

Die neue Meisterprüfung

Reinhold

meß-, steuerungs- und regelungstechnik

für installateure und heizungsbauer



Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik

Die neue Meisterprüfung

**Meß-, Steuerungs-
und
Regelungstechnik**
für Installateure und Heizungsbauer

Dipl.-Ing. Christian Reinhold

3., aktualisierte Auflage

Vogel Buchverlag
Zentralverband Sanitär Heizung Klima

Dipl.-Ing. CHRISTIAN REINHOLD

Jahrgang 1958. Nach der Lehre zum Meß-, Steuerungs- und Regelungs-techniker absolvierte er ein Studium der Elektrotechnik mit Spezialisierung auf Informationstechnik, anschließend ein postgraduales Studium für Fachschulpädagogik.

Seit 1985 folgten Tätigkeiten als Fachdozent an der Ingenieurschule Glauchau, später an der Staatlichen Studienakademie Glauchau, Studienrichtungsleiter Technische Informatik/Informationstechnik.

Er hält Meisterkurse an der Fachschule für Technik der Steinbeis-Stiftung in Glauchau.

Weitere Informationen:
www.vogel-buchverlag.de

978-3-8343-3262-2

3. Auflage, 2012

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 1999 by Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, Würzburg
Umschlaggrafik: Icon, Veitshöchheim

Geleitwort

Mit Inkrafttreten der Novelle zur Handwerksordnung am 1. April 1998 ist mit dem *Installateur und Heizungsbauer* ein Handwerk entstanden, dessen Tätigkeitsgebiete den gesamten Bereich der Ver- und Entsorgungsanlagen in der Gebäudetechnik umfassen.

Absolventen der Meisterprüfung in diesem neuen Handwerk werden nach dem Willen des Gesetzgebers Kenntnisse über alle Arbeitsgebiete des Berufsbildes nachweisen müssen. Dies wird einen neuen Zuschnitt der Prüfungsfächer und damit auch eine Neugestaltung der Vorbereitungsmaßnahmen auf die Prüfung bedeuten. Dabei sind vor allem die vielfachen Überschneidungen zu berücksichtigen, die in einzelnen Technikgebieten zwischen den bisherigen Einzelberufen Gas- und Wasserinstallateur bzw. Zentralheizungs- und Lüftungsbauer bereits bestanden.

Im Vorgriff auf die zur Zeit in Arbeit befindliche neue Meisterprüfungsverordnung hat der Vogel Verlag in Abstimmung mit dem Zentralverband Sanitär Heizung Klima eine Lehrbuchreihe konzipiert, die diesen ganzheitlichen Prüfungsansatz bereits berücksichtigt. In dieser Buchreihe, die sowohl zur Vorbereitung auf die Meisterprüfung als auch als Nachschlagewerk dienen kann, ist der Stoff bereits nicht mehr nach einzelberuflicher Sichtweise, sondern nach übergreifenden Technikgebieten geordnet.

Die vorgesehene Abstimmung der Inhalte mit den Vorgaben des bundeseinheitlichen Rahmenplans des ZVSHK für die Vorbereitung auf die Meisterprüfung wird nach unserer Auffassung wesentlich zu einem gleichmäßig hohen Niveau der Sachkunde zukünftiger Meister im Installateur- und Heizungsbauerhandwerk beitragen.

St. Augustin
Zentralverband Sanitär Heizung Klima

Vorwort

Die rasante Entwicklung in der Elektronik und Informationstechnik beeinflusste in den letzten Jahren auch sehr stark den Bereich der Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik. Durch eine zunehmende Verschmelzung der einzelnen Gebiete ergeben sich damit aber auch neue Möglichkeiten, um die Forderungen nach betriebstechnischen Anlagen mit hoher Zuverlässigkeit, geringem Wartungsaufwand, hohem Komfort und vor allem auch wirtschaftlicher Betriebsweise erfüllbar zu machen. Besonders durch die zunehmenden Energiekosten sowie auch durch das gewachsene Umweltbewußtsein werden immer neue Anforderungen an Anlagen gestellt, die außerdem durch den Gesetzgeber in Form von Erlässen untermauert werden.

Jeder, der mit Planung, Erstellung, Betrieb und Wartung von Heizungs- und Lüftungsanlagen beschäftigt ist, muß daher neben den erforderlichen Kenntnissen seines eigentlichen Fachgebietes auch ein Grundwissen an regelungstechnischen Zusammenhängen besitzen. Bereits bei der Planung können bei Nichtbeachtung solcher sicherheits- und regelungstechnisch relevanten Anforderungen Probleme entstehen, die dem Ziel einer funktionsfähigen Anlage mit wirtschaftlichem Betrieb im Wege stehen. Die Anforderungen werden in den nächsten Jahren speziell auf diesem Gebiet weiter wachsen.

