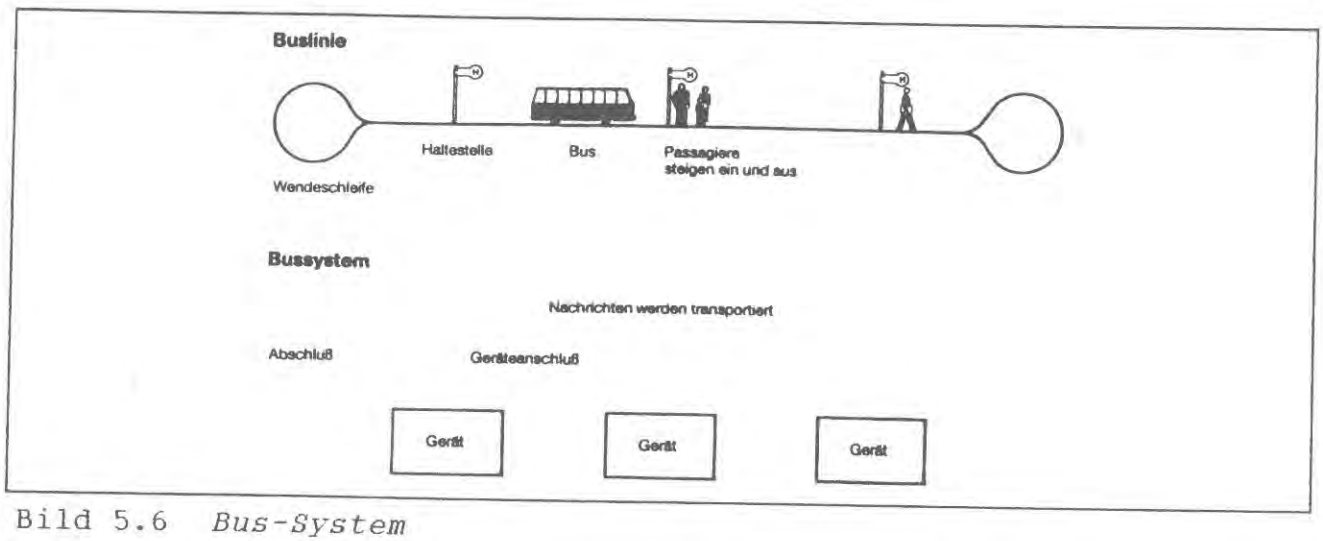


Bild 5.6 *Bus-System*

Der Hauptzweck des speziellen IEC-Bus ist es, Informationen zwischen zwei oder mehreren Geräten ("*DEVICES*") auszutauschen. Bevor Daten ausgetauscht werden können, müssen die Geräte entsprechend dem benötigten Übertragungsprotokoll konfiguriert werden. Der IEC-Bus-Standard legt die elektrischen und mechanischen Spezifikationen, das Kontrollprotokoll, die Steuerbefehle usw. fest.

Ein Beispiel soll zeigen, wie die Kontrolle von Geräten über den IEC-Bus betrachtet werden kann:

Eine Diskussion bzw. die ganze Sitzung wird von einem Moderator geleitet. Die Sitzungsteilnehmer haben zwar die Möglichkeit, untereinander zu kommunizieren, sie üben aber keine direkte Kontrolle über das Geschehen aus, dies kann nur der Vorsitzende (Moderator).
Der *Moderator* in einem IEC-Bus-System ist der **Systemkontroller.** Durch ihn wird bestimmt, welches Gerät Daten senden kann, welches Gerät der "*Sprecher*" ist, und wann es senden kann. Der Systemkontroller bestimmt auch, wann welche Geräte Daten empfangen können, wann welche Geräte "*Hörer*" sind und welches Gerät von ihm Kontrollerfunktion ersatzweise übernehmen soll.

Die Aufgabe des Moderators ist sicherzustellen, daß bei jeder Diskussion nur eine Person spricht. Beim IEC-Bus wird diese Aufgabe vom Kontroller übernommen. Er stellt sicher, daß nur ein Gerät Daten an den Bus senden kann (als "Sprecher" aktiv ist). Weiters legt der aktive Kontroller fest, welche Geräte nur "Hörer" sind und welche Geräte die Daten zur Zeit nicht benötigen. Durch die *"ATTENTION"-Leitung* werden inaktive Geräte wieder aktiviert, wodurch Bus-Befehle an das Gerät gesendet werden, die das Gerät zum "Sprecher" oder "Hörer" werden lassen.
Der Zustand der "ATTENTION"-Leitung bestimmt, ob die an ein Gerät gesendeten Daten als Befehle zu interpretieren sind. Wenn die "ATTENTION"-Leitung nicht aktiviert ist, sind die übertragenen Zeichen als Daten oder Mitteilungen zu werten, wenn sie aktiviert ist, sind es IEC-Bus-Befehle.

Während der Datenaustausch zwischen "Sprechern" und "Hörern" meist nach genau festgelegten, einfachen Regeln verläuft, sind manchmal spezifische Befehle notwendig, um einzelne Funktionen auszuführen.

Wenn bei einer Diskussion der Moderator alles zu einem guten Ende gebracht hat, wird sie möglicherweise dadurch beendet, daß sich alle Teilnehmer mit einem *Händedruck* verabschieden.

Der IEC-Bus ist dabei etwas freundlicher, da bei jedem Datenaustausch ein **"HANDSHAKE"** ausgeführt wird. Der Grund liegt darin, daß sichergestellt werden muß, daß keinem Gerät am Bus irgendeine Information entgeht und daß keine Daten verloren gehen. Das IEC-Bus-Protokoll gewährleistet, daß schnelle und langsame "Hörer" am Bus arbeiten können, weil sie die Daten von derselben Quelle erhalten. Der Nachteil liegt dabei darin, daß die Datenübertragungsrate vom langsamsten "Hörer" bestimmt wird.

