

Pflieger · Jahn · Jentsch

Elektrische Meßgeräte und Meßverfahren

Vierte, völlig neubearbeitete Auflage



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg GmbH



Pflieger · Jahn · Jentsch

Elektrische Meßgeräte und Meßverfahren

Vierte, völlig neubearbeitete Auflage
von G. Jentsch

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1978

Dr.-Ing. Paul M. Pflier
Nürnberg

Dr.-Ing. Hans Jahn
Siemens AG, Bereich Meß- und Prozeßtechnik, Karlsruhe

Dipl.-Ing. Gerhard Jentsch
Siemens AG, Bereich Meß- und Prozeßtechnik, Karlsruhe

Mit 392 Abbildungen

Bisher erschienene Auflagen:

Elektrische Meßgeräte und Meßverfahren

1. Auflage 1951. Von P. M. Pflier

2. Auflage 1957. Von P. M. Pflier

Pflier/Jahn, Elektrische Meßgeräte und Meßverfahren

3. Auflage 1965. Von H. Jahn

ISBN 978-3-662-06965-3 ISBN 978-3-662-06964-6 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-06964-6

Library of Congress Cataloging in Publication Data. Pflier, Paul Martin. Elektrische Messgeräte und Messverfahren. Includes bibliography and index. 1. Electric meters. 2. Electric measurements. I. Jahn, Hans 1925 – joint author. II. Jentsch, Gerhard, ed. III. Title. TK301. P48 1978 621. 37'4 78-5184

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1951, 1957, 1965 und 1978

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1978.

Softcover reprint of the hardcover 4th edition 1978

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bindearbeiten: K. Triltsch, Würzburg 2061/3020 – 543210

Vorwort zur vierten Auflage

Die Meßtechnik hat durch die stürmische Entwicklung der Elektronik und die Fortschritte in der Halbleitertechnik eine bemerkenswerte Bereicherung der Meßtheorie erfahren. Dem Meßtechniker steht heute über die traditionelle Fehlertheorie und Statistik hinaus das gesamte Rüstzeug der Nachrichten- und Regelungstechnik zur Verfügung. Neue Meßverfahren sind aber in der Praxis nicht so häufig, wie es das Studium wissenschaftlicher Veröffentlichungen vermuten läßt. Studenten, Praktiker und Ingenieure können auch heute nicht auf die Kenntnis allgemeingültiger, bisher bewährter Meß- und Konstruktionsprinzipien verzichten.

In der vorliegenden Neuauflage wurde daher die bewährte Darstellung der klassischen Meßgeräte und -verfahren unter Verzicht auf gelegentlichen Ballast methodisch-didaktisch überarbeitet und aktualisiert.

Die Abschnitte über elektrische Meßverstärker und die digitale Meßtechnik sind unter Berücksichtigung der heutigen Halbleitertechnik wesentlich erweitert gefaßt. Mit diesen meßtechnischen und technologischen Innovationen steigen Genauigkeit, Auflösungsvermögen und Reproduzierbarkeit. Im einzelnen werden die Funktionsglieder der Meßkette zum Aufnehmen, Anpassen, Verstärken, Verarbeiten und Ausgeben von Meßgrößen von der herkömmlichen analogen Meßtechnik bis zur digitalen automatischen Meßwertverarbeitung behandelt und ein umfassender Überblick über die Eigenschaften, Schaltungen und Anwendungen von Meßgeräten zur Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen gegeben.

Der Verfasser hat sich bemüht, das Grundsätzliche der meßtechnischen Probleme herauszuarbeiten. Der Leser, der eine Antwort auf Fragen zu speziellen geräte- und verfahrenstechnischen Problemen sucht, findet im Anhang ein über den üblichen Rahmen hinausgehendes, abschnittsweise zugeordnetes Schrifttum, das die wesentlichen Veröffentlichungen in jeweils chronologischer Reihenfolge enthält. Dafür wurde auf besondere Literaturhinweise innerhalb der Abschnitte verzichtet.

Den Fachkollegen der Firmen Gossen, Hartmann & Braun, Norma und den Mitarbeitern der SIEMENS AG, die dem Verfasser wertvolle

Anregungen und Beiträge für die Neuauflage zur Verfügung stellten, sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Ebenso gedankt sei den in den Bildunterschriften genannten Firmen, die mit neuem Bildmaterial zur Aktualisierung beigetragen haben.

