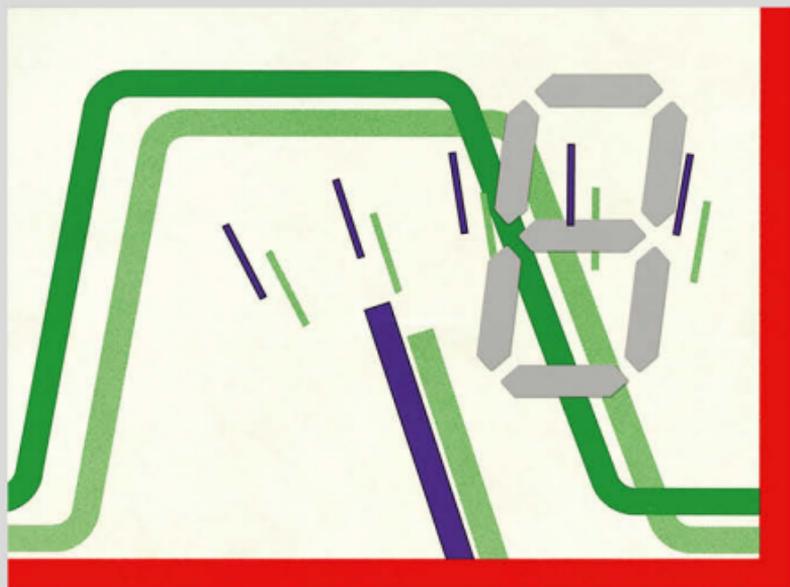


Böttle / Boy / Clausing

Elektrische Mess- und Regelungs- technik

Die Meisterprüfung



Böttle/Boy/Clausing/Klaas
Elektrische Mess- und Regelungstechnik

Die Meisterprüfung

Elektrische Mess- und Regelungstechnik

Dipl.-Ing. Peter Böttle

Dipl.-Ing. Günter Boy

Dipl.-Ing. Holger Clausing

Marc Klaas

12., aktualisierte Auflage

Vogel Business Media

Weitere Informationen unter
www.vbm-fachbuch.de

ISBN 978-3-8343-3397-1

12. Auflage. 2017

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form
(Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen
Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt
oder verbreitet werden.

Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich
genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 1977 by Vogel Business Media
GmbH & Co. KG, Würzburg

Umschlaggrafik: Michael M. Kappenstein, Frankfurt

Vorwort

Dieses Vogel Fachbuch erscheint in der Reihe **Die Meisterprüfung in der Elektrotechnik** und behandelt die elektrische Messtechnik elektrischer und nichtelektrischer physikalischer Größen sowie die Regelungstechnik.

Im ersten Teil liegt der Schwerpunkt in der Terminologie der Messtechnik und Definitionen elektrischer Größen. Die Behandlung der klassischen elektromechanischen Anzeiger wurde entsprechend der heutigen Bedeutung reduziert. Dafür wurden Messumformer für elektrische Größen aufgenommen.

Die Messwandler, registrierende Messgeräte und Lastüberwachungseinrichtungen für die Energietechnik werden in eigenen Kapiteln behandelt.

Das Kapitel für die elektrische Messung nichtelektrischer Größen, das die wichtigsten Verfahren der Umwandlung verschiedener Prozessgrößen, wie z.B. Temperatur, Kraft, Druck, Weg, Drehzahl, Füllstand und Durchflussmenge, in elektrische Signale behandelt, wurde um einige Arten von Sensoren erweitert. Auch die Verfahren der Messwertübertragung werden behandelt.

Ein eigenes Kapitel ist der prinzipiellen Wirkungsweise des **Oszilloskops**, seiner Bedienung und Messtechnik gewidmet.

Im regelungstechnischen Teil werden im Rahmen der Grundlagen Begriffe, charakteristische Merkmale der **Reglerarten**, **Stellglieder** und **Regelstrecken** erklärt und im Zusammenwirken an Beispielen erläutert. Das Kapitel schließt mit Hinweisen für die Einstellung stetiger Regler.

Dieser Band ist für jeden Leser geeignet, der sich in Wirkungsweise und Aufbau elektrischer Mess-, Überwachungs- und Regeleinrichtungen einarbeiten möchte.

Besondere Bedeutung erlangt er bei der **Meisterausbildung von Elektrikern** der energietechnischen Berufe wie Elektroinstallateuren, Elektromechanikern, Elektromaschinenbauern sowohl im Handwerk als auch in der Industrie.

Vorausgesetzt wird Grundwissen, wie es jede Lehre für einen Elektroberuf oder der zu dieser Buchreihe gehörende Band **Mathematische und elektrotechnische Grundlagen** vermittelt.

In einigen Abschnitten sind Grundkenntnisse der Elektrotechnik und der Digitaltechnik wünschenswert.

Die mit dem Buch erreichbaren **Lernziele** entsprechen den Anforderungen, die der **Zentralverband der Deutschen Elektrohandwerke** für die Meisterprüfung im Elektroinstallateur-, Elektromaschinenbauer- und Elektromechanikerhandwerk festgelegt hat.

Die heutige Form der Buchreihe **Die Meisterprüfung in der Elektrotechnik** ist das Ergebnis ständiger Erprobungen mit Meisterschülern der Bundes-Fachlehranstalt für das Elektrohandwerk in Oldenburg und bringt die umfangreichen Erfahrungen der Autoren im Handwerk und in der Industrie zum Ausdruck.

Die übersichtliche Gliederung der Fachthemen erleichtert dem Leser die Einarbeitung. Beispiele tragen zum besseren Verständnis der Fachprobleme bei.

Es wurden die neuesten Normen verwendet. Das Gleiche gilt für die Symbole und Kennbuchstaben in Schaltungen.

Für Lehr- und Übungszwecke wertvolle weitere Aufgaben mit Lösungen enthält der zu dieser Buchreihe gehörende Band **Aufgaben und Ergebnisse**.

Oldenburg/Würzburg
Verfasser und Verlag

In der Fachbuchreihe «Die Meisterprüfung in der Elektrotechnik» sind bisher erschienen:

Behrends: Elektrische Maschinen

Behrends / Wessels: Formeln und Tabellen Elektrotechnik

Böttle / Boy / Clausing: Elektrische Mess- und Regelungstechnik

Böttle / Friedrichs: Mathematische und elektrotechnische Grundlagen

Boy / Bruckert / Wessels: Elektrische Steuerungs- und Antriebstechnik

Boy / Dunkhase: Elektro-Installationstechnik

Dugge/ Eißner: Grundlagen der Elektronik

Folkerts / Baade: Hausgeräte-, Beleuchtungs- und Klimatechnik

Janßen / Soboll / Böttle / Friedrichs: Aufgaben und Lösungen Elektrotechnik

Siegismund: Werkstoffkunde

Wübbe: Telekommunikation

Ebenfalls in der Vogel Business Media sind in der Fachbuchreihe «Elektronik» erschienen:

Klaus Beuth/Olaf Beuth: Elementare Elektronik

Heinz Meister: Elektrotechnische Grundlagen
(Elektronik 1)

Klaus Beuth: Bauelemente
(Elektronik 2)

Klaus Beuth/Wolfgang Schmusch: Grundsaltungen
(Elektronik 3)

Klaus Beuth: Digitaltechnik
(Elektronik 4)

Helmut Müller/Lothar Walz: Mikroprozessortechnik
(Elektronik 5)

Wolfgang Schmusch: Elektronische Messtechnik
(Elektronik 6)

Klaus Beuth/Richard Hanebuth/Günther Kurz/Christian Lüders: Nachrichtentechnik
(Elektronik 7)

Wolf-Dieter Schmidt: Sensorschaltungstechnik
(Elektronik 8)

Klaus Beuth/Olaf Beuth: Leistungselektronik
(Elektronik 9)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Allgemeine Bestimmungen und Grundbegriffe	13
1.1 Größen und Einheiten	13
1.2 Messen und Messabweichungen	15
1.3 Unterteilung von Messgeräten	17
1.4 Empfindlichkeit und Auflösung von Messgeräten	18
1.5 Eigenabweichung und Genauigkeitsklasse	19
1.6 Einstellzeit	22
1.7 Skalen und Gehäuse von Analoganzeigern	23
1.8 Kenngrößen von Spannungen und Strömen	28
1.8.1 Arithmetischer oder linearer Mittelwert	29
1.8.2 Effektivwert	31
1.8.3 Gleichrichtwert und Formfaktor	35
2 Messung elektrischer Größen	37
2.1 Analoganzeiger für elektrische Größen	37
2.1.1 Dreheisen-Messinstrument	38
2.1.2 Drehspul-Messinstrument	40
2.1.3 Bimetall-Messinstrument	49
2.1.4 Elektrodynamisches Messinstrument	50
<i>Leistungsmessung im Drehstromnetz</i>	53
<i>Blindleistungsmessung</i>	55
2.1.5 Leistungsfaktor-Messinstrument	56
2.1.6 Frequenz-Messinstrument	58
2.1.7 Kontaktinstrumente	59
2.2 Elektronische Anzeiger	60
2.2.1 Digitale Anzeigeeinheiten	61
2.2.2 A/D-Wandler in digitalen Messinstrumenten	62
2.2.3 Elektronische Vielfachmessinstrumente	65
2.2.4 Elektronische Leistungsmessung	68
<i>Multiplizierer mit Hallgenerator</i>	68
<i>Time-Divisions-Multiplizierer</i>	69
2.2.5 Digitale Frequenzmessung	72
2.3 Messumformer für Starkstromgrößen	74
2.3.1 Ausgänge und Kennlinien von Messumformern	74
2.3.2 Messumformer für Wechselstrom und Spannung	76
2.3.3 Messumformer für Wirk- und Blindleistung	77
2.3.4 Messumformer für Leistungsfaktor	79
2.3.5 Messumformer für Netzfrequenz	79