Wird mit dem Bus gearbeitet, so ist es nützlich, sich die Analogie mit der Diskussion vor Augen zu halten:

Moderator	---	Systemkontroller
Mitglieder	---	Geräte am Bus
Redner	---	"Sprecher" (TALKER) oder Datenquelle
Zuhörer	---	"Hörer" (LISTENER)
Verhaltensregeln	---	Befehle und Funktionen
Anstandsregeln	---	Hardware "HANDSHAKE"

Folgende Punkt seien noch besonders hervorgehoben:

- jede beliebige Anzahl von Geräten kann "Hörer" sein, aber nicht alle müssen die Daten benutzen;
- nur ein Gerät kann gleichzeitig "Sprecher" sein und Funktionen an einen anderen übergeben, sonst geraten die Daten durcheinander;
- ein "Sprecher" wird sich normalerweise nicht selbst zuhören ("Hörer" von sich selbst sein).

5.4.3 IEC-Bus-Systeme

Der IEC-Bus (International Electrotechnical Commission) ist von der Normvorstellung her für Kopplung von fernlesbaren und fernsteuerbaren Meßgeräten untereinander und natürlich mit Registriergeräten und Steuergeräten innerhalb etwa eines Laboratoriumsbereiches gedacht. Eine Anzahl von maximal 15 Geräte können über einen insgesamt bis zu 20 m langen Übertragungsweg verbunden werden. Das System überträgt Gerätenachrichten *bitparallel* und *bytseriell* (1 Byte umfaßt ein 8 Bit-Datenwort). Es kann eine Datenübertragungsrate von etwa maximal 200 kByte/s erreicht werden, natürlich sind Sonderentwicklungen möglich.

Die europäische **IEC 625-Norm** und die amerikanische **Vornorm IEEE 488** (**IEEE** = *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) stimmen in allen elektrischen und logischen Einzelheiten überein, jedoch nicht in der Wahl der Steckverbindungen. Die IEC-Norm benutzt einen 25-poligen Stecker, die IEEE-Norm einen 24-poligen Stecker. Nunmehr wurde der IEEE-Stecker auch von der DIN-IEC 625 als offizieller IEC-Stecker übernommen. Beim Übergang von älteren Geräten amerikanischer Hersteller auf Geräte z. B. europäischer Hersteller müssen Adapter verwendet werden.
Weitere, firmeneigene Bezeichnungen des Bussystems sind **HP-IB** (*Hewlett-Packard Interface-Bus*) und **GPIB** (*General Purpose Interface-Bus*).

5.4.4 Strukturen von Meßsystemen mit IEC-Bus

Beim Einsatz von Meßgeräten mit IEC-Bus-Schnittstellen hängt der Aufbau der Meßgerätekonfiguration davon ab, in welcher Weise die spezielle Meßaufgabe zu lösen ist. Je nach der Komplexität der

Meßgerätekonfiguration gibt es mehr oder weniger anspruchsvolle Strukturen zur Erfüllung der Meßaufgaben.

Die einfachste Struktur eines Meßsystems gemäß *Bild 5.7* besteht in einer linearen Anordnung der Geräte am IEC-Bus. Der Anschluß des Prüflings erfolgt dabei direkt an die Meßgeräte. Dabei sind drei Beschränkungen des IEC-Bus-Systems zu beachten:

1. maximale Gerätezahl = 15 (einschließlich Kontroller);
2. maximale Buslänge = 20 m (2 m zwischen Geräten);
3. maximale Datenrate = 1 Mbit/s.

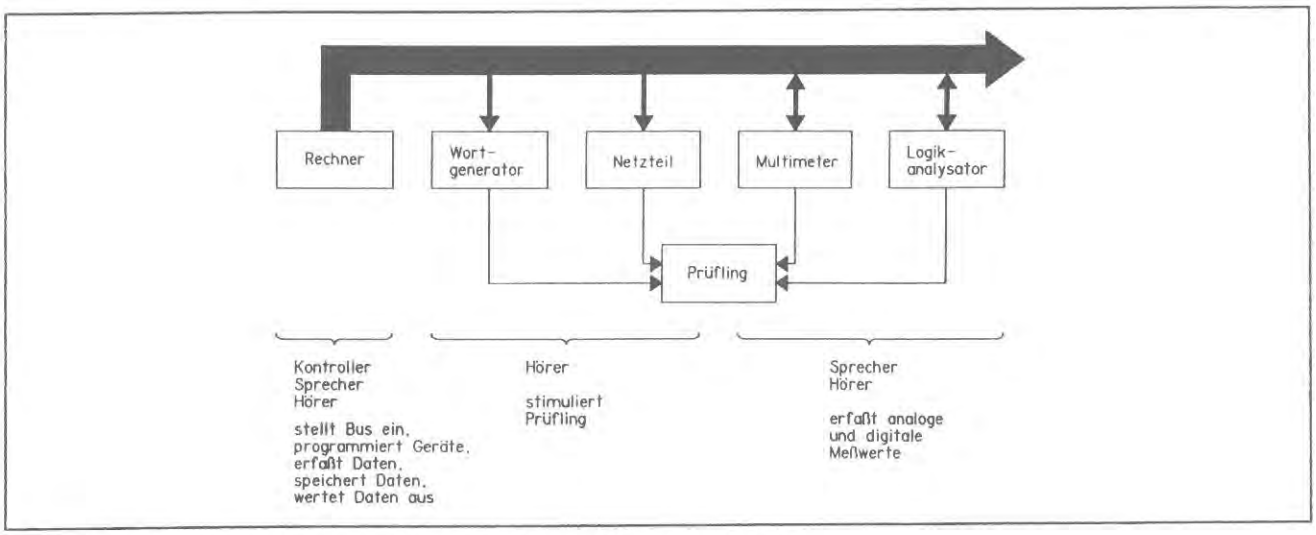


Bild 5.7 *Rechner als IEC-Bus-Kontroller*

Sollen nun mehrere Prüflinge auf der gleichen Anlage mit wechselnden Anforderungen gemessen werden, empfiehlt sich der Einsatz einer Schaltmatrix oder eines Relaisscanners, die natürlich zweckmäßig ebenfalls über den IEC-Bus zu steuern sind. Diese Anordnung wird in *Bild 5.8* gezeigt.