Karlsruhe, im Juni 1978

GERHARD JENTSCH

Inhaltsverzeichnis

1 Meßtechnische Begriffe	1
1.1 Grundlagen des Messens	1
1.2 Die Fehler und ihr Einfluß auf das Meßergebnis	2
1.3 Regeln für Meßgeräte	2
1.4 Genauigkeitsanforderungen	3
1.4.1 Grundfehler	3
1.4.2 Einflußgrößen	4
1.5 Systematische und zufällige Fehler	5
1.5.1 Systematische Fehler	5
1.5.2 Zufällige Fehler	6
1.5.3 Fehlerfortpflanzung der systematischen Fehler	7
1.5.4 Fehlerfortpflanzung der zufälligen Fehler	8
1.6 Empfindlichkeit	9
1.7 Eigenverbrauch	9
1.8 Überlastbarkeit	10
2 Direkt wirkende elektrische Meßwerke	12
2.1 Aufbau und Eigenschaften von elektrischen Meßwerken	12
2.1.1 Schwingungseigenschaften des beweglichen Organs	12
2.1.2 Lagerung des beweglichen Organs	16
2.1.3 Einstellvorgang	22
2.1.4 Systemgewicht und Gütezahl	25
2.1.5 Beschleunigungssicherheit	26
2.2 Ausführung und Wirkungsweise von elektrischen Meßwerken	29
2.2.1 Drehspulmeßwerke	29
2.2.2 Kreuzspulmeßwerke	48
2.2.3 Drehmagnetmeßwerke	53
2.2.4 Dreheisenmeßwerke	59
2.2.5 Eisengeschlossene elektrodynamische Meßwerke	68
2.2.6 Eisengeschlossenes elektrodynamisches Kreuzspulmeßwerk	73
2.2.7 Eisenlose elektrodynamische Meßwerke	74
2.2.8 Induktionssysteme	80
2.2.9 Hysterese-meßwerk	82
2.2.10 Elektrostatische Meßwerke	84
2.2.11 Vibrationsmeßwerke	88
2.2.12 Bimetallmeßwerke	91

2.2.13	Überlastungsschutzeinrichtungen für Meßwerke	94
2.2.14	Kontaktgebende Meßwerke	97
3	Meßeinrichtungen und Meßverfahren	102
3.1	Meßgeräte zur Messung von Gleichspannungen und -strömen mit hoher Empfindlichkeit	103
3.1.1.	Spiegelgalvanometer	103
3.1.2	Drehpulpräzisionsmeßgeräte	105
3.2	Strom- und Spannungsmessung mit Neben- und Vorwiderständen	109
3.2.1	Ausführungsformen von Vor- und Nebenwiderständen	109
3.2.2	Strommessung mit Nebenwiderstand	114
3.2.3	Strommessung mit Mehrfachnebenwiderstand	116
3.2.4	Spannungsmessung mit Vorwiderstand	116
3.2.5	Kombinierte Strom- und Spannungsmesser mit mehreren Meßbereichen	117
3.2.6	Spannungsmessung mit einem Spannungsteiler	118
3.3	Gleichspannungskompensatoren	120
3.3.1	Allgemeines	120
3.3.2	Normalspannungsquellen	120
3.3.3	Grundschaltungen der Kompensation	124
3.3.4	Feussner-Kompensator	128
3.3.5	Kaskaden-Kompensator	129
3.3.6	Diesselhorst-Kompensator	133
3.3.7	Technische Kompensatoren	134
3.3.8	Selbstabgleichende Kompensatoren	135
3.4	Widerstandsmeßverfahren	139
3.4.1	Widerstandsmessung mit Strom- und Spannungsmessern	139
3.4.2	Widerstandsmessung mit Quotientenmessern	142
3.4.3	Gleichstrommeßbrücken	146
3.4.4	Übersicht über die Widerstandsmeßverfahren	150
3.5	Elektrostatische Meßverfahren	150
3.5.1	Spannungsmessung	150
3.5.2	Strommessung	152
3.5.3	Widerstandsmessung	153
3.5.4	Kapazitätsmessung	154
3.5.5	Zeitmessung	155
3.5.6	Leistungsmessung	155
3.6	Hallgeneratoren	156
3.6.1	Prinzip des Halleffektes	156
3.6.2	Ausführung der Hallgeneratoren	157
3.6.3	Die Anwendung von Hallgeneratoren	157
3.7	Leistungsmeßverfahren	160
3.7.1	Wechselstromleistungsmessung	160
3.7.2	Leistungsmessung in Drehstromnetzen	162
3.7.3	Scheinleistungsmessung	168
3.7.4	Bestimmung des Leistungsfaktors	169
3.8	Meßwandler	170
3.8.1	Aufgabe der Wandler	170