3	Elektrizitätszähler	81
3.1	Smart Meter	82
3.1.1	Smart Meter Gateway	83
3.2	Einphasiger Induktionszähler	83
3.2.1	Aufbau und Wirkungsweise	83
3.3	Drehstromzähler	85
3.4	Messwandlerzähler	85
3.5	Gesetzliche Bestimmungen und Zählerschild	85
3.6	Blindverbrauchszähler	88
3.7	Schaltungen	89
3.7.1	Wirkverbrauchszähler	89
3.7.2	Blindverbrauchszähler	90
3.8	Sonderzähler	91
3.8.1	Mehrtarifzähler	91
3.8.2	Maximumzähler	92
	<i>Wirkungsweise</i>	92
	<i>Ablesen von Maximumzählern</i>	94
3.8.3	Überverbrauch- oder Subtraktionszähler	96
	<i>96-Stunden-Zähler</i>	96
3.8.4	Fernzähleinrichtungen	98
	<i>Impulsgeber</i>	98
	<i>Impulsempfängerzähler</i>	99
3.8.5	Lastüberwachungsanlagen	99
	<i>Wirkungsweise</i>	100
	<i>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</i>	101
4	Messwandler	103
4.1	Spannungswandler	103
4.1.1	Aufbau	103
4.1.2	Wirkungsweise	104
	<i>Induktive Spannungswandler</i>	104
	<i>Kapazitive Spannungswandler</i>	105
4.1.3	Hinweise für die Anwendung	105
	<i>Kurzschlussicherung</i>	105
	<i>Erdung</i>	106
	<i>Schaltungen und Auswahl der Wandler</i>	106
	<i>Auswahl der Wandler nach der Belastung der Sekundärseite</i>	106
	<i>Genauigkeitsklasse</i>	107
	<i>Auswahl nach der Genauigkeitsklasse</i>	108
	<i>Sekundärspannungen</i>	108
	<i>Leistungsschild</i>	108
4.2	Stromwandler	109
4.2.1	Aufbau	109
4.2.2	Wirkungsweise	110
4.2.3	Anwenderhinweise	110
	<i>Austausch von Messinstrumenten</i>	110
	<i>Erdung</i>	110
	<i>Schaltungen</i>	110
	<i>Auswahl aus der Sicht verschiedener Bauarten</i>	112
	<i>Niederspannungsstromwandler</i>	112
	<i>Hochspannungsstromwandler</i>	112
	<i>Auswahl nach Gesichtspunkten der Anwendung für Mess- bzw. Schutzzwecke</i> ..	112
	<i>Genauigkeitsklasse</i>	116
	<i>Primär- und Sekundärnennströme</i>	117

	<i>Auswahl unter dem Gesichtspunkt der Belastung</i>	117
	<i>Leistungsschild</i>	118
4.2.4	Summenstromwandler	119
	<i>Anwendungshinweise</i>	119
5	Elektrische Messung nichtelektrischer Größen	121
5.1	Einleitung	121
5.2	Elektrische Temperaturmessung	122
5.2.1	Widerstandstemperaturfühler	122
	<i>Metall-Widerstandstemperaturfühler</i>	122
	<i>Messumformer für Widerstands-Temperaturfühler</i>	124
	<i>NTC-Temperatur-Messwiderstände</i>	126
	<i>PTC-Temperatur-Messwiderstände</i>	126
	<i>Silizium-Temperatur Sensoren</i>	128
5.2.2	Temperaturfühler-IC	128
5.2.3	Thermoelektrische Temperaturfühler	129
	<i>Thermoelemente für Temperaturmessung</i>	130
	<i>Messschaltungen für Thermoelemente</i>	130
5.2.4	Infrarot-Temperaturmessung	132
	<i>IR-Thermometer und IR-Kameras</i>	133
	<i>Einsatzgebiete und Einsatzgrenzen</i>	135
5.3	Messung mechanischer Größen	135
5.3.1	Kraft-, Druck- und Drehmomentaufnehmer mit Dehnungsmessstreifen	136
	<i>Prinzip und Aufbau</i>	136
	<i>Anwendung von Dehnungsmessstreifen</i>	138
	<i>Messschaltungen für Dehnungsmessstreifen</i>	138
5.3.2	Piezoelektrische Kraft- und Schwingungsaufnehmer	139
5.3.3	Wegmessung	140
	<i>Analoge Wegmessung</i>	140
	<i>Digitale Wegmessung</i>	143
5.3.4	Druck- und Differenzdruck-Messwertaufnehmer	145
	<i>Druckmessaufnehmer mit Rohrfedermesswerk</i>	146
	<i>Druckmessaufnehmer mit Membrankörpermesswerk</i>	146
	<i>Druckaufnehmer mit Tauchglockenmesswerk</i>	147
	<i>Silizium-Drucksensoren</i>	148
5.3.5	Durchflussmessung und Strömungswächter	148
	<i>Durchflussmessung nach dem Wirkdruckverfahren</i>	149
	<i>Kalorimetrische Strömungsmessung und Überwachung</i>	149
	<i>Strömungsmessung mit Schwebekörper</i>	150
	<i>Strömungsmessung mit Paddel oder Windfahne</i>	151
	<i>Strömungsmessung mit Turbinenrad</i>	152
	<i>Durchflussmessung nach dem Induktionsprinzip</i>	153
5.3.6	Drehzahlaufnehmer und Messumformer	153
	<i>Analoge Drehzahlaufnehmer</i>	154
	<i>Digitale Drehzahlaufnehmer</i>	154
	<i>Drehzahlmessumformer</i>	156
	<i>Drehzahlwächter</i>	156
5.4	Füllstandsmessung	157
5.4.1	Niveaumesswertaufnehmer über Kraft, Druck oder Druckdifferenz	158
5.4.2	Niveaumesswertaufnehmer mit Verdrängungskörper	158
5.4.3	Niveaumesswertaufnehmer mit Tauchrohr	158
5.4.4	Nachlauf-Niveaumesswertgeber	159
5.4.5	Kapazitive Niveaumesswertgeber	159

5.4.6	Vibrations-Niveaugrenzwertgeber	160
5.4.7	Leitfähigkeits-Niveaugrenzwertgeber	160
5.4.8	Niveaugrenzwertgeber mit NTC- oder PTC-Widerständen	160
5.4.9	Berührungslose Niveaumesswert- und -grenzwertgeber	161
5.5	Näherungsinitiatoren	162
5.6	Gas- und Feuchte Sensoren	164
5.7	Digitalisierung von Messwerten	165
5.7.1	Digitale Datenübertragung	165
5.7.2	Digitalisierung	166
5.7.3	Abtasttheorie	169
6	Messung des Zeitverlaufs elektrischer Größen	171
6.1	Oszilloskop	171
6.2	Elektronenstrahlröhre	172
6.3	Bedienung eines Oszilloskops im Einkanalbetrieb	175
6.3.1	Inbetriebnahme und Grundeinstellung	175
6.3.2	Vertikalablenkteil	176
6.3.3	Tast- und Teilerkopf	177
6.3.4	Horizontalablenkteil und Zeitbasis	179
6.3.5	Triggerung	180
6.4	Signalanalysen im Einkanalbetrieb	182
6.4.1	Gleichspannungsmessung	182
6.4.2	Effektivwertbestimmung	184
6.4.3	Frequenzbestimmung	185
6.4.4	Bestimmung eines Stromflusswinkels	185
6.4.5	Messungen an impulsförmigen Signalen	187
6.5	Zweikanalbetrieb	190
6.5.1	Bedienung im Zweikanalbetrieb	190
6.5.2	Messung eines Phasenwinkels	191
6.6	Differenzmessung	192
6.7	X-Y-Darstellung	193
6.8	Spezielle Zusatzfunktionen im Oszilloskop	196
6.9	Netzanalyse und EMV	197
7	Regelungstechnik	203
7.1	Steuerung und Regelung	203
7.2	Regelungstechnische Begriffe	205
7.2.1	Beispiel für eine Steuerung	206
7.2.2	Beispiel für eine Regelung	207
7.3	Regelstrecke	208
7.3.1	Das Bügeleisen als Regelstrecke	208
7.3.2	Der beheizte Raum als Regelstrecke	210
7.3.3	Der Wasserbehälter als Regelstrecke	211
7.3.4	Verzögerungsarme Regelstrecke	212
7.4	Regelung mit «schaltenden Reglern»	213
7.4.1	Zweipunktregler	213
	<i>Regelkreis mit Bimetall-Zweipunktregler</i>	<i>214</i>
	<i>Regelkreis mit thermischer Rückführung</i>	<i>215</i>
7.4.2	Regelkreis mit elektronischem Zweipunktregler	217
	<i>Wirkungsweise</i>	<i>217</i>
	<i>Operationsverstärker mit elektrischer Rückführung</i>	<i>218</i>
7.4.3	Mehrpunktregler	218
7.5	Regelung mit stetigen Reglern	220
7.5.1	Proportionalregler (P-Regler)	220