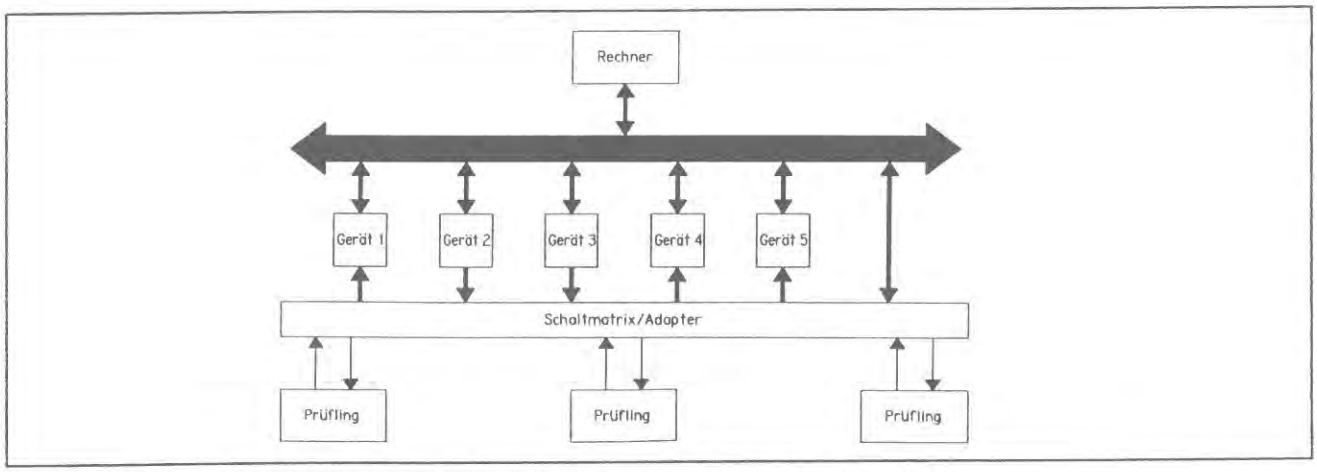


Bild 5.8 *Systemstruktur mit zentraler Kontrolle*

Stellen die Beschränkungen des IEC-Bus, wie oben angegeben ein Hindernis bei der Realisierung eines bestimmten Meßsystems dar, so läßt sich der IEC-Bus mit Zusatzgeräten erweitern, wie exemplarisch in *Bild 5.9* gezeigt wird.

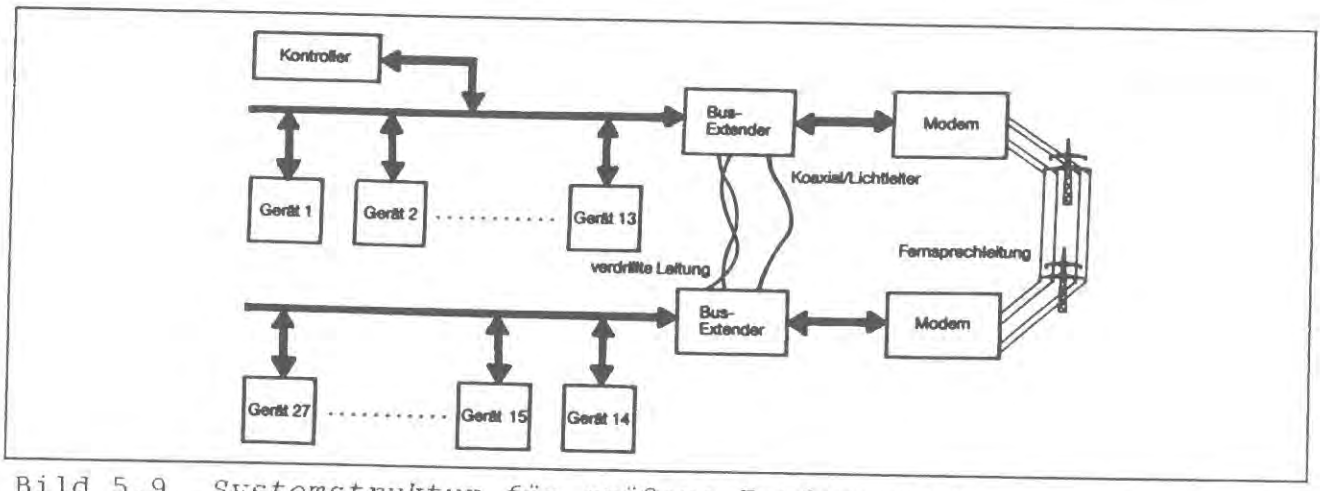


Bild 5.9 *Systemstruktur für größere Entfernungen*

5.4.5 Die RS232/V.24-Schnittstelle

Die RS232-Schnittstelle ist die geläufigste Bezeichnung für eine weitverbreitete *bitserielle, bilaterale Schnittstelle*, deren Eigenschaften von drei gleichartigen Normen verschiedener nationaler und internationaler Normungsgremien definiert sind: der Norm RS 232C der amerikanischen EIA, der V.24-/V.28-Norm des CCITT und der DIN 66020/66259. Diese Normen sind insofern nicht ganz deckungsgleich, als sie verschiedene Signalnamen verwenden und die Definitionen der funktionellen und der elektrischen Eigenschaften teilweise getrennt aufgeführt werden.