3.8.2	Stromwandler	170
3.8.3	Spannungswandler	180
3.8.4	Berücksichtigung der Wandlerfehler bei der Messung von Wechselstrom und Drehstrom mit gleichbelasteten Phasen	187
3.8.5	Wandler- und Bürdenmeßeinrichtungen	189
3.9	Das Zusammenarbeiten von Wandlern und Meßgeräten	191
3.9.1	Strommessung	191
3.9.2	Spannungsmessung	194
3.9.3	Leistungsmessung	196
3.9.4	Frequenzmessung	198
3.9.5	Ausführungsformen von Meßgeräten für Wandleranschluß	201
3.10	Gleichrichtermeßverfahren	205
3.10.1	Trockengleichrichter	205
3.10.2	Drehspulmeßwerke mit Gleichrichter	206
3.10.3	Mechanische Gleichrichter	213
3.10.4	Fremdgesteuerte Trockengleichrichter	216
3.11	Thermoumformer	221
3.12	Wechselspannungskompensatoren	225
3.12.1	Kompensationsschaltungen zum Vergleich von Gleich- und Wechselspannungen mit Thermoumformern	225
3.12.2	Kompensationsschaltungen zum Vergleich von Gleich- und Wechselstrommeßgrößen mit Hilfe von elektrodynamischen Meßwerken	226
3.12.3	Komplexer Wechselstromkompensator	228
3.12.4	Wechselstrommeßbrücken	230
3.13	Isolationsmeßverfahren	235
3.13.1	Isolationsmessung mit fremder Spannungsquelle	235
3.13.2	Isolationsmessung im Betrieb	240
3.14	Erdungsmeßverfahren	242
3.14.1	Erdungsmessung mit Strom- und Spannungsmesser	243
3.14.2	Erdungsmessung mit akustischem Indikator	244
3.14.3	Erdungsmessung nach der Kompensationsmethode	246
3.15	Kabelfehlerortungsverfahren	248
3.15.1	Fehlerortbestimmung durch Widerstandsmessung	249
3.15.2	Fehlerortbestimmung durch Kapazitätsmessung	255
3.15.3	Fehlerortbestimmung durch Laufzeitmessung	259
3.15.4	Fehlerortbestimmung durch induktive Verfahren	262
3.15.5	Ausführung von Kabelfehlerortungsgeräten	266
3.16	Elektrische Meßverstärker	271
3.16.1	Aufgaben der elektrischen Meßverstärker	271
3.16.2	Gegenkopplung	271
3.16.3	Gleichtaktspannung — Gleichtaktunterdrückung	275
3.16.4	Drift, Rauschen, Meßempfindlichkeit und Bandbreite	277
3.16.5	Verstärker-Ausgangsschaltung	279
3.16.6	Aufbau und Eigenschaften von Meßverstärkern	279
3.16.7	Ausführung von Meßverstärkern	284
3.17	Registrierverfahren	287
3.17.1	Schreibende Meßgeräte für langsam veränderliche Meßgrößen	287

3.17.2	Schreibende Meßgeräte für schnell veränderliche Meßgrößen	298
3.17.3	Elektronenstrahloszilloskope	318
3.18	Digitale Meßtechnik	326
3.18.1	Aufgaben und Grundlagen der digitalen Meßgeräte	326
3.18.2	Codierung	328
3.18.3	Analog-Digital-Umsetzer	328
3.18.4	Ausführungen von digitalen Meßschaltungen	338
3.18.5	Meßwertspeicherung und Meßwertausgabe	343
3.19	Fernmessung	352
3.19.1	Analoge Verfahren	352
3.19.2	Digitale Verfahren	364
3.20	Meßverfahren zur Messung nichtelektrischer Größen	368
3.20.1	Elektrische Temperaturmeßgeräte	368
3.20.2	Elektrische Gasanalysegeräte	373
3.20.3	Meßverfahren zur Feuchtemessung	379
3.20.4	Elektrometrische Messung nichtelektrischer Größen	380
3.20.5	Durchflußmessung und Mengenzählung flüssiger und gasförmiger Stoffe	383
3.20.6	Meßverfahren zur Kraft-, Dehnungs- und Schwingungsmessung	384
3.20.7	Strahlungsmeßgeräte	391
4	Normen und Regeln für elektrische Meßgeräte	395
	Literaturverzeichnis	397
	Sachverzeichnis	425

1. Meßtechnische Begriffe

1.1. Grundlagen des Messens

Aufgabe der Meßtechnik ist es, den wahren Wert einer Größe in einem gegebenen Augenblick mit einer zweckentsprechenden Genauigkeit zu ermitteln oder durch fortlaufende Anzeige bzw. Registrierung solcher Augenblickswerte ein Bild vom Verlauf eines Vorganges zu geben. Eine Messung ist der Vergleich der Meßgröße mit einer artgleichen Vergleichsgröße, der sogenannten Maßeinheit oder kurz Einheit.

Als Grundlage für reproduzierbare und universelle vergleichbare Meßergebnisse sind unveränderliche, international anerkannte Einheiten geschaffen worden: Das auf den Basisgrößen Länge, Masse, Zeit, Stromstärke, Temperatur, Stoffmenge und Lichtstärke beruhende Internationale Einheitssystem (Système International d' Unités, SI). Die entsprechenden Basiseinheiten sind bekanntlich das Meter (m), das Kilogramm (kg), die Sekunde (s), das Ampere (A), das Kelvin (K), das Mol (mol) und die Candela (cd). Die zugrundeliegenden internationalen Vereinbarungen wurden von der Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) getroffen. Im SI gibt es für jede Größe eine und nur eine Einheit.