	<i>Der P-Regler als Wasserstandsregler</i>	220
	<i>Regelbedingungen</i>	221
	<i>Regelgenauigkeit</i>	221
	<i>Reglerkennlinie</i>	222
	<i>Sprungantwort</i>	223
	<i>Blockbild, Blockschaltbild</i>	223
	<i>Der P-Regler als Spannungsregler mit OP</i>	224
7.5.2	<i>Integralregler (I-Regler)</i>	225
	<i>Sprungantwort</i>	225
	<i>Aufbau und Wirkungsweise als Wasserstandsregler</i>	226
	<i>Regelung mit Pendelvorgang</i>	227
	<i>Der I-Regler als Spannungsregler mit OP</i>	228
7.5.3	<i>PI-Regler</i>	228
	<i>Aufbau des PI-Reglers als Wasserstandsregler</i>	228
	<i>Sprungantwort</i>	229
	<i>Regelvorgang</i>	229
	<i>Der PI-Regler als Spannungsregler mit OP</i>	230
7.5.4	<i>Differentialregler (D-Regler)</i>	230
	<i>Aufbau und Wirkungsweise als Wasserstandsregler</i>	231
	<i>Sprungantwort</i>	231
	<i>Der D-Regler als Spannungsregler mit OP</i>	232
7.5.5	<i>PD-Regler</i>	232
	<i>Aufbau und Wirkungsweise als Wasserstandsregler</i>	232
	<i>Sprungantwort</i>	232
	<i>Der PD-Regler als Spannungsregler mit OP</i>	233
7.5.6	<i>PID-Regler</i>	234
	<i>Aufbau als Wasserstandsregler</i>	234
	<i>Sprungantwort</i>	234
	<i>Der PID-Regler als Spannungsregler mit OP</i>	234
7.5.7	<i>Übersicht über Regleranwendungen</i>	235
7.5.8	<i>Übersicht über Reglersprungantworten und Blockbilder</i>	236
7.6	<i>Stellglieder</i>	236
7.6.1	<i>Auswahl</i>	236
7.6.2	<i>Zuordnung von Stellgliedern und Reglern</i>	237
7.6.3	<i>Zweipunktregler und Motorstellantrieb</i>	239
7.6.4	<i>Dreipunkt-Schrittregler</i>	240
7.7	<i>Ergänzende Regelungsbeispiele</i>	240
7.7.1	<i>Spannungsregelung eines Gleichstromgenerators</i>	240
	<i>Aufgabe</i>	240
	<i>Blockschaltbild</i>	241
	<i>Regelbedingungen</i>	241
	<i>Wirkungsweise</i>	241
7.7.2	<i>Gasdruckregelung mit pneumatischem Regler</i>	243
	<i>Aufgabe</i>	243
	<i>Blockschaltbild</i>	243
	<i>Regelbedingungen</i>	243
7.7.3	<i>Spannungsregelung mit Stelltransformator</i>	244
	<i>Aufgabe</i>	244
	<i>Blockschaltbild</i>	245
	<i>Regelbedingungen</i>	245
	<i>Wirkungsweise</i>	246
7.7.4	<i>Flüssigkeitsdurchflussregelung</i>	246
	<i>Aufgabe</i>	246
	<i>Blockschaltbild</i>	246

	<i>Regelbedingungen</i>	246
	<i>Wirkungsweise</i>	247
7.7.5	Gleichspannungsregelung mit Transistoren	248
	<i>Aufgabe</i>	248
	<i>Blockschaltbild</i>	248
	<i>Regelbedingungen</i>	248
	<i>Wirkungsweise</i>	249
7.7.6	Regelungsbeispiele	249
7.8	Reglerblockdarstellung	251
7.8.1	Reglerrückführung	251
	<i>P-Reglerrückführung</i>	251
	<i>I-Reglerrückführung</i>	251
	<i>PI-Reglerrückführung</i>	251
	<i>PD-Reglerrückführung</i>	251
	<i>PID-Reglerrückführung</i>	251
7.8.2	Regelkennlinien der stetigen Regler mit Störgrößensprung	252
7.9	Reglereinstellung	253
7.9.1	Der bezogene Proportionalbereich x_p	254
7.9.2	Nachstellzeit T_n	254
7.9.3	Vorhaltzeit T_v	255
7.9.4	Der PID-Regler mit T_n und T_v	256
7.9.5	Reglereinstellung am Wasserstandsregelmodell	256
7.9.6	Praktische Reglereinstellung	257
7.10	Digitale Regelung	258
Stichwortverzeichnis		261

1 Allgemeine Bestimmungen und Grundbegriffe

Eine moderne Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR-Technik) ist eine der Grundvoraussetzungen für die Optimierung von Produktionsprozessen in Bezug auf die Nutzung der Energie- und Rohstoffressourcen. Da die Bearbeitung der Messdaten in der modernen Prozesstechnik meistens in elektronischen Systemen erfolgt, müssen die für die Steuerung erforderlichen Prozessgrößen als elektrische Signale vorliegen. Die elektrische Messtechnik von physikalischen und chemischen Größen benötigt eine Vielzahl von Sensoren (Aufnehmern) und Messumformern, die heute einen sehr hohen Entwicklungsstand erreicht haben.

Für eine exakte Beschreibung von Messsystemen ist zunächst eine klare Definition der verwendeten Begriffe erforderlich.

Die Begriffe der elektrischen Messtechnik sind in DIN VDE 0413 definiert.

1.1 Größen und Einheiten

Eine **Größe** ist die messbare physikalische Eigenschaft eines Körpers, einer Substanz, eines Vorgangs oder eines Zustands.

Größen im allgemeinen Sinn sind z.B.: Länge, Kraft, elektrischer Widerstand. **Spezielle Größen** sind z.B.: Länge eines bestimmten Körpers, Kraft auf einen bestimmten Druckpunkt, elektrischer Widerstand eines bestimmten Drahtes.

Bei der Beschreibung von physikalischen Zusammenhängen in Größengleichungen werden die Größen durch Formelzeichen dargestellt. Diese sind in ISO 31 festgelegt.

Beispiele Länge l , Kraft F , elektrischer Widerstand R . (Formelzeichen von veränderlichen Größen werden kursiv gedruckt.)

Die quantitative Beschreibung der Größen wird durch deren **Einheiten** ermöglicht. Die Einheiten sind in einem **Einheitensystem** zusammengefasst. Jede Einheit hat einen Namen und ein Einheitenzeichen.

Beispiele

m für Meter, N für Newton, Ω für Ohm

Die Darstellung des Wertes einer speziellen Größe erfolgt durch das Produkt aus Zahl und Einheit.

Beispiel

Widerstand eines Drahtes $R = 25 \Omega (= 25 \cdot 1 \Omega)$

Das internationale Einheitensystem, **SI**, ist das gesetzlich verbindliche System, in dem sieben **Basiseinheiten** so festgelegt sind, dass sie mit den entsprechenden Einrichtungen reproduzierbar sind. Das SI ist ein kohärentes (zusammenhängendes) Einheitensystem, in dem es für jede Größe nur eine Einheit gibt, auch wenn teilweise unterschiedliche Bezeichnungen bestehen. Es sind daher keine Umrechnungsfaktoren (außer 1) erforderlich.

Die **Basisgrößen** und **Basiseinheiten** des SI sind in Tabelle 1.1a aufgeführt.

Tabelle 1.1a Basisgrößen und Einheiten des SI

Größe	Einheit	
	Name	Zeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
elektrische Stromstärke	Ampere	A
thermodynamische Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Bei der Angabe von Temperaturen kann weiterhin das °C (Grad Celsius) verwendet werden.

Alle anderen Größen sind **abgeleitete Größen**, deren Einheiten sich aus den Einheitsgleichungen der physikalischen Zusammenhänge zwischen den Basisgrößen ableiten.

Beispiel

Die Einheit der Kraft ist über das dynamische Grundgesetz

$$F = m \cdot a = \frac{m \cdot v}{t} = \frac{m \cdot s}{t^2} \text{ in } \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = \text{N (Newton)}$$

abgeleitet.

Tabelle 1.1b Abgeleitete Größen

Größe	Einheit		
	Name	Zeichen	Ableitung
Kraft	Newton	N	$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$
Druck	Pascal	P	$1 \text{ P} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}}$
elektr. Widerstand	Ohm	Ω	$1 \Omega = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3 \cdot \text{A}}$

Alle abgeleiteten Einheiten können durch die Basiseinheiten beschrieben werden. Da die Ableitungen teilweise recht umfangreich sind, haben die Einheiten der meisten abgeleiteten Größen eigene Namen, die durch ein einzelnes Einheitenzeichen darstellbar sind (Tabelle 1.1b).