Mit dem vorliegenden Buch wird der Leser in die Lage versetzt, die Funktionszusammenhänge bei der Steuerung und Regelung der von ihm geplanten, gebauten oder zu wartenden Anlagen zu verstehen. Es umfaßt die meßtechnischen Prinzipien und Verfahren zur Messung der in dem Fachgebiet dominierenden Prozeßgrößen wie beispielsweise Temperatur, Druck, Feuchte, aber auch die verbrauchte Wärmemenge oder den Schall. Weiter wird die Steuerungs- und Regelungstechnik mit der Darlegung der wichtigsten Begriffe sowie der Einordnung der erforderlichen Geräte und Komponenten besprochen. Schwerpunkte bilden dabei in der Praxis konkret vorkommende Anwendungsfälle.

Das Buch eignet sich wegen seiner ausführlichen Darstellung und entsprechenden Querverweisen sowohl für das Selbststudium als auch als unterrichtsbegleitendes Material. Durch seinen Praxisbezug wendet es sich speziell an Schüler und Studenten an den Meister- und Technikerschulen, ist aber darüber hinaus auch für Studenten an Berufsakademien und Fachhochschulen sicherlich ein guter Wegbegleiter bei der Aneignung von Kenntnissen der MSR-Technik auf dem Gebiet der Heizungs-, Lüftungs- und Sanitärtechnik.

Glauchau

Christian Reinhold

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort	5
Vorwort	7
1 Grundlagen der Meßtechnik	15
2 Messen elektrischer Größen	19
2.1 Strommessung	19
2.2 Spannungsmessung	21
2.3 Widerstandsmessung	23
2.3.1 Indirekte Messung	23
2.3.2 Direkte Messung	23
2.4 Analog-Digital-/Digital-Analog-Umsetzung	26
3 Messen nichtelektrischer Größen	29
3.1 Temperaturmessung	29
3.1.1 Mechanische Berührungsthermometer	29
3.1.2 Elektrische Berührungsthermometer	33
3.1.3 Berührungslose Temperaturmessung	49
3.1.4 An- und Einbauhinweise für Temperatur-, Raum- und Außenfühler	54
3.2 Druckmessung	59
3.2.1 Flüssigkeitsmanometer	60
3.2.2 Federelastische Manometer	63
3.2.3 Kolbenmanometer	66
3.2.4 Elektrische Druckaufnehmer	67
3.2.5 Hinweise zum Messen von Drücken	74
3.3 Feuchtemessung	76
3.3.1 Haar- oder Kunststoffband-Hygrometer	76
3.3.2 Lithiumchlorid-Taupunktfühler	77
3.3.3 Psychrometer	80
3.3.4 Leitwert-Hygrometer	82
3.3.5 Kapazitive Feuchtefühler	82
3.3.6 Schwingquarz-Hygrometer	84
3.3.7 Tauspiegel-Hygrometer	84
3.3.8 Infrarot-Hygrometer	85
3.3.9 Weitere Absorptionshygrometer	86

3.4	Mengen- und Durchflußmessung	86
3.4.1	Auslaufzähler	87
3.4.2	Verdrängungszähler	88
3.4.3	Volumenzähler mit Meßflügeln (Turbinenzähler)	91
3.4.4	Hinweise zu Wasserzählern	94
3.4.5	Magnetisch-induktive Durchflußmessung	97
3.4.6	Ultraschall-Durchflußmessung	98
3.4.7	Messung der Strömungsgeschwindigkeit von Gas- und Luftströmen	100
3.5	Wärmemengenmessung	103
3.5.1	Heizkostenverteiler	104
3.5.2	Wärmemengenzähler	109
3.6	Schallpegelmessung	119
4	Grundlagen der Steuerungs- und Regelungstechnik	129
4.1	Steuerung	130
4.2	Regelung	131
4.3	Grundbegriffe nach DIN IEC 60 050-351	132
4.4	Analyse- und Beschreibungsmöglichkeiten von Übertragungsgliedern	133
4.4.1	Statische Kennlinie	134
4.4.2	Dynamische Kennlinie	135
5	Regelstrecken	137
5.1	Abgrenzung der Regelstrecke	137
5.2	Arten und Kennwerte von Regelstrecken	138
5.2.1	Strecken mit Ausgleich	139
5.2.2	Strecken ohne Ausgleich	145
5.3	Kennlinien der Strecken und Arbeitspunkt	145
5.4	Regelbarkeit der Strecken	146
6	Regler	149
6.1	Einteilung der Regler	150
6.2	Zweipunktregler	151
6.3	Stetig-ähnliche Regler/Dreipunktregler mit Motorantrieb	155
6.4	Proportionalregler	156
6.5	Integralregler	158
6.6	Proportional-Differential-Regler	159
6.7	Proportional-Integral-Regler	161
6.8	Proportional-Integral-Differential-Regler	162
6.9	Auswahl von geeigneten Reglern – optimale Reglereinstellung	164