Ursprünglich war die serielle Schnittstelle RS232 zum Anschluß eines Modems zur Datenfernübertragung gedacht. Bei praktisch jedem Personal Computer gehört heute eine serielle Schnittstelle zur Grundausstattung. Deshalb wird sie immer häufiger als *universelle Schnittstelle* eingesetzt, als die sie ursprünglich gar nicht konzipiert war. In der Praxis wird die RS232-Schnittstelle häufig zur direkten Kopplung von Datenendeinrichtungen, d.h. von Computern mit Peripheriegeräten eingesetzt. Eine Vielzahl von Geräten, wie z.B. Drucker, Plotter, Scanner, "Maus" und Tastaturen werden an der RS232-Schnittstelle betrieben. Daneben wird sie auch zur direkten Verbindung unterschiedlicher Computer eingesetzt.

Eine Datenverbindung über die serielle Schnittstelle einzurichten, ist oft problematisch. Der Grund liegt in den außerordentlich vielen Möglichkeiten der *Einstellung von Schnittparametern* und in den unterschiedlichen Kabelverbindungen. Dazu kommen oft noch Software-Probleme, die auf mangelnder Verständigung verschiedener Hersteller untereinander beruhen.

Der *Vorteil*, einmal entwickelte Geräte an ganz verschiedene Computer anschließen zu können, wiegt bei weitem den manchmal etwas schwierigeren Umgang mit der RS232-Schnittstelle auf. Speziell für den Einsatz im Elektroniklabor bietet sie entscheidende Vorteile:

- Es besteht praktisch keine Gefahr der Beschädigung des Rechners durch Fehler im Umgang mit der Schnittstelle. Geräte dürfen ohne Abschalten des Computers beliebig verbunden und getrennt werden. Dem sicheren Arbeiten kommt auch die Möglichkeit einer gewissen räumlichen Trennung von Computer und Meßaufbau zugute.

- Wegen der relativ geringen Übertragungsgeschwindigkeit ergibt sich eine sehr große Übertragungssicherheit auch bei längeren Verbindungen, und es besteht kaum eine Gefahr der Entstehung von Störstrahlungen.

- Man kommt mit sehr einfachen Verbindungskabeln aus, die problemlos auch mit einer Potentialtrennung ausgestattet werden können. Damit kann man empfindliche Meßaufbauten vor Störeinflüssen aus dem Computer schützen.

5.5 SOFTWARE-PROGRAMME

Nach der hardwareseitigen Adaptierung des Meßobjektes kommt das Problem der *Meßwerterfassung und -verarbeitung* auf den Meßtechniker zu. Das geschieht oft zu einem Zeitpunkt, zu dem noch nicht endgültig feststeht, was im einzelnen mit dem erhobenen Datenmaterial "passieren" soll. Deshalb ist zumindest zu diesem Zeitpunkt *Flexibilität* vorrangig. Für die Meßwerterfassung und -verarbeitung steht eine umfangreiche Palette an Softwareprodukten zur Verfügung.

Die Entscheidung für ein bestimmtes Produkt ist abhängig von einer Reihe applikationsbedingter Größen und setzt die unbedingte Kenntnis der meßtechnischen Problematik voraus. Als Entscheidungskriterien für ein Softwareprodukt können

- Bedienbarkeit,
- Adaptierbarkeit und
- Verarbeitungsgeschwindigkeit angesehen werden.

Leicht bedienbare Systeme sind heute *interaktiv* zu führen. Durch einen Bedienerkatalog, etwa über Fenster und Menüs, sind sie weitgehend gegen Fehleingaben gesichert. Systeme, die auf einem festen, meist durch den Nutzer selbst zu erstellenden Programm beruhen, sind in manchen Fällen starr und nicht so komfortabel bedienbar.

Der Adaptierbarkeit von Software zur Meßwerterfassung und -verarbeitung sollte besonderes Augenmerk geschenkt werden. Im allgemeinen ist in der Meßtechnik nicht nur eine einzige konstante Applikation vorhanden, sondern unterschiedliche. Auch bei nur einer Applikation können sich die Anforderungen im Laufe der Zeit ändern. Einfache Systeme erlauben die dann erforderlichen Anpassungen kaum oder nur mit beträchtlichen Eingriffen in Schichten der Software, die dem Anwender nicht ohne weiteres zugänglich sind. Flexible Systeme erlauben anwenderspezifische Programmänderungen und sichern damit eine ständige **Adaptierbarkeit** an das betreffende Problem.

Der Begriff **Verarbeitungsgeschwindigkeit** kann unterschiedliche Bedeutung haben. Zum einen versteht man darunter die Abtast- und Abspeicherungsrate (*Datendurchsatz*) des Systems oder aber auch die Auswerte- (*Kennwertermittlung*) bzw. Darstellzeiten (*Datenpräsentation*). Zum anderen kann damit die Reaktionszeit des Systems bei einer Echtzeitentscheidung beschrieben werden.

Zur Auswahl eines die betreffende Applikation befriedigenden Softwareproduktes sind neben der Erfüllung der meßtechnischen Aufgabenstellung die erforderlichen Programmierkenntnisse, die verfügbare Programmentwicklungs- und -testzeit, die entstehenden Kosten sowie zukünftige Applikationen zu betrachten.

Betrachtet man nun nach den beschriebenen Kriterien verfügbare Software, kommt man mitunter recht schnell zu dem Ergebnis, daß trotz eines erheblichen Funktionsumfanges und dementsprechender Kosten eine Applikation von einem Softwareprodukt oft nicht in dem gewünschten Maße unterstützt wird und demzufolge ein weiteres Produkt hinzugezogen werden müßte. In diesen Fällen müssen dann noch die erhobenen Meßdaten in das Format der verschiedenen Analysenprogramme konvertiert werden.