Einheiten können durch Vorsätze dezimal vervielfacht oder geteilt werden (Tabelle 1.2).

Tabelle 1.2 Maßvorsätze für die Verkleinerung und Vergrößerung von Einheiten

Faktor	Bezeichnung	Vorsatz
10^{15}	Peta	P
10^{12}	Tera	T
10^9	Giga	G
10^6	Mega	M
10^3	Kilo	k
10^2	Hekto	h
10^1	Deka	da
10^{-1}	Dezi	d
10^{-2}	Zenti	c
10^{-3}	Milli	m
10^{-6}	Mikro	μ
10^{-9}	Nano	n
10^{-12}	Piko	p
10^{-15}	Femto	f
10^{-18}	Atto	a

1.2 Messen und Messabweichungen

Messung ist die Gesamtheit der Tätigkeiten zur Ermittlung einer Messgröße als Vielfaches einer Maßeinheit.

Ziel des Messens ist das Ermitteln richtiger Werte der Messgröße.

Die erforderliche Messeinrichtung besteht aus dem Sensor oder Aufnehmer, dem Messumformer und der Anzeige. Die Kombination wird auch als Messkette bezeichnet (s. Bild 1.1).

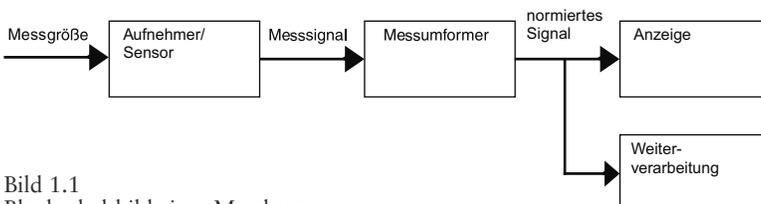


Bild 1.1
Blockschaltbild einer Messkette

Der Sensor oder Messwertaufnehmer ist die Einrichtung, die unter Ausnutzung bestimmter physikalischer Effekte (Messprinzip) aus der Messgröße (z.B. Kraft, Temperatur) ein entsprechendes (elektrisches) Messsignal erzeugt

Beispiele für Messprinzipien

- Widerstandsänderung in einem Druckaufnehmer mit Dehnungsmessstreifen
- Thermoelektrische Spannung in einem Temperaturfühler mit Thermoelement
- Fotoelektrische Spannung in einem Lichtsensor mit Fotodiode

In vielen Fällen muss das Messsignal anschließend noch verstärkt, linearisiert oder auf sonstige Art angepasst werden. Dazu dienen der Messumformer, an dessen Ausgang das normierte Messsignal für die Anzeige oder Weiterverarbeitung zur Verfügung steht. Die Gesamtheit der Tätigkeiten bis zur Gewinnung des Ergebnisses wird als Messverfahren bezeichnet.

Alle Glieder der Messkette weisen eine bestimmte Eigenabweichung auf und unterliegen äußeren Einflussgrößen, die ihre Signalübertragung beeinflussen. Die Einflussgrößen sind nicht Gegenstand der Messung, sondern beeinflussen das Messergebnis in unerwünschter Weise.

Beispiele für Einflussgrößen

- Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Dehnungsmessstreifen
- In den Messleitungen induzierte Spannung bei Thermoelementen oder Fotodioden
- Kurvenform und Frequenz einer Wechsellspannung, deren Effektivwert mit einem Gleichrichterinstrument gemessen wird

Außerdem beeinflussen einige Aufnehmer die Messgröße selbst, z.B. belastet ein Voltmeter die zu messende Spannung. Insofern ist es nicht möglich, den tatsächlichen oder «wahren» Wert einer Messgröße zu ermitteln. Man begnügt sich statt dessen mit dem «richtigen» Wert. Der **richtige Wert** ist der durch Vereinbarung anerkannte Wert einer Messgröße, der mit einer dem jeweiligen Zweck angepassten Unsicherheit behaftet ist.

Alle Angaben der Messabweichung, umgangssprachlich «Genauigkeit», beziehen sich also auf den richtigen Wert. Der umgangssprachliche Begriff der Messgenauigkeit sollte mangels genauer Definition vermieden werden. Die Messabweichung ist ein definiertes Maß dafür, wie weit der Messwert vom richtigen Wert abweicht:

Messabweichung = Messwert – richtiger Wert

Die Qualität einer Messung beurteilt man anhand der relativen oder prozentualen Messabweichung:

$$\text{Relative Messabweichung} = \frac{\text{Messabweichung}}{\text{richtiger Wert}} = \frac{\text{Messwert} - \text{richtiger Wert}}{\text{richtiger Wert}}$$

$$\text{Prozentuale Messabweichung} = \frac{\text{Messabweichung}}{\text{richtiger Wert}} \cdot 100\% = \frac{\text{Messwert} - \text{richtiger Wert}}{\text{richtiger Wert}} \cdot 100\%$$

Die Messabweichung kann noch unterteilt werden in die zufällige und die systematische Messabweichung: Die zufällige Messabweichung ist die Differenz aus einem einzelnen Messwert und dem Mittelwert, der sich aus vielen Einzelmessungen ergeben würde.

Die **zufällige Messabweichung** entsteht z.B. durch den Ablesefehler (persönlicher Fehler) beim Abschätzen von Zwischenwerten (Interpolieren) auf der Skala eines analoganzeigenden Instruments. Der Fehler lässt sich durch Mittelwertbildung aus einer Reihe von Messwerten minimieren.

Die **systematische Messabweichung** ist die Differenz aus dem Mittelwert, der sich aus vielen Einzelmessungen ergeben würde, und dem richtigen Wert.

Die systematische Messabweichung entsteht z.B. durch die Eigenabweichung des Messgerätes (Abschnitt 1.5) oder durch Beeinflussung der Messgröße durch die Messanordnung, wenn z.B. bei der Messung einer elektrischen Spannung an einer Signalquelle ein Absinken durch den Messstrom entsteht.

Kalibrieren (DIN 1319-1) ist die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen dem Messwert und dem Erwartungswert der Messgröße durch den Vergleich einer Messeinrichtung mit einem Normal. Aus der Wiederholung der Feststellung des Istzustands durch Kalibrierung können z.B. Aussagen über die Langzeitstabilität der Messeinrichtung getroffen werden.

Ein **Normal** ist eine Messeinrichtung oder Maßverkörperung, mit der die Einheit oder ein genau bekannter Wert einer Messgröße reproduziert wird.

Beim **Eichen** wird durch eine Behörde der Vergleich mit einem Normal und eine Justierung der Messeinrichtung vorgenommen. Die Messeinrichtung muss für eine amtliche Eichung zugelassen sein.

Beispiele

- 100-Ω-Widerstandsnormal oder Widerstandsdekade
- Normal-Spannungsquelle, die eine hochgenaue und bekannte elektrische Spannung liefert
- Normal-Strommessgerät mit hoher Genauigkeit
- Cäsium-Frequenznormal
- 1-kg-Massenormal

1.3 Unterteilung von Messgeräten

Messgeräte müssen nach der Art der Ausgabe des Messwertes unterteilt werden in:

- anzeigende Messgeräte

Beispiele: Spannungsmesser mit Skalenanzeige, Oszilloskop, Zeitmesser mit Ziffernanzeige;

- registrierende Messgeräte
Beispiele: Punktschreiber für Temperaturen, Schnellschreiber für Schwingungen;
- integrierende Messgeräte
Beispiele: Elektrizitätszähler, Volumenmessung mit Flügelradzähler;
- summierende Messgeräte
Beispiel: summierende Waage, bei der die Einzelmesswerte addiert werden.

Die Ausgabe eines Messwertes kann in analoger oder in digitaler Form erfolgen. Bei **Messgeräten mit analoger Ausgabe** besteht zwischen der Messgröße und dem Anzeige- oder dem Ausgabewert eine stetige Funktion.

Beispiele

- Bei Analoganzeigen erfolgt die Umwandlung der Ausgabe in einen Zahlenwert mit Hilfe der Skalenteilung durch die ablesende Person.
- Bei Messumformern mit analoger Ausgabe ist die Messgröße durch die Höhe einer Spannung (z.B. 0 bis 10 V) oder eines Stroms (z.B. 0 bis 20 mA) oder einer Frequenz verkörpert.

Bei **Messgeräten mit digitaler Ausgabe** besteht zwischen der Messgröße und dem Anzeige- oder Ausgabewert eine nicht stetige Funktion.

Beispiele

- Bei Digitalanzeigen wird der Zahlenwert durch Ziffern direkt angegeben.
- Bei Messumformern mit digitaler Ausgabe besteht das Messsignal aus mehreren Bits.
- Bei Balkenanzeigen wird der Messwert durch die Länge eines Balkens praktisch analog dargestellt. Da der Balken jedoch aus einzelnen Segmenten besteht, erfolgt die Anzeige in diskreten Stufen und ist daher prinzipiell digital. Man spricht von einer **quasianalogen Anzeige**. Die Balkenanzeige dient häufig als Ergänzung zur Ziffernanzeige zum besseren Erkennen von Tendenzen und bei größerer Ablesedistanz.