In der Bundesrepublik Deutschland hat die Physikalisch-Technische Bundesanstalt nach dem „Gesetz über Einheiten im Meßwesen“ die gesetzlichen Einheiten mit möglichst kleiner Unsicherheit darzustellen, die nationalen Normale zu entwickeln und an die internationalen Normale anzuschließen. Prototypen von maßverkörperten Einheiten, auch Urmaße genannt, werden international in hierfür privilegierten Laboratorien aufbewahrt. Es besteht aber das Bestreben, die Definitionen der Einheiten auf atomare Parameter und Fundamentalkonstanten der Physik, die an jedem Ort gemessen werden können, zurückzuführen. Die Grundlagenforschung befaßt sich ständig mit der Entwicklung neuer Meßmethoden zur laufenden Anpassung der Einheiten-Definitionen an den jeweiligen Stand der naturwissenschaftlichen Erkenntnis. Daraus resultieren Verfahren, nach denen nichtverkörperte Einheiten dargestellt und maßverkörperte Einheiten zeitlich unveränderlich und unabhängig von maßverkörperten Prototypen werden. Die Ungenauigkeiten, die zwangsläufig entstehen, wenn an Hand von bereits mit Toleranzen behafteten gesetzlichen Normalen Gebrauchsnormale zum Eichen von industriellen Geräten geschaffen werden, sind meistens gegen die größere Unsicherheit der Meßgeräte und Meßverfahren zu vernachlässigen.

1.2. Die Fehler und ihr Einfluß auf das Meßergebnis

Die Fehler einer Messung setzen sich aus dem Grundfehler des Meßgerätes, den durch Umwelteinflüsse hervorgerufenen zusätzlichen Einflusseffekten, den Fehlern des Meßverfahrens und den persönlichen Fehlern des Beobachters zusammen.

Als die Meßergebnisse verfälschende Umwelteinflüsse sind z. B. zu beachten Temperatur, Luftdruck, Feuchte, elektrische Spannung, Frequenz und fremde elektrische oder magnetische Felder. Verfälschende persönliche Einflüsse sind abhängig von der Aufmerksamkeit, der Übung, der Sehschärfe und dem Schätzungsvermögen des Beobachters.

Bei jeder Meßaufgabe muß man das bestgeeignete Meßverfahren und Meßgerät hinsichtlich Empfindlichkeit, Genauigkeit, Eigenverbrauch, Frequenzbereich, Temperaturbereich, Kurvenformabhängigkeit, Auflösungsvermögen, Überlastbarkeit usw. sorgfältig wählen und sich an Hand der gegebenen Unterlagen über die zu erwartende Genauigkeit des Meßergebnisses klarwerden.

1.3. Regeln für Meßgeräte

Infolge dieser vielfältigen Eigenschaften elektrischer Meßgeräte ist es nicht leicht, ein Meßgerät durch wenige Zahlenangaben hinreichend zu kennzeichnen und Meßgeräte gleicher Art, gleicher Genauigkeit und gleicher Überlastungsfähigkeit können sich immer noch sehr wesentlich voneinander unterscheiden. Um willkürliche Abmachungen zwischen Herstellern und Verbrauchern zu vermeiden und eine Verständigung über Güte und Betriebssicherheit zu gewährleisten, hat man in allen Industrieländern Regeln für den Meßgerätebau aufgestellt und versieht Meßgeräte, die diesen Regeln entsprechen, mit einem besonderen Kennzeichen.

Auf internationaler Ebene werden Empfehlungen für elektrische Meßgeräte von der International Electrotechnical Commission (IEC) erarbeitet.

Der Fachnormenausschuß Elektrotechnik (FNE) im Deutschen Normenausschuß (DNA) und der Vorschriftenausschuß des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE), die inzwischen in der Deutschen elektrotechnischen Kommission (DKE) zusammengefaßt wurden, haben beschlossen, die IEC-Empfehlungen vollharmonisiert in das deutsche Normen- und Vorschriftenwerk zu übernehmen.

Auf die einschlägigen DIN/VDE-Vorschriften wird hier aber nur so weit eingegangen, wie es das Verständnis des Textes erfordert. Dem

Benutzer elektrischer Meßgeräte wird jedoch empfohlen, sich mit den geltenden Vorschriften und Normen vertraut zu machen.

Anhang 1. enthält die wichtigsten zur Zeit der Drucklegung geltenden Vorschriften und Normen für elektrische Meßgeräte.