Vor diesem Hintergrund entsteht zwangsläufig die Frage nach einer *"maßgeschneiderten" Meßtechnik-Software*, die dann natürlich alle Forderungen des Meßtechnikers in geeigneter Weise erfüllt. Geht man diesen Weg, sollte auf eine Programmiersprache zurückgegriffen werden, die interaktives Arbeiten und einen problemlosen Zugriff auf die Hardware-Ressourcen des Rechners zuläßt, eine einfache Bedienung der Schnittstellen zur Meßtechnik ermöglicht, Echtzeitanforderungen erfüllt und eine weitgehende Standardisierung aufweist, die die Portabilität der so geschaffenen Software zu sichern hilft.

Die Software für PC-gestütze Meßsysteme ist heute verfügbar in Form *integrierter Programmpakete* mit modularem Aufbau. Beispiele für zugehörige **Software-Komponenten** sind:

- *Bediensoftware*

Basierend auf einer graphikorientierten Benutzerschnittstelle ermöglicht sie eine einfache Dialogführung durch übersichtliche Menütechnik sowie die gleichzeitige Bedienung und Überwachung von Meßstellen in mehreren Fenstern auf dem Bildschirm durch angepaßte Windowtechnik. Dabei lassen sich Meßprotokolle am Bildschirm erstellen und abspeichern sowie zur Dokomentation auf Drucker oder Plotter ausgeben.

- *Graphikprogramme*

Hierzu gehören unter anderem Meßkurvendarstellungen sowie Dateiverwaltungen von Meßkurven, Meßwerten und Formeln. Graphikprogramme unterstützen die Ausgaben auf Bildschirm, Drucker und Plotter.

- *Programmgeneratoren*

Diese ermöglichen die Erstellung automatisch ablaufender Meßprogramme auch ohne Programmierkenntnisse. Inbegriffen sind dabei auch komplexe Bildschirmausgabefunktionen wie Kurven, Texte, Digitalanzeigen und Darstellungen von analogen Ausgaben.

- *Signalverarbeitungsprogramme*

Während des Meßbetriebs werden die Meßwerte z. B. mit Hilfe von statistischen Funktionen oder Fourier-Transformationen fortlaufend umgerechnet. Nach der Signalanalyse erfolgt die Ergebnisausgabe zur Dokumentation oder die Ergebnisspeicherung zur Archivierung. Die Vergrößerung (*Zoom*) von Meßkurvenabschnitten für die exakte Ausmessung von Kurvendaten ist dabei sehr hilfreich.

- *Programme zur Geräteeinbindung*

Diese ermöglichen die Einbindung von IEC-Bus-Meßgeräten beliebiger Hersteller.

Als Beispiel sei ein *Programmpaket für Meßdatenerfassung, Steuerung und Regelung* angeführt. Mit Hilfe der PC-gestützten Meßtechnik wird ein Meßsystem zur Temperaturkontrolle aufgebaut, welches in *Bild 5.10* dargestellt ist.

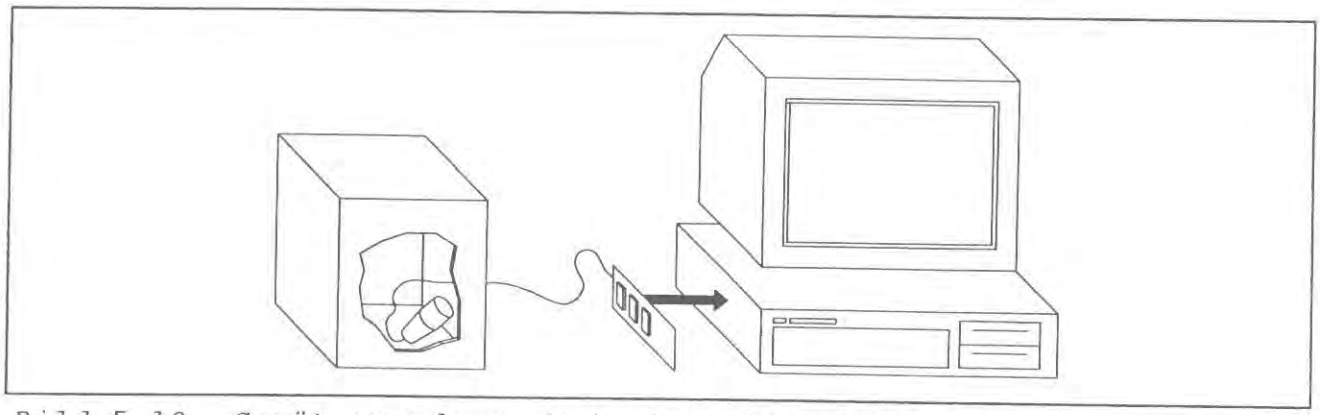


Bild 5.10 *Geräteanordnung bei einer PC-gestützten Temperaturmessung*

In der Kammer, in der die Raumtemperatur gemessen werden soll, wird ein Temperatursensor eingebracht, der die erfaßte Temperatur in Spannung umwandelt. Der Temperatursensor ist an einer Meßdatenerfassungszusatzkarte im Personal Computer angeschlossen, welche die Spannung in digitale Daten umwandelt. Vom Bildschirm des

PCs kann dann die Temperatur in der Kammer an einem virtuellen Thermometer abgelesen werden.
Durch numerische Eingabe eines oberen Temperaturbereiches auf der Frontplatte kann auch die laufend gemessene Temperatur mit der z.B. eingestellten höchstzulässigen Temperatur verglichen werden. Bei Überschreitung dieser Grenztemperatur kann zusätzlich dem Anwender eine Temperaturüberschreitung akustisch mitgeteilt werden. Am Personal Computer wird die Meßkurve des Temperaturverlaufs graphisch dargestellt und weiters kann das Schaltdiagramm aus vordefinierten oder eigenen Funktionsblöcken konstruiert werden.

5.6 ZUSAMMENFASSUNG

Abschließend sei noch im *Bild 5.11* die Gegenüberstellung Meßsystem ohne und mit Rechnerunterstützung dargebracht. Es zeigt sehr deutlich, wie der Mensch durch die Rechnerunterstützung auf Geräte, Informationen und Tätigkeiten, die für eine Messung von Bedeutung sind, Einfluß nimmt.