1.4 Empfindlichkeit und Auflösung von Messgeräten

Eine Änderung der Messgröße verursacht bei einem Messgerät eine entsprechende Änderung der Ausgangsgröße, die durch die Empfindlichkeit definiert ist.

Empfindlichkeit ist das Verhältnis der Änderung der Ausgangsgröße zur Änderung der Mess- oder Eingangsgröße.

Beispiele

Ein Drehspulmesswerk hat eine linear unterteilte Skala mit einer Länge von 8 cm und einen Messbereichsstrom von 50 μA . Die Empfindlichkeit beträgt:

$$\text{Empfindlichkeit} = \frac{\text{Messbereichsstrom}}{\text{Skalenlänge}} = \frac{50 \mu\text{A}}{10 \text{ cm}} = 6,25 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}}$$

Bei Messgeräten mit nichtlinearer Kennlinie ist die Empfindlichkeit noch vom Messwert abhängig.

Die Empfindlichkeit darf nicht mit der Messgenauigkeit verwechselt werden. Direktanzeigende mechanische Messwerke mit höherer Empfindlichkeit haben oft eine geringere Genauigkeit. Da sie nur über sehr geringe Stellkräfte verfügen, treten Reibungskräfte stärker in den Vordergrund.

Neben der Empfindlichkeit kann in bestimmten Fällen die Ansprechschwelle eines Messgerätes von Bedeutung sein. Die **Ansprechschwelle** ist die größte Änderung der Eingangsgröße, die noch keine wahrnehmbare Änderung der Ausgangsgröße bewirkt, wenn sich die Eingangsgröße langsam in einer Richtung ändert. Die Ansprechschwelle ist bei einem direktanzeigenden Analogmessgerät z.B. von der Lagerreibung abhängig.

Bei digital anzeigenden Messgeräten oder Messumformern mit digitaler Ausgabe spricht man von der Auflösung, die durch die Digitalisierung (Quantisierung) bedingt ist. Die Auflösung einer digitalen Anzeigeeinheit ist durch die Stellenzahl vorgegeben und wird in **Digit** angegeben (Abschnitt 1.5).

Die **Auflösung** ist die kleinste unterscheidbare Differenz einer Anzeigeeinrichtung.

Bei direkt anzeigenden Messgeräten ist oft eine Gerätekonstante angegeben. Bei Mehrbereichs-Messgeräten handelt es sich lediglich um einen Zahlenfaktor.

Die **Gerätekonstante** ist der Koeffizient, mit dem der Anzeigewert multipliziert werden muss, um die Messgröße zu erhalten.

1.5 Eigenabweichung und Genauigkeitsklasse

Die Genauigkeit von Messgeräten wird durch die Eigenabweichung (früher Grund-, Anzeige- oder Gerätefehler) angegeben.

Die Eigenabweichung ist die unter Referenzbedingungen festgestellte Messabweichung eines Messgerätes.

Durch die **Referenzbedingungen** (früher Nennbedingungen) sind die Grenzen der Einflussgrößen festgelegt, durch die der Messwert beeinflusst wird.

Beispiel für die Referenzbedingungen bei einem Spannungs-Messinstrument für Wechselspannung

- Referenzlagebereich: senkrecht $\pm 1^\circ$,
- Referenztemperaturbereich: $20^\circ\text{C} \pm 10\text{K}$,
- Referenzfrequenzbereich: $50\text{Hz} \pm 10\text{Hz}$,
- Referenzfremdfeldbereich: $0 \dots 400\text{A/m}$.

Für jede Einflussgröße gilt ein **Betriebsbereich** (früher Nenngebrauchsbereich). Durch den Betriebsbereich sind die Grenzen jeder einzelnen Einflussgröße festgelegt, in denen die Eigenabweichung in den festgelegten Grenzen bleiben muss, wenn alle anderen Einflussgrößen ihre Referenzbedingungen erfüllen.

In den Regeln für elektrische Messgeräte (DIN EN 60 051-1) ist die Kennzeichnung für den Referenzwert bzw. Referenzbereich und den Betriebsbereich der Einflussgrößen festgelegt. Die Grenzwerte für den Referenzbereich sind unterstrichen.

Beispiele

-25...+20...+30...+55 °C: Referenzbereich +20...+30 °C und Betriebsbereich -25 °C...+55 °C

15...45...65 Hz: Referenzbereich 45...65 Hz und Betriebsbereich 15...65 Hz

Die Eigenabweichung muss z.B. im Betriebstemperaturbereich von -25...+55 °C in den durch die Genauigkeitsklasse gegebenen Grenzen bleiben, wenn gleichzeitig alle anderen Einflussgrößen im Referenzbereich liegen.

Messgeräte werden nach ihren maximalen Eigenabweichungen in **Genauigkeitsklassen** unterteilt. Die Genauigkeitsklasse ist durch ein Klassenzeichen symbolisiert.

Die Genauigkeitsklasse gibt den oberen Grenzwert der Eigenabweichung eines Messgerätes unter Referenzbedingungen an.

Elektrische Messgeräte sind nach DIN VDE 0410 nach Genauigkeitsklassen in **Feinmessgeräte** und **Betriebsmessgeräte** mit festgelegten Klassen unterteilt (Tabelle 1.3).

Tabelle 1.3 Genauigkeitsklassen von elektrischen Messgeräten

	Klassenzeichen	Max. Eigenabweichung
Feinmessgeräte	0,1	±0,1%
	0,2	±0,2%
	0,5	±0,5%
Betriebsmessgeräte	1	±1,0%
	1,5	±1,5%
	2,5	±2,5%
	5	±5,0%

Bei analog anzeigenden Messgeräten, bei denen das Klassenzeichen ohne Zusatz angegeben ist, gibt die Genauigkeitsklasse die auf den Messbereichsendwert bezogene maximale Eigenabweichung in Prozent an.

Abweichungen davon sind:

- ❑ Steht das Klassenzeichen mit einem Kreis, bezieht sich die Eigenabweichung auf den richtigen Wert.
- ❑ Steht das Klassenzeichen in einem oben offenen Winkel, bezieht sich die Eigenabweichung auf die Skalenlänge.

Spannungs- oder Strommesser mit Dreheisenmesswerk (Abschnitt 2.1.1) für die Starkstromtechnik verfügen oft über einen nichtlinearen Skalenverlauf mit unterdrücktem Nullpunkt und/oder Überlastbereich (Bild 1.2). Die Eigenabweichung gilt hierbei nur in den Messbereichsgrenzen, die durch Punkte an den Teilungsstrichen markiert sind.

Da die Eigenabweichung bei den meisten Analoganzeigern auf den Messbereichsendwert bezogen ist, sollte der Messbereich bei Instrumenten mit linearer Skalenteilung möglichst so gewählt werden, dass die Messgröße im letzten Teil des Messbereichs liegt.

Die durch die Eigenabweichung verursachte maximale relative Messabweichung ist im letzten Teil des Messbereichs am geringsten.

Beispiel

Ein analoganzeigender Spannungsmesser mit der Genauigkeitsklasse 1,5 hat einen Messbereichsendwert von 250 V. Die zulässige relative Messabweichung soll in Prozent bei verschiedenen richtigen Werten berechnet werden (Tabelle 1.4):

$$\text{Max. Messabweichung} = \pm 1,5\% \text{ von } 250 \text{ V} = \frac{\pm 1,5\% \cdot 250 \text{ V}}{100\%} = \pm 3,75 \text{ V}$$

$$\text{Prozent. Messabweichung} = \frac{\text{Messabweichung}}{\text{richtiger Wert}} \cdot 100\% = \frac{\pm 3,75 \text{ V}}{\text{richt. Wert}} \cdot 100\%$$

Tabelle 1.4 Berechnungen zulässiger relativer Messabweichungen in Prozent

Richtiger Wert	Messergebnis	Prozentuale Messabweichung
50 V	50 V ± 3,75 V = 46,25 V53,75 V	±7,5%
100 V	100 V ± 3,75 V = 96,25 V ...103,75 V	±3,75%
150 V	150 V ± 3,75 V = 146,25 V ...153,75 V	±2,5%
200 V	200 V ± 3,75 V = 196,25 V ...203,75 V	±1,875%
250 V	250 V ± 3,75 V = 246,25 V ...253,75 V	±1,5%

Skalencharakteristik für Überlast zweifach:

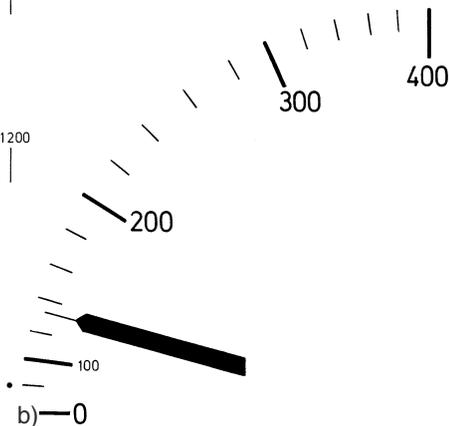


für Überlast vierfach



Bild 1.2

- Skalen von Dreheisen-Messinstrumenten
- a) Strommesser mit zweifachem und mit vierfachem Überlastbereich
- b) Spannungsmesser mit unterdrücktem Nullpunkt



Bei digital anzeigenden Messgeräten wird die Eigenabweichung in der Regel nicht auf den Messbereichsendwert, sondern auf den Messwert bezogen. Die Messabweichung ergibt sich bei einem digital anzeigenden Messgerät aus der Eigenabweichung (früher Grundfehler) und der Auflösung. Die Auflösung hängt von der Kapazität der Anzeigeeinheit ab.