1.4. Genauigkeitsanforderungen

1.4.1. Grundfehler

Auch ein sehr sorgfältig justiertes Meßgerät zeigt nicht den wahren Wert der Meßgröße an, sondern einen mehr oder weniger fehlerhaften Wert. Die Differenz zwischen dem angezeigten und dem richtigen Wert ist der absolute Fehler F . Der Fehler ist positiv, wenn die Anzeige des Meßgerätes zu groß ist.

$$\text{Fehler} = \text{falscher Wert} - \text{richtiger Wert} = \text{Istwert} - \text{Sollwert}.$$

Der relative Fehler ist

$$F_{\text{rel}\%} = \frac{\text{Istwert} - \text{Sollwert}}{\text{Sollwert}} 100\% = \frac{\text{falsch} - \text{richtig}}{\text{richtig}} 100\%.$$

Um die Genauigkeit eines Meßgerätes festzulegen, wird der Grundfehler in Prozent des Bezugswertes angegeben. Der Bezugswert ist nach DIN 43781 z. B. der Meßbereichsendwert.

$$F_{\text{rel}\% E} = \frac{\text{Istwert} - \text{Sollwert}}{\text{Bezugswert}} 100\%.$$

Bei Meßgeräten mit nichtlinearer gedrängter Skale, die keine separate lineare Skale haben, entspricht der Bezugswert der Skalenlänge.

Der Grundfehler beruht auf Unvollkommenheiten der Justierung, auf Fehlern des verwendeten Meßgerätes, die im Meßprinzip oder im Meßwerk Aufbau liegen, auf der Reibung und Zufälligkeiten. Der Grundfehler läßt sich durch gewisse Vorsichtsmaßnahmen beim Messen verringern. So kann z. B. der Reibungsfehler durch leichtes Klopfen verringert oder beseitigt werden. Die Umkehrspanne, das ist der Unterschied in der Anzeige, je nachdem man sich dem gleichen Sollwert von unten oder von oben nähert, wird ausgeschaltet, indem man den Mittelwert beider Ablesungen bildet.

Die DIN/VDE-Vorschriften lassen für elektrische Meßgeräte in den einzelnen Klassen folgende Fehlergrenzen zu:

Klassenzeichen	0,05	0,1	0,2	0,5	1	1,5	2,5	5
Fehlergrenzen \pm %	0,05	0,1	0,2	0,5	1	1,5	2,5	5

Dabei ist vorausgesetzt, daß die vom Hersteller angegebenen Referenzbedingungen eingehalten werden. Die Referenzbedingungen, z. B. für die Gebrauchslage und die Nennfrequenz bzw. den Nennfrequenzbereich sollen auf der Meßgeräteskala angegeben sein.

1.4.2. Einflußgrößen

Wenn unter anderen als den Referenzbedingungen gemessen wird, können noch zusätzliche Fehler auftreten. Sie dürfen bei Änderung einer Einflußgröße innerhalb des Nenngebrauchsbereichs aber nicht größer sein als in der Tabelle angegeben ist. Der Einflußeffect wird in Prozent des Bezugswertes angegeben. Einige Einflußgrößen sind:

Lageeinfluß. Die Meßgeräte können infolge Änderung der Reibung sowie durch ungenaue Äquilibration einen zusätzlichen Fehler haben, wenn sie nicht in ihrer normalen Gebrauchslage benutzt werden.

Temperatureinfluß. Der Temperatureinfluß beruht auf der Temperaturabhängigkeit der elektrischen, magnetischen und mechanischen Eigenschaften der für das Meßwerk verwendeten Werkstoffe, also der Änderung des elektrischen und magnetischen Widerstands, der Dielektrizitätskonstante, der Koerzitivkraft sowie der mechanischen Festigkeit mit der Temperatur und auf Wärmedehnungen.

Spannungseinfluß. Meßgeräte für eine bestimmte Nennspannung können bei abweichender Spannung infolge der veränderten Drehmomente und Erwärmung der durch Sättigungserscheinungen im Eisen der Meßwerke zusätzliche Anzeigefehler haben. Das gilt beispielsweise für Leistungsfaktormesser, Zeigerfrequenzmesser, Quotientenmesser und Leistungsmesser. Leistungsmesser können z. B. etwas verschiedene Werte anzeigen, je nachdem sie mit vollem Strom und halber Spannung oder mit halbem Strom und voller Spannung betrieben werden.

Anwärmeinfluß. Unter Anwärmeinfluß versteht man den Unterschied in der Anzeige zwischen kurz und lang dauernder Einschaltung mit demselben Meßwert; er kommt zustande durch Änderung der elastischen und magnetischen Eigenschaften der Meßwerkbaustoffe, durch Wärmedehnung sowie durch die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands und der Dielektrizitätskonstanten, er ist im allgemeinen

um so größer, je höher die Übertemperatur des Meßwerks im Betrieb ist. Für Präzisionsmeßwerke wird kein zusätzlicher Fehler durch die Anwärkung zugestanden. Er ist im Anzeigefehler enthalten.