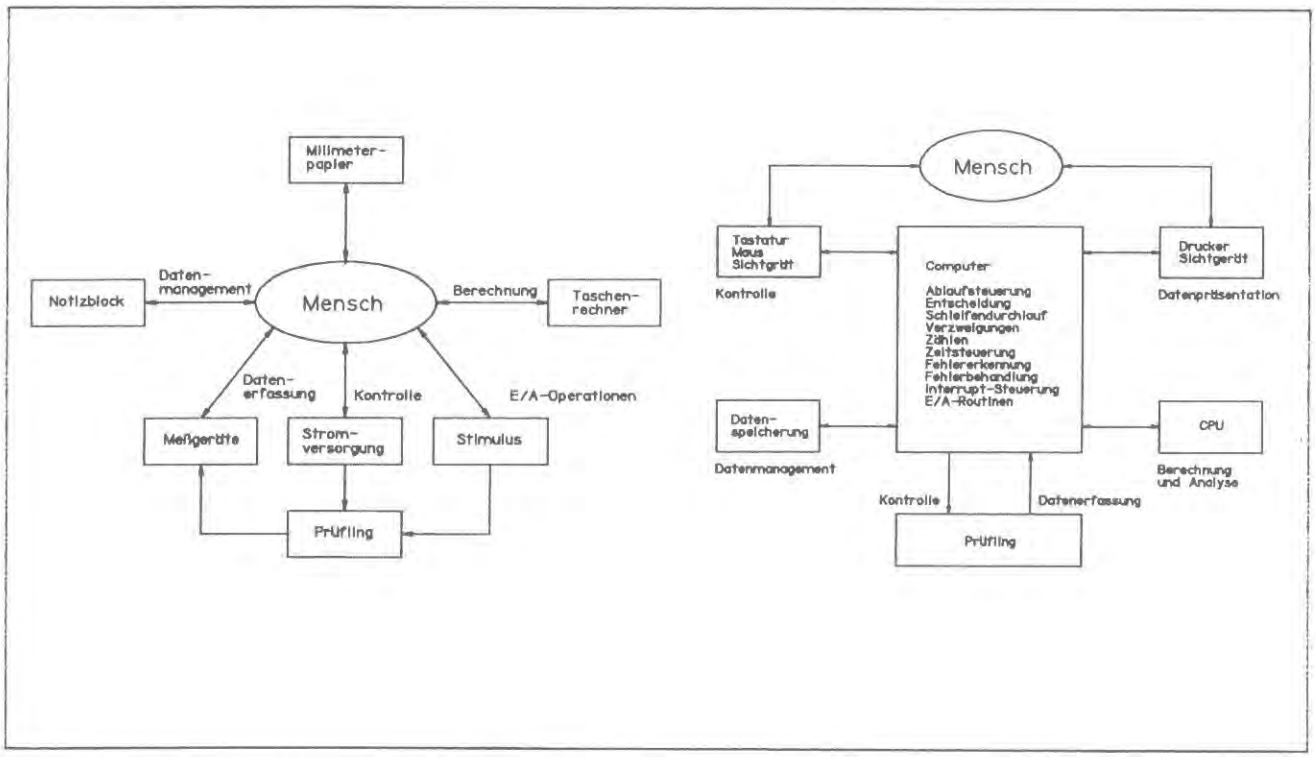


Bild 5.11 *Gegenüberstellung Meßsystem a) ohne und b) mit Rechnerunterstützung*

Das *Bild 5.12* zeigt einen weiteren wesentlichen Einfluß des Rechnereinsatzes auf die Meßtechnik. Der Anteil der für die Auswertung nutzbarer Meßinformationen wird bei manueller Auswertung infolge von großen Informationsverlusten auf einen geringen Anteil reduziert, während bei Rechnerunterstützung die Auswertung in nahezu gesamtem Umfang möglich ist.