Beispiel

Ein Spannungsmesser, dessen Anzeigeeinheit ± 2000 Digit umfasst, hat einen Messbereich von 200 V. Die Eigenabweichung beträgt $\pm 0,5\%$ vom Messwert ± 1 Digit = $\pm (0,5\% + 1 \text{ Digit})$. Der Messwert beträgt 50 V. In welchen Grenzen liegt der richtige Wert?

Lösung

Bei einer ± 2000 -Digit-Anzeigeeinheit (auch als $3\frac{1}{2}$ -stellige Anzeigeeinheit bezeichnet) hat das Gerät einen Anzeigebereich von $-199,9\dots+199,9$ V. Die kleinste Differenz der Anzeige beträgt: 1 Digit = 0,1 V. Die zulässige Eigenabweichung beträgt somit

$$\pm \left(\frac{0,5 \text{ V} \cdot 50 \text{ V}}{100\%} + 0,1 \text{ V} \right) = \pm (0,25 \text{ V} + 0,1 \text{ V}) = \pm 0,35 \text{ V}$$

Der richtige Wert liegt in den Grenzen:

$$50 \text{ V} \pm 0,35 \text{ V} = 49,65 \text{ V} \dots 50,35 \text{ V}$$

Die prozentuale Messabweichung beträgt:

$$\frac{\pm 0,35 \text{ V}}{50 \text{ V}} \cdot 100\% = \pm 0,7\%$$

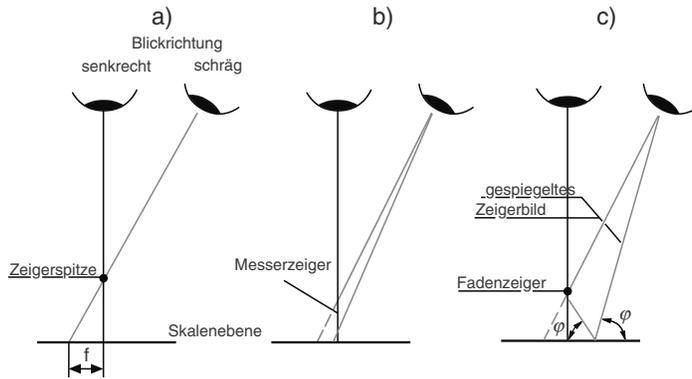
1.6 Einstellzeit

Das bewegliche Organ in einem Analoginstrument stellt ein Feder-Masse-System dar und ist somit ein schwingungsfähiges Gebilde. Bei einer Messgrößenänderung schwingt die Ablesemarke mit einer gedämpften Schwingung um die neue Ruhelage. Die Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt einer sprungförmigen Änderung der Messgröße und dem Zeitpunkt, zu dem die Ausgangsgröße innerhalb vorgegebener Grenzen um den Beharrungswert liegt, wird **Einstellzeit** genannt.

Nach den Regeln für elektrische Messgeräte (DIN EN 60 051-1) darf die Ablesemarke innerhalb von 4 s nach Auftreten einer Messgröße keine größere Abweichung als 4% der Skalenlänge aufweisen.

Die Einstellzeit einiger Messwerke wird durch Dämpfungsorgane reduziert, die die Bewegungsenergie des Systems schneller absorbieren. In Messgeräten mit Permanentmagnet, z.B. das Drehspulmesswerk (Abschnitt 2.1.2), werden die Eigenschwingungen durch Wirbelströme bedämpft, die bei Bewegung in der Messspule bzw. im Spulenträger induziert werden. Elektrische Messwerke ohne Permanentmagnet, z.B. das Dreheisenmesswerk (Abschnitt 2.1.1), besitzen heute eine Öldämpfung, die die früher verwendete Luftkammerdämpfung ersetzt.

Bild 1.3
Entstehung und
Vermeidung des
Parallaxenfehlers
a) Entstehung
b) Kontrolle durch
Messerzeiger
c) Kontrolle durch
Unterlegung mit
Spiegelbogen



1.7 Skalen und Gehäuse von Analogzeigern

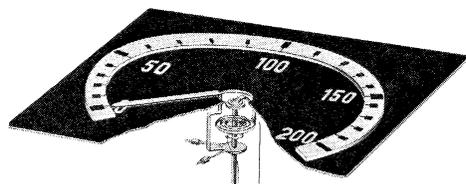
Das klassische Messinstrument besitzt eine analoge Anzeigeeinrichtung. Das Messwerk erzeugt ein Drehmoment, das im bestimmten Zusammenhang zur Messgröße steht. Das Drehmoment erzeugt mittels einer Gegenkraft einen Drehwinkel, der durch die Ablesemarke in eine Strecke auf der Skala umgewandelt wird. Die Unterteilung des Anzeigebereichs der Skala durch Teilstriche ermöglicht die Ablesung eines Zahlenwertes. Das Abschätzen von Zwischenwerten wird interpolieren genannt. Extrapolieren ist das Abschätzen außerhalb der Skalenteilung.

Die Ablesemarke wird meist durch die Spitze des Zeigers gebildet. In speziellen Lichtmarkeninstrumenten dient ein Leuchtpunkt als Ablesemarke. Da der normale Zeiger sich nicht in der gleichen Ebene wie die Skala befindet, entsteht beim Ablesen der sogenannte **Parallaxenfehler**, wenn das Auge nicht senkrecht zur Skalenebene ausgerichtet ist (Bild 1.3a). Eine Korrektur der Blickrichtung erlaubt der Messerzeiger, da er bei schräger Blickrichtung breiter erscheint (Bild 1.3b). Bei Feinmessgeräten ist die Skala meist mit einem Spiegelbogen unterlegt. Bei schräger Blickrichtung erscheint der Zeiger als virtuelles Bild neben dem wirklichen Zeiger (Bild 1.3c).

Bei Instrumenten mit Kreisskala wird der Parallaxenfehler teilweise dadurch vermindert, dass die Skalenteilung erhaben auf das Skalenblatt gesetzt ist und der Zeiger in der gleichen Ebene seitlich auf die Skala weist (Bild 1.4).

Eine parallaxenfreie Ablesung ermöglicht die Lichtmarkenablesung (Lichtmarkengalvanometer). Die Zeigerlänge wird durch mehrmalige interne Umlenkung mittels Spiegel verlängert, um bei kleinem Drehwinkel des beweglichen Organs, das mit einem kleinen Metallspiegel versehen ist, eine große Auslenkung der Ablesemarke zu erhalten (Bild 1.5). Die Empfindlichkeit wird durch eine vergrößerte Skalenslänge gesteigert, da der Messbereich auf mehrere übereinanderliegende Skalenteile aufgeteilt ist.