Frequenzeinfluß. Der Frequenzeinfluß kommt zustande durch die Frequenzabhängigkeit der Eisen- und Kupferverluste und der Dielektrizitätskonstanten sowie durch frequenzabhängige Blindwiderstände.

Alle Meßgeräte mit merkbarem Frequenzeinfluß sind auch abhängig von der Kurvenform und haben zusätzliche Fehler, wenn die Wechselstromkurve von der Sinusform abweicht.

Leistungsfaktoreinfluß. Die Anzeige eines Leistungsmessers kann trotz gleicher Leistung etwas verschieden sein je nach der Größe der Phasenverschiebung. So kann ein Leistungsmesser beispielsweise

- bei voller Spannung, halbem Strom und $\cos \varphi = 1$,
- bei voller Spannung, vollem Strom und $\cos \varphi = 0,5$ ind.,
- bei voller Spannung, vollem Strom und $\cos \varphi = 0,5$ kap.

etwas voneinander abweichende Werte zeigen.

Fremdfeldeinfluß. Viele Meßwerke arbeiten mit Magnetfeldern, die von Dauermagneten oder stromdurchflossenen Spulen erzeugt werden. Überlagert sich diesen Meßfeldern ein äußeres fremdes Magnetfeld, so entstehen Fehler, worauf man besonders beim Aufstellen von Meßgeräten in der Nähe von Hochstromleitungen achten muß. Der Fremdfeldeinfluß wird den VDE-Vorschriften entsprechend bei einem Fremdfeld von 0,5 mT bei ungünstigster Stromart, Phasenlage und Frequenz geprüft. Mehrere gleichzeitig vorhandene Fremdfelder können vektoriell zu einem resultierenden Feld addiert werden.

Auch elektrische Fremdfelder können Fehler hervorrufen, beispielsweise bei elektrostatischen Meßwerken infolge Änderung des Meßfelds oder infolge statischer Aufladung und der elektrostatischen Anziehungskräfte. Nötigenfalls müssen diese Felder abgeschirmt werden.

Es ist in jedem einzelnen Fall erforderlich, sich über die Größe der möglichen Fehler klar zu sein, man muß deshalb stets genauestens die Grundlagen prüfen, auf denen das Meßergebnis beruht, sowie die äußeren Umstände, unter denen es zustande kam. Nur eine ständige kritische Überwachung der Meßverfahren, Meßgeräte und der Umwelt verhindert falsche Meßergebnisse.

1.5. Systematische und zufällige Fehler

1.5.1. Systematische Fehler

Die Fehlerquellen können Fehler systematischer oder zufälliger Art hervorrufen. Mit ihrer Definition und rechnerischen Behandlung befaßt sich DIN 1319.

Die systematischen Fehler sind Fehler der benutzten Maße und Meßgeräte sowie Fehler durch meßbare Umwelteinflüsse; zu den systematischen Fehlern sind auch erfassbare persönliche Einflüsse des Beobachters zu rechnen. Systematische Fehler haben eine bestimmte Größe und ein bestimmtes Vorzeichen und lassen sich meist durch eine Berichtigung aufheben, sie sind also im allgemeinen beherrschbar. Es gibt jedoch auch systematische Fehler, deren Ursachen unbekannt sind und die sich infolgedessen auch nicht berichtigen lassen. Die systematischen Fehler sind demnach teils beherrschbar, teils nicht beherrschbar, sie haben jedoch immer eine bestimmte, wenn auch unbekannte Größe und ein bestimmtes, wenn auch unbekanntes Vorzeichen.

1.5.2. Zufällige Fehler

Die zufälligen Fehler rühren von nicht bestimmbar Änderungen des Meßgeräts oder der Umwelt her, sie schwanken nach Größe und Vorzeichen und sind nicht beherrschbar, sie sind die Ursache der Streuung.

Wenn derselbe Beobachter dieselbe konstante Meßgröße mehrmals nacheinander mit demselben Meßgerät mißt und dabei die Umweltbedingungen konstant hält oder ihren Einfluß berichtigt, wenn er ferner alle beherrschbaren Fehler durch Berichtigung ausgeschaltet hat, weichen die Ergebnisse der Einzelmessungen dennoch voneinander ab, sie streuen um einen Mittelwert. Diese Streuung rührt allein von den unkontrollierbaren zufälligen Fehlern her, die eben wegen ihrer Zufälligkeit nicht beherrschbar und nicht zu berichtigen sind. Solche zufälligen Fehler können zurückgehen auf nicht bestimmbar Schwankungen in der Auffassung des Beobachters, nicht bestimmbar Fehler im Meßgerät, etwa hervorgerufen durch Lagerspiel, elastische Nachwirkungen oder mechanische Fertigungsmängel. Die zufälligen Fehler schwanken nach Größe und Vorzeichen.