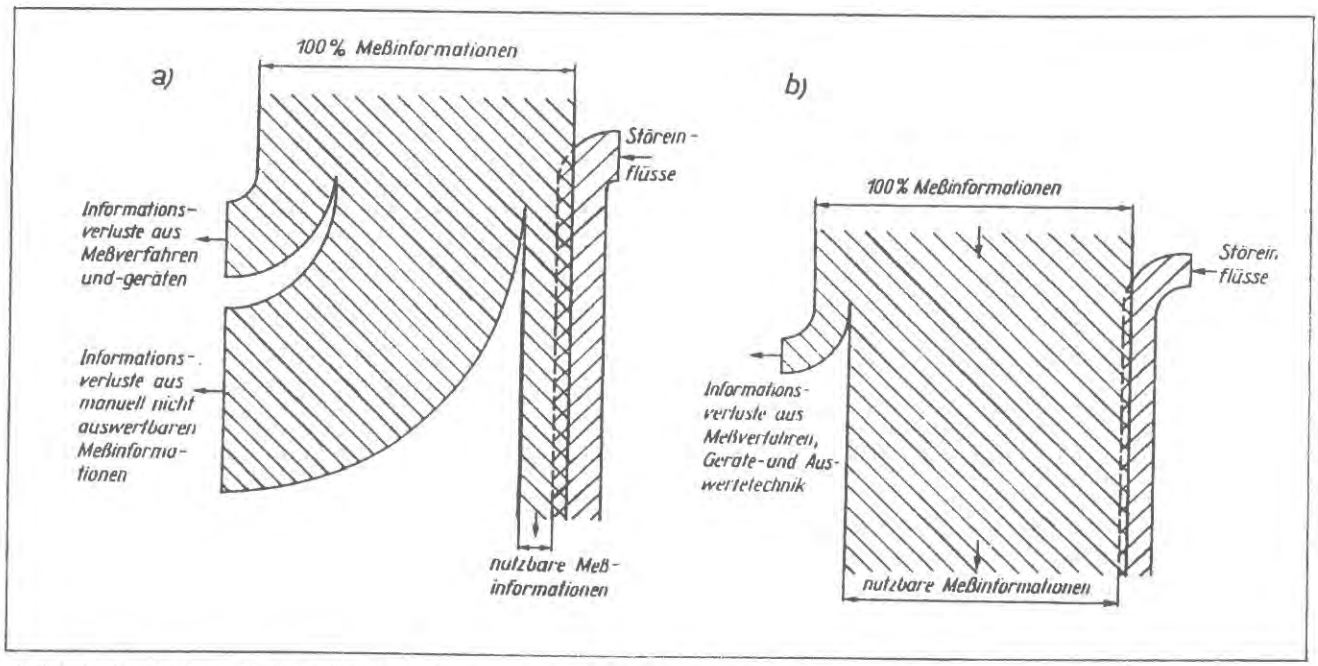


Bild 5.12 *Schaubild der nutzbaren Meßinformationen*
a) bei manueller Auswertung
b) bei rechnergestützter Auswertung

Applikation der Meßtechnik:

Oft wird heute auch die Meinung vertreten, daß die Meßtechnik als Teilbereich der Informationstechnik anzusehen ist. Dies basiert auf dem Gedanken, daß mit dem Messen Informationen über Qualität bzw. Quantität gewonnen werden.
Andererseits fungiert die Meßtechnik als eine Art "Enabling Science", da sie die Basis für andere Wissenschaften darstellt, die durch die Informationen der Meßtechnik erst ermöglicht werden.

ANHANG

2.4.5 Fehlerfortpflanzung

Wird auf Grund von einzelnen *Meßwerten* durch mathematische Auswertung ein Meßergebnis ermittelt, gehen auch die Meßfehler in das Ergebnis ein. Man spricht deshalb von der **Fehlerfortpflanzung.**

Auf Grund der unterschiedlichen Struktur von systematischen und zufälligen Fehlern sind auch deren Fortpflanzungsgesetze je eigener Art. Daher kann jede der Meßgrößen x_i sowohl mit einem systematischen Fehler Δx_i als auch mit einer Meßunsicherheit U_{x_i} behaftet sein.

2.4.5.1 Fortpflanzung der systematischen Meßfehler

Das Meßergebnis y wird aus m verschiedenen Meßwerten x_i bestimmt (mittelbare Messung). Im statischen Fall wird dieses Meßergebnis durch eine bekannte Funktion mit den m Meßgrößen, die meßbar und mit den Fehlern Δx_i behafteten sind, verknüpft:

$$y = f(x_1, \ldots, x_i, \ldots, x_m)$$

Für kleine Abweichungen der einzelnen Meßwerte läßt sich die daraus resultierende Abweichung von y nach dem *linearen Fehlerfortpflanzungsgesetz* durch die Glieder 1. Ordnung einer Taylorreihe näherungsweise berechnen.
Werden nun die kleinen Abweichungen Δx_i als die systematischen Fehler, d.h. als die Abweichungen vom richtigen Meßwert aufgefaßt, läßt sich der Fehlereinfluß auf das Meßergebnis für systematische Fehler als *totales Differential* ermitteln:

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \ldots + \frac{\partial f}{\partial x_m} \Delta x_m$$

Hierbei ist zu beachten, daß der systematische Fehler vorzeichenbehaftet ist. Dadurch können durchaus auch Fehlerkompensationen auftreten.

2.4.5.2 Fortpflanzung der zufälligen Meßfehler

Anders verhält es sich bei der Fortpflanzung der Meßunsicherheiten der Meßgrößen auf das Ergebnis.
Der zufällige Fehler als Einzelerscheinung ist seiner Natur nach nicht vorausbestimmbar. Wohl aber läßt sich über die statistische Eigenschaft eine Aussage machen. Bei den Gaußverteilten Fehlern ist die Standardabweichung σ das charakteristische Maß für deren Verteilungsdichte. Die Frage nach der Fehlerfortpflanzung bezieht sich daher auf die Art der Fortpflanzung der statistischen Kenngröße σ.

Hier gilt also das *quadratische* oder *Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz*:

$$U_y = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} U_{x1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} U_{x2}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} U_{xm}\right)^2}$$

U_y ist die Unsicherheit, mit der das Ergebnis $y = f(x_1, \ldots, x_m)$ behaftet ist.

2.4.5.3 Beispiel zur Fehlerfortpflanzung

Das Trägheitsmoment eines Körpers, z.B. eines Gleichdicks, kann experimentell nach der **Bifilarmethode** bzw. der **Trifilarmethode** (*Bild A/2.4*) bestimmt werden.