Bild 1.4
Kreisskala mit aufgesetzter Teilung



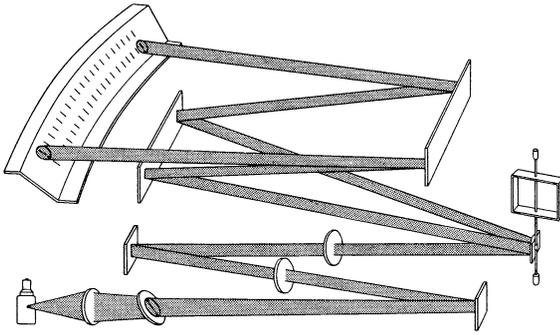


Bild 1.5
Strahlengang in einem
Lichtmarkengalvano-
meter mit geteilter Skala

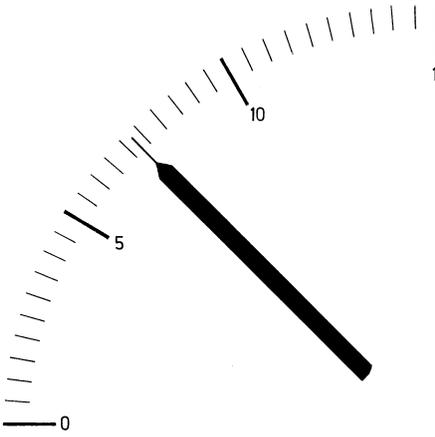


Bild 1.6 Quadrantskala

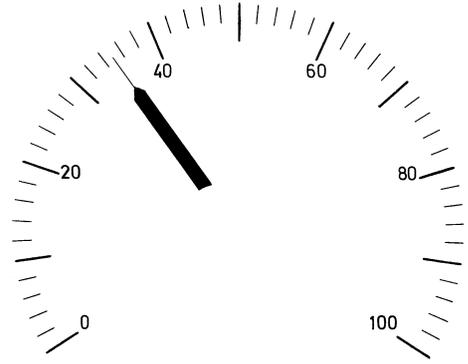


Bild 1.7 Kreisskala

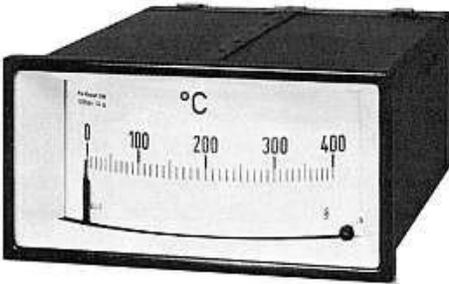


Bild 1.8 Profillinstrument mit
Querskala

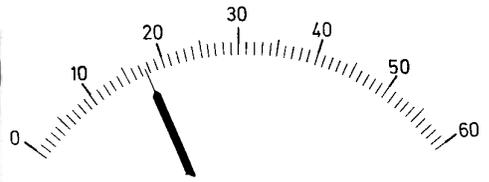
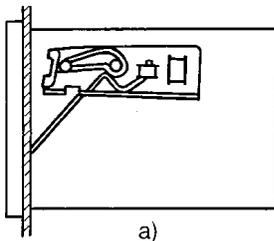
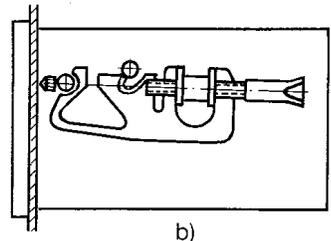


Bild 1.9 Sektorskala

Bild 1.10
Befestigung von
Anzeigern
a) Federklammer
b) Schraubklammer



a)



b)

Tabelle 1.5 Sinnbilder und Schaltzeichen für Messgeräte
a) Sinnbilder für Skalen der Anzeiger

Sinnbild	Art des Messwerkes	Sinnbild	Art des Messwerkes
	Drehspul-Messwerk mit Dauermagnet		Messwerk mit magnet. Schirm (Sinnbild für den Schirm)
	Drehspul-Quotientenmesswerk		Messwerk mit elektrostatischem Schirm (Sinnbild für den Schirm)
	Drehmagnet-Messwerk	ast	Astatisches Messwerk
	Dreheisen-Messwerk		Gleichstrominstrument
	Elektrodynamisches Messwerk	~	Wechselstrominstrument
	Eingeschlossenes, elektrodynamisches Messwerk	~ ~	Gleich- und Wechselstrominstrument
	Elektrodynamisches Quotientenmesswerk	~ ~ ~	Drehstrominstrument mit einem Messwerk
	Eingeschlossenes, elektrodynamisches Messwerk	~ ~ ~ ~	Drehstrominstrument mit zwei Messwerken
	Induktions-Messwerk	~ ~ ~ ~ ~	Drehstrominstrument mit drei Messwerken
	Bimetall-Messwerk	⊥	Senkrechte Gebrauchslage
	Elektrostatisches Messwerk	└┘	Waagerechte Gebrauchslage
	Vibrations-Messwerk	60°	Schräge Gebrauchslage mit Angabe des Neigungswinkels
	Thermoumformer allgemein		Zeigernullstellvorrichtung
	Drehspul-Messwerk mit Thermoumformer	☆	Prüfspannungszeichen: Die Ziffer im Stern bedeutet die Prüfspannung in kV (Stern ohne Ziffer 500 V Prüfspannung)
	Isolierter Thermoumformer	⚠	Achtung (Gebrauchsanweisung beachten)
	Gleichrichter	⚡	Instrument entspricht bezüglich Prüfspannung nicht den Regeln
	Drehspul-Messwerk mit Gleichrichter		Elektronische Anordnung im Hilfsstromkreis
	Elektronische Anordnung im Messkreis		

Symbole für die Genauigkeitsklasse:

1,5 Anzeigefehler bezogen auf Messbereichs-Endwert

~~1,5~~ Anzeigefehler bezogen auf Skalenlänge

Ⓛ1,5 Anzeigefehler bezogen auf den richtigen Wert

Tabelle 1.5b Schaltzeichen

Schaltzeichen	Benennung	Schaltzeichen	Benennung
		Beispiele	
	Messinstrument, allgemein; insbesondere anzeigend		Messinstrument ohne Kennzeichnung der Messgröße
	Messgerät, allgemein; insbesondere registrierend		Messinstrument mit beidseitigem Ausschlag
	Messwerk, allgemein		Strommesser, allgemein
	Messwerk mit 1 Spannungspfad		Strommesser mit Darstellung der Innenschaltung
	Messwerk mit 1 Strompfad		Spannungsmesser, allgemein
	Messwerk mit Anzapfung		Spannungsmesser mit Darstellung der Innenschaltung
	Messwerk mit Summen- oder Differenzbildung		Spannungsmesser mit Angabe der Einheit Millivolt
	Messwerk zur Produktbildung		Spannungsmesser für Gleich- und Wechselspannung
	Messwerk zur Quotientenbildung		Mehrfach-Instrument mit Angabe der Einheiten
Kennzeichen			Nullindikator für Wechselstrom
	Anzeige, allgemein		Synchronoskop
	Anzeige mit beiderseitigem Ausschlag		Strommesser mit großer Trägheit u. Schleppzeiger für Größtwert
	Trägheit klein		Widerstandsmessbrücke
	Trägheit groß		Kreuzzeigerinstrument
	Größtwertanzeige		Messgerät zur Kurvenbildanzeige der Spannung, Oszilloskop
	Kleinstwertanzeige		Einphasen-Wechselstromzähler
	Drehfeldrichtung		
	Richtung der Messwertübertragung		
	Kontaktgabe		

Analog anzeigende elektrische Messgeräte werden mit einer Vielzahl von Skalenformen hergestellt. Die Skalenformen von Anzeigern für den Schalttafeleinbau sind in DIN 43 802 genormt:

- Quadrantskala mit quadratischer Frontfläche (Bild 1.6) mit einem Skalenwinkel von 90° (1 Quadrant),
- Kreisskala, ebenfalls mit quadratischer Frontfläche (Bild 1.7); besitzt eine höhere Empfindlichkeit durch die vergrößerte Skalenlänge (Weitwinkelskala),
- Profilskala mit rechteckiger Frontfläche (Bild 1.8) als Quer- oder Hochskala, ebenso die
- Schmalprofilskala mit noch besserer Ausnutzung der Frontfläche,
- Sektorskala mit rechteckiger Frontfläche (Bild 1.9).

Eine verbesserte Ausnutzung der Frontfläche bieten **Mehrfachinstrumente**, bei denen mehrere Messwerke in einem Gehäuse untergebracht sind.

Die Analoganzeiger werden von den Herstellern in der Regel für senkrechte Referenzlage (Gebrauchslage) justiert. Bei der Bestellung von Instrumenten mit schräger Referenzlage muss der Winkel zur senkrechten Lage angegeben werden. Die Referenzlage ist durch das Sinnbild auf der Skala gekennzeichnet (Tabelle 1.5).

Formen und Abmessungen von Anzeigern sind in DIN 43 700 festgelegt (Tabelle 1.6).

Die **Befestigung** von Anzeigern in Schalttafeln erfolgt bei Instrumenten mit geringerer Einbautiefe durch Rasterbefestigung oder durch Federklammern mit Blattfedern (Bild 1.10a). Bei größerer Einbautiefe werden Schraubspindeln (Kunststoffgehäuse) oder Schraubklammern (Blechmantelgehäuse) verwendet (Bild 1.10b).

Tabelle 1.6 Formate von Anzeigern

	Frontmaß	Schalttafelaustrich
Quadratische Anzeiger mit Quadrantskala	48 × 48 mm	45 × 45 mm
	72 × 72 mm	68 × 68 mm
	96 × 96 mm	92 × 92 mm
	144 × 144 mm	138 × 138 mm
Rechteckige Anzeiger mit Profilskala und mit Schmalprofilskala	48 × 24 mm	45 × 22,2 mm
	72 × 36 mm	68 × 33 mm
	96 × 48 mm	92 × 45 mm
	144 × 72 mm	138 × 68 mm
	192 × 96 mm	186 × 92 mm
	72 × 24 mm	68 × 22,2 mm
	96 × 24 mm	92 × 22,2 mm
Kreisskalenanzeiger	48 × 48 mm	45 × 45 mm
	72 × 72 mm	68 × 68 mm
	96 × 96 mm	92 × 92 mm
	144 × 144 mm	138 × 138 mm

1.8 Kenngrößen von Spannungen und Strömen

Elektrische Spannungen und Ströme müssen im Wesentlichen nach ihrem zeitlichen Verlauf $u = f(t)$ bzw. $i = f(t)$ unterteilt werden. Die Augenblicks- oder Momentanwerte werden durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet. Spannungen und Ströme mit periodisch variierenden Augenblickswerten können nach unterschiedlichen Werten beurteilt werden. Weitere Kriterien sind die Kurvenform und die Zeitintervalle sowie die Frequenz.