Aus n gemessenen Einzelwerten ermittelt man den Mittelwert \bar{A} als arithmetisches Mittel der Einzelwerte A_i .

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i.$$

Der Mittelwert weicht vom richtigen Wert um einen geringeren Betrag ab als die Einzelwerte, und zwar um so weniger, je größer die Zahl der Einzelmessungen ist.

Das wichtigste Maß für die Gruppierung der Einzelwerte um den Mittelwert ist die Streuung oder die mittlere quadratische Abweichung s , auch Standardabweichung genannt:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}.$$

Bei rein zufälliger Verteilung der Fehler und einer genügend großen Zahl von Messungen gruppieren sich die Einzelwerte A_i um den Mittelwert \bar{A} nach dem bekannten Fehlerverteilungsgesetz von Gauß.

1.5.3. Fehlerfortpflanzung der systematischen Fehler

Der maximal mögliche Fehler einer Funktion

$$M = f(x, y)$$

läßt sich aus den systematischen Fehlern ax und by , den Toleranzen der beiden voneinander unabhängigen Meßgrößen x und y berechnen

$$\Delta M = \frac{\partial f}{\partial x} ax + \frac{\partial f}{\partial y} by$$

a und b müssen klein gegen 1 sein.

Multiplikation. Das Meßergebnis ergibt sich aus dem Produkt zweier mit Toleranzen behafteter Meßgrößen

$$M = x \cdot y.$$

Die maximal mögliche Toleranz des Meßergebnisses ist dann

$$\Delta M = \pm x \cdot y(a + b)$$

und die relative Toleranz des Meßergebnisses

$$\frac{\Delta M}{M} = \pm(a + b).$$

Die maximale Toleranz des Meßergebnisses ist also gleich der Summe der Toleranzen der Faktoren.

Bei gleichen Toleranzen der Einzelfaktoren ist also die Toleranz des Produkts um so kleiner, je kleiner die Zahl der Faktoren ist, d. h., von mehreren möglichen Meßverfahren ist dasjenige vorzuziehen, mit dem man das Meßergebnis auf dem kürzesten Weg erhält; z. B. ist die Leistungsmessung bei gleichen Toleranzen der Meßgeräte mit einem Wattmeter genauer als mit Strom- und Spannungsmesser.

Division. Auch bei der Division addieren sich im Meßergebnis die Toleranzen von Dividend und Divisor

$$M = \frac{x}{y},$$

$$\Delta M = \frac{x}{y} (\pm a \pm b); \quad \frac{\Delta M}{M} = \pm a \pm b.$$

Addition

$$M = x + y,$$

$$\Delta M = \pm(ax + by); \quad \frac{\Delta M}{M} = \pm \frac{ax + by}{x + y}.$$

Bei der Addition ist also die Größe der Toleranz abhängig von der Größe der Summanden, und der Fehler des Meßergebnisses richtet sich bei sehr verschiedenen großen Summanden nach der Toleranz des größeren, der deshalb besonders genau gemessen werden muß.

Subtraktion

$$M = x - y,$$

$$\Delta M = \mp(ax + by); \quad \frac{\Delta M}{M} = \mp \frac{ax + by}{x - y}.$$

Wie die Gleichung zeigt, kann der Fehler des Meßergebnisses bei der Subtraktion sehr groß werden, wenn x und y groß, ihre Differenz dagegen klein ist, weshalb man alle Meßverfahren vermeiden sollte, bei denen das Ergebnis als Differenz großer Zahlen auftritt.

1.5.4. Fehlerfortpflanzung der zufälligen Fehler

Durch die Toleranzrechnung erhält man den maximal möglichen Fehler des Meßergebnisses, der mittlere Fehler bei rein zufälligen Fehlerursachen ergibt sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz von Gauß. Ist das Meßergebnis M eine Funktion der unabhängigen Veränderlichen x und y

$$M = f(x, y) \tag{1.5.1}$$

und wurden die Standardabweichungen s_x und s_y nach Gl. (1.5.1) aus Meßreihen mit gleicher Anzahl von Einzelwerten ermittelt, so berechnet sich die Standardabweichung s_M für das Meßergebnis aus der Gleichung

$$s_M = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \cdot s_x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \cdot s_y\right)^2}.$$