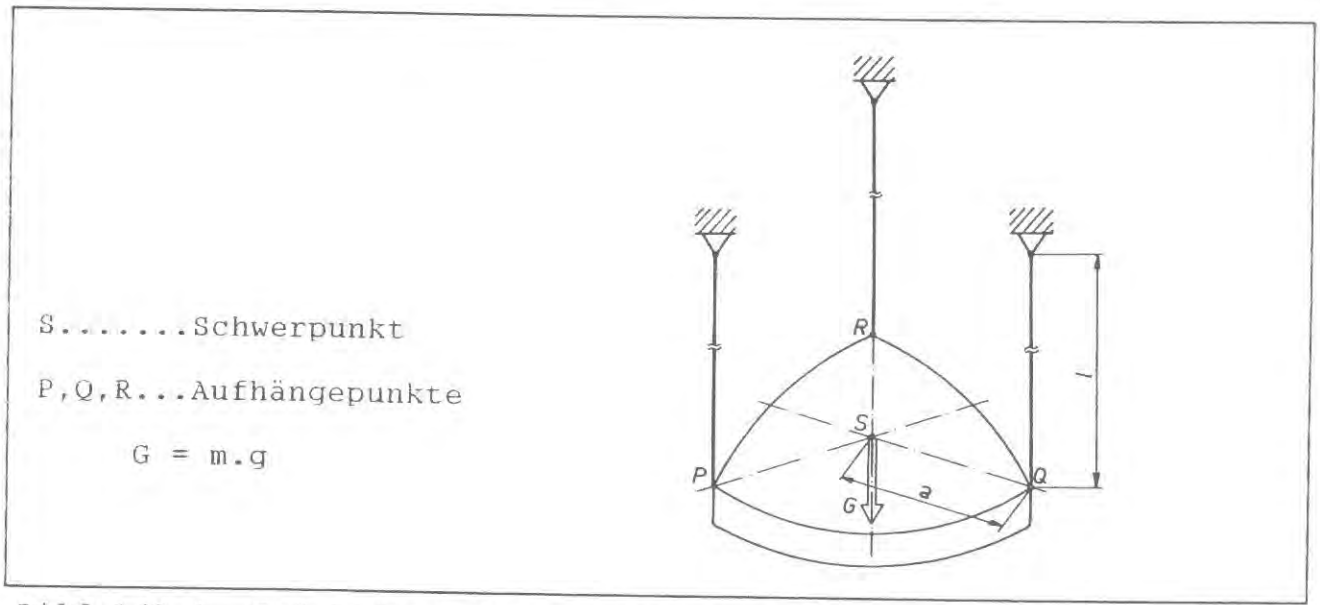


Bild A/2.4 *Trägheitsmomentenbestimmung eines Gleichdicks nach der Trifilarmethode*

Meßgrößen:		
	Schwingungsdauer	T, ... ΔT, U_T
	Masse	m, ... Δm, U_m
	Abstand	a, ... Δa, U_a
	Länge	l, ... Δl, U_l

Aus der gemessenen Schwingungsdauer, den geometrischen Abmessungen und dem Eigengewicht des Körpers wird das Trägheitsmoment um die normal auf die Oberfläche des Gleichdicks stehende Schwerpunktsachse errechnet.

Berechnung des Massenträgheitsmomentes:

$$I = \frac{m \cdot g \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot l} \cdot T^2$$

Der Fehlereinfluß auf das Meßergebnis für systematische Fehler

$$\Delta I = \frac{\partial I}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial I}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial I}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial I}{\partial l} \Delta l$$ ergibt sich zu:

$$\Delta I = \frac{m \cdot g \cdot a^2 \cdot T^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot l} \left\{ 2\frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta m}{m} + 2\frac{\Delta a}{a} - \frac{\Delta l}{l} \right\}$$

Die Fortpflanzung der Meßunsicherheiten der Meßgrößen folgt nach dem quadratischen oder Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$U_I = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial T} U_T\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial m} U_m\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial a} U_a\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial l} U_l\right)^2}$$

$$U_I = \pm \sqrt{\left(\frac{m \cdot g \cdot a^2 \cdot T}{2 \cdot \pi^2 \cdot l} U_T\right)^2 + \left(\frac{g \cdot a^2 \cdot T^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot l} U_m\right)^2 + \left(\frac{m \cdot g \cdot a \cdot T^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot l} U_a\right)^2 + \left(- \frac{m \cdot g \cdot a^2 \cdot T^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot l^2} U_l\right)^2}$$

Der Begriff Qualität gewann in den letzten Jahren zunehmend größere Bedeutung, und damit wurden auch, vor allem für das industrielle Geschehen, Qualitätssicherung und Qualitätsmanagement immer wichtiger - einerseits allgemein bei der Erstellung von Produkten jeglicher Art, andererseits aber in Verbindung mit Meßtechnik bei der Erzeugung unterschiedlichster technischer bzw. materieller Produkte. Dies vor allem auf Grund der heute allgemein anerkannten Tatsache, daß Wirtschaftsbetriebe nur dann im internationalen Wettbewerb konkurrenzfähig bleiben, wenn die Qualität ihrer Produkte gesichert ist. Dabei kommt der Meßtechnik im Produktlebenszyklus, insbesondere von der Entwicklung bis zur Übernahme durch den Anwender, eine hervorragende Bedeutung zu.

P. Herbert OSANNA, Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr., geboren 1941. Leiter der Abteilung Austauschbau und Meßtechnik am Institut für Fertigungstechnik der Technischen Universität Wien. Vorsitzender des Fachnormenausschusses "Anforderungen und Prüfungen zur Geometrischen Produktspezifikation" des Österr. Normungsinstitutes.

Ales KRSEK, Univ. Prof. Dr., geboren 1940. Leiter des Lehrstuhls für Produktionssysteme der Fakultät Maschinenbau an der Slowakischen Technischen Universität Bratislava, Slowakei.

Daniel PROSTREDNIK, Dr., geboren 1961. Vertragsassistent an der Abteilung, Mitarbeiter des Fachnormenausschusses "Anforderungen und Prüfungen zur Geometrischen Produktspezifikation" des Österr. Normungsinstitutes.

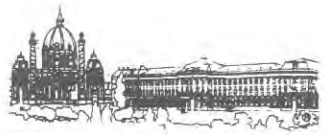
Ivan KURIC, Univ. Doz. Dr., geboren 1964. Stellvertretender Leiter des Lehrstuhls für Meßtechnik und Automatisierungstechnik der Fakultät Maschinenbau an der Universität Zilina, Slowakei.

TU Wien
Abteilung Austauschbau und Meßtechnik
Karlsplatz 13/3113
A-1040 Wien

Layout: F. Eichhorn
ISBN 3-901888-01-2
© 1998 Abteilung Austauschbau und Meßtechnik

Osanna/Krsek/Prostrednik/Kuric - Qualität und Fertigungsmeßtechnik

TU
AUM



Qualität und Fertigungsmeßtechnik

P.H. Osanna
A. Krsek
D. Prostrednik
I.Kuric

Abteilung Austauschbau und Meßtechnik

TU—AUM