Gleichspannungen und Gleichströme verfügen in dem betrachteten Zeitraum über einen konstanten Augenblickswert $U = u$ bzw. $I = i$, der auch als Gleichspannungswert bzw. Gleichstromwert bezeichnet wird. Bei einer Gleichspannung oder einem Gleichstrom sind Augenblickswert, arithmetischer Mittelwert und Effektivwert gleich.

Periodische **Wechselspannungen und Wechselströme** ändern ihre Richtung und (abgesehen von einer symmetrischen Rechteckspannung) ihren Betrag. Der arithmetische oder lineare Mittelwert ist, über mindestens eine volle Periode betrachtet, gleich Null. Die Flächen unter dem positiven und dem negativen Teil der Kurve sind daher gleich. Bei einer symmetrischen Kurve, wie z.B. der Sinuskurve (Bild 1.11a), spricht man von gleicher positiver und negativer Halbwelle.

Der arithmetische oder lineare Mittelwert von Wechselspannungen und Wechselströmen ist $U_{AV} = 0$ und $I_{AV} = 0$.

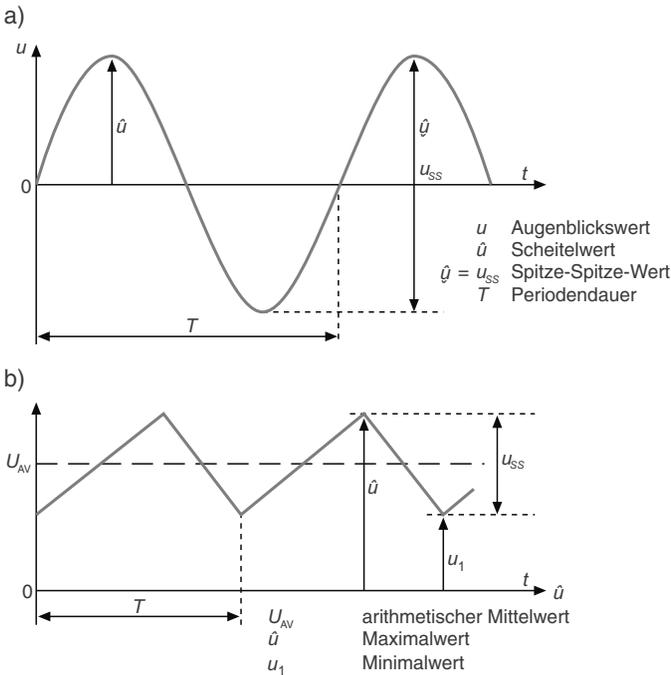


Bild 1.11
Zeitlicher Verlauf $u = f(t)$ unterschiedlicher Spannungsformen
a) periodische Wechselspannung (sinusförmig)
b) Mischspannung mit dreieckförmigem Wechselspannungsanteil

Eine symmetrische Spannungskurve, z.B. eine Sinuskurve, ist durch ihren Scheitelwert oder Maximalwert \hat{u} gekennzeichnet. Der positive und der negative Scheitelwert sind gleich $|\hat{u}_+| = |\hat{u}_-|$. Der Scheitelwert einer sinusförmigen Größe wird auch als **Amplitude** bezeichnet. In bestimmten Fällen, z.B. in der Oszilloskopmesstechnik, wird der **Spitze-Spitze-Wert** u_{SS} zugrunde gelegt. Bei einer symmetrischen Kurve ist $u_{SS} = 2 \cdot \hat{u}$.

Es sei angemerkt, dass der Spitze-Spitze-Wert kein Augenblickswert ist, da er sich aus der Differenz zweier zeitlich versetzter Scheitelwerte ergibt: $u_{SS} = \hat{u}_+ - \hat{u}_-$.

Periodische **Mischspannungen und Mischströme** haben einen zeitlich zwischen den Extremwerten u_1 und u_2 variierenden Wert. Die beiden Extremwerte können das gleiche Vorzeichen haben (Bild 1.11b). Eine Mischspannung kann in einen Gleichspannungsanteil U_{AV} und einen Wechselspannungsanteil mit dem Spitze-Spitze-Wert $u_{SS} = u_1 - u_2$ zerlegt werden.

Eine Mischspannung ist die Überlagerung aus einer Wechselspannung (u_{SS}) und einer Gleichspannung (U_{AV}).

1.8.1 Arithmetischer oder linearer Mittelwert

Bei einer periodisch schwankenden Größe entspricht der arithmetische oder lineare Mittelwert dem Wert einer konstanten Größe mit der gleichen Fläche unter der Kurve, die den zeitlichen Verlauf der Größe beschreibt. Auf eine elektrische Spannung angewandt, bedeutet dieses:

Der arithmetische Mittelwert einer Mischspannung ist der Gleichspannungsanteil, d.h. der Wert einer Gleichspannung mit der gleichen Spannungs-Zeit-Fläche unter der Kurve $u = f(t)$.

Bei einem elektrischen Gleichstrom entspricht die Strom-Zeit-Fläche unter der Kurve $i = f(t)$ gleich der Elektrizitätsmenge oder elektrischen Ladung $Q = I_{AV} \cdot t$. Für die elektrische Stromstärke gilt daher auch die folgende Aussage:

Der arithmetische Mittelwert I_{AV} eines Mischstroms ist der Gleichstromanteil, d.h. der Wert eines Gleichstroms, der in der gleichen Zeit die gleiche elektrische Ladungsmenge transportiert.

Für bestimmte Wirkungen des elektrischen Stroms, die nur bei Gleichstrom auftreten, ist stets nur der arithmetische Mittelwert ausschlaggebend. Dieses sind z.B.:

- die chemische Wirkung (z.B. bei der Ladung bzw. Entladung von Akkumulatoren, Elektrolyse, Galvanotechnik).
- die mittlere magnetische Kraftwirkung eines stromdurchflossenen Leiters in einem magnetischen Gleichfeld, z.B. das Drehmoment eines Gleichstrommotors mit Permanentmagnetanregung, der Ausschlag in einem Drehspulmesswerk (das daher den arithmetischen Mittelwert anzeigt).

Bei der Kennzeichnung des arithmetischen Mittelwertes werden dem Formelzeichen die Indizes AV (Durchschnitt, engl. *average*) angehängt, z.B.: U_{AV} bzw. I_{AV} oder ein Querstrich über das Formelzeichen u bzw. i gesetzt.

Bei einer Mischspannung mit symmetrischem Wechselspannungsanteil (wie in Bild 1.11b) ergibt sich der arithmetische Mittelwert als Durchschnittswert der beiden Extremwerte:

$$U_{AV} = \frac{u_1 + \hat{u}}{2}$$

Eine Rechteck-Impulsspannung, die nur aus Rechteckimpulsen gleicher Polarität besteht (Bild 1.12a), ist durch die Periodendauer T oder die Frequenz f , die Impulsdauer t_1 durch die Impulsspannung \hat{u} gekennzeichnet. Das Verhältnis der Impulsdauer zur Periodendauer wird **Tastverhältnis** oder **Tastgrad** genannt:

$$V_T = \frac{t_1}{T}$$

Der arithmetische Mittelwert der Rechteck-Impulsspannung errechnet sich durch Multiplikation der Impulsspannung mit dem Tastverhältnis:

$$U_{AV} = V_T \cdot \hat{u}$$

Begründung: Die Fläche unter dem Impuls der Rechteckspannung ist gleich der Fläche unter dem arithmetischen Mittelwert über eine Periode: $U_{AV} \cdot T = \hat{u} \cdot t_1$. Durch Umstellung der Formel erhält man:

$$U_{AV} = \hat{u} \cdot \frac{t_1}{T} = \hat{u} \cdot V_T$$

Beispiel

Eine positive Rechteck-Impulsspannung (Bild 1.12a) hat bei einer Frequenz von $f = 125$ Hz eine Impulsdauer von $t_1 = 2$ ms. Die Impulshöhe beträgt $\hat{u} = 6$ V. Wie hoch sind das Tastverhältnis und der arithmetische Mittelwert?

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{125 \text{ Hz}} = 8 \text{ ms}; \quad V_T = \frac{t_1}{T} = \frac{2 \text{ ms}}{8 \text{ ms}} = 0,25$$

$$U_{AV} = \hat{u} \cdot V_T = 6 \text{ V} \cdot 0,25 = 1,5 \text{ V}$$

Bei einer Rechteck-Mischspannung, die periodisch zwischen mehreren Werten springt (Bild 1.12b), errechnet sich der arithmetische Mittelwert durch Addition der Teilflächen unter der Spannungs-Zeit-Kurve und anschließender Division durch die Periodendauer:

$$U_{AV} = \frac{u_1 \cdot t_1 + u_2 \cdot t_2 + u_3 \cdot t_3 + \dots}{T}$$

Beispiel

Eine Rechteckspannung besteht aus folgenden vier Zeitintervallen mit unterschiedlichen Werten (Bild 1.12b):

$t_1 = 2$ ms mit $u_1 = 3$ V, $t_2 = 4$ ms mit $u_2 = 6$ V,
 $t_3 = 2$ ms mit $u_3 = -4$ V und $t_4 = 2$ ms mit $u_4 = 0$ V.