Ist M das Produkt der unabhängigen Veränderlichen x und y mit den Standardabweichungen s_x und s_y , dann errechnet sich die Standardabweichung s_M wie folgt:

$$M = f(x, y) = x \cdot y; \quad \frac{\partial f}{\partial x} = y; \quad \frac{\partial f}{\partial y} = x,$$

$$s_M = \sqrt{(y \cdot s_x)^2 + (x \cdot s_y)^2}.$$

Ist M eine lineare Funktion

$$M = ax + by,$$

so hat das Meßergebnis die Standardabweichung

$$s_M = \sqrt{(as_x)^2 + (bs_y)^2}.$$

1.6. Empfindlichkeit

Unter Empfindlichkeit E eines Meßverfahrens oder Meßgeräts, bei dem der Meßwert an einer Strichskale abgelesen wird, versteht man das Verhältnis der beobachteten Verschiebung Δl einer Zeigermarke zu der sie verursachenden Änderung ΔM der Meßgröße:

$$E = \frac{\Delta l}{\Delta M}.$$

Die Empfindlichkeit eines Meßgeräts mit Strichskale hat also immer die Dimension Länge/Meßgröße. Daraus folgt, daß alle Meßgrößen bei Meßgeräten mit Zeigermarken letzten Endes auf eine Länge zurückgeführt werden müssen, denn nur Längen kann man ablesen. Die Empfindlichkeit eines Meßgeräts oder Meßverfahrens ist um so höher, je größer der Weg der Ablesemarke für eine bestimmte Änderung der Meßgröße ist. Zur genaueren Kennzeichnung kann man von Stromempfindlichkeit, Spannungsempfindlichkeit, Anfangsempfindlichkeit usw. sprechen. Der reziproke Wert der Empfindlichkeit ist die Konstante des Meßgerätes, das ist die Änderung der Meßgröße, die eine Verschiebung der Anzeigemarke um einen Teilstrich bewirkt. So spricht man z. B. von Stromkonstante, ballistischer Konstante usw.

Bei Meßgeräten mit einer Ziffernskale, z. B. den Digitalmeßgeräten, ist die Empfindlichkeit das Verhältnis der Änderung ΔZ der Anzeige in Ziffernschritten zu der sie verursachenden Änderung ΔM der Meßgröße

$$E = \frac{\Delta Z}{\Delta M}.$$

Die Empfindlichkeit hat nichts mit der Genauigkeit zu tun, ein Meßgerät oder Meßverfahren kann sehr empfindlich, aber dabei ungenau sein und umgekehrt, und es ist stets darauf zu achten, daß Empfindlichkeit und Genauigkeit in einem angemessenen Verhältnis stehen.

1.7. Eigenverbrauch

Elektrische Meßgeräte verbrauchen zum Erzeugen des Drehmoments und zur Temperaturkompensation eine elektrische Leistung, die dem Meßkreis entzogen wird und das Meßergebnis fälschen kann, wenn sie

nicht gegenüber der Leistung des Meßkreises verschwindend klein ist oder im Meßergebnis berücksichtigt wird. Unter sonst gleichen Verhältnissen ist deshalb das Meßgerät mit dem geringsten Eigenverbrauch zu bevorzugen.

1.8. Überlastbarkeit

Alle Betriebsmeßgeräte sind vorübergehenden Überlastungen ausgesetzt und dürfen dabei nicht beschädigt werden. Die Überlastung beansprucht das Meßwerk mechanisch infolge der Drehmomentsteigerung und thermisch infolge der größeren Wärmeentwicklung. Man unterscheidet deshalb zwischen dynamischer und thermischer Überlastungsfähigkeit und gibt beide in Vielfachen des Meßbereichendwertes an.

Der dynamische Grenzstrom ist die erste Amplitude eines sehr kurzen Stromstoßes, den das Meßwerk gerade noch aushält, der thermische

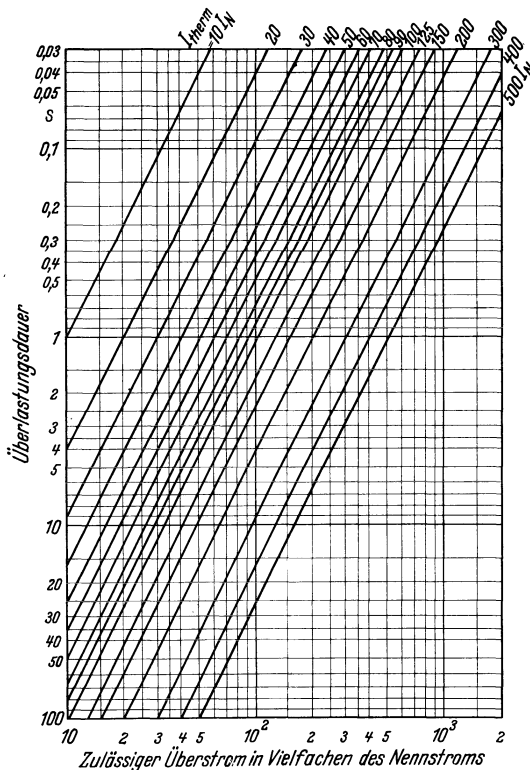


Abb. 1.8.1 Thermische Überlastungsfähigkeit eines Meßgerätes. Zusammenhang zwischen Überlastungsdauer t und der Größe des Überstroms in Vielfachen a des Nennstroms I_n mit dem thermischen Grenzstrom I_{therm} als Parameter