7	Stellgeräte	169
7.1	Stellantriebe	170
7.1.1	Elektromotorische Stellantriebe	170
7.1.2	Elektrothermische Stellantriebe	171
7.1.3	Elektromagnetische Stellantriebe	172
7.1.4	Elektrohydraulische Stellantriebe	173
7.1.5	Pneumatische Stellantriebe	174
7.2	Verhalten des Stellgerätes bei Ausfall der Hilfsenergie	174
7.3	Wirkungssinn von Stellgeräten	175
7.4	Stellglieder	175
7.4.1	Stellventile	175
	Bauformen	175
	Kennwerte	178
	Hydraulische Grundsaltungen	179
	kV-Wert-Berechnung	182
	Kennlinien	186
7.4.2	Stellklappen	188
7.4.3	Drehzahlsteller für Pumpen bzw. Ventilatoren	189
7.4.4	Stellungsregler/Stellungsrelais	193
8	Thermostat- und Sicherheitsventile	195
8.1	Thermostatventile	195
8.1.1	Aufbau und Wirkungsweise	195
8.1.2	Zusammenhang der Größen	196
8.1.3	Auswahl	198
8.1.4	Einflüsse auf das Verhalten des Thermostatventils	199
8.1.5	Richtiger Einbau /Weiterentwicklungen	202
8.1.6	Hydraulischer Abgleich von Heizungssystemen	204
8.2	Sicherheitsventile	208
8.2.1	Einteilung nach der Öffnungscharakteristik	208
8.2.2	Einteilung nach Bauarten	209
8.2.3	Kenngrößen	210
8.2.4	Anwendung der verschiedenen Sicherheitsventile	211
8.2.5	Ausführliche Größenbemessung von Sicherheitsventilen	214
	Gase und Dämpfe allgemein	215
	Technische Gase	215
	Wasserdampf	217
	Nichtsiedende Flüssigkeiten	218

9 Steuerungs- und regelungstechnische Lösungen aus dem Bereich der Heizungstechnik	219
9.1 Regelungstechnische Anforderungen bei Kesseln	219
9.2 Anforderungen laut Energieeinspar-Verordnung an MSR-Technik und deren Umsetzung	220
9.2.1 Raumweise Temperaturregelung	220
9.2.2 Vorregelungen	221
9.2.3 Brauchwassererwärmung	225
9.3 Betriebsarten und Zusatzfunktionen	227
9.4 Heizkurveneinstellung	229
9.5 Steuerungs- und Regelungseinrichtungen an Gasbrennern	231
9.5.1 Gasfeuerungsautomaten	232
9.5.2 Gasstraße	233
9.5.3 Gasdruckregler	233
9.5.4 Gasdruckwächter	234
9.5.5 Gasventile	234
9.6 Zündeinrichtungen	235
9.7 Zündsicherungen	236
9.7.1 Thermoelektrische Zündsicherung	236
9.7.2 Ionisationszündsicherung	237
9.7.3 UV-Flammenüberwachung	238
9.7.4 Photoelektrische Flammenüberwachung	239
9.8 Kesselfolgeschaltungen	239
9.8.1 Kesselrücklaufanhebung	239
9.8.2 Regelung der Zu- und Abschaltung	241
9.8.3 Führungskesselwahl	246
9.9 Steuerung und Regelung von Solarkreisläufen	247
9.9.1 Thermische Solaranlagen zur Brauchwasser- erwärmung	247
9.9.2 Thermische Solaranlage zur Warmwasserberei- tung und zusätzlichen Heizungsunterstützung über ein Zweispeichersystem	251
9.9.3 Thermische Solaranlage zur Schwimmbad- erwärmung	252
9.9.4 Thermische Solaranlage zur Brauchwasser- und Schwimmbaderwärmung	254
9.9.5 Sicherheitsanforderungen an solarthermische Anlagen	255
9.10 Weitere regelungstechnische Geräte in der Heizungstechnik	256
9.10.1 Druckregler/Druckminderer	256
9.10.2 Differenzdruckregler/Überströmventile	256

10 Steuerungs- und regelungstechnische Lösungen aus dem Bereich der Lüftungs- und Klimatechnik	261
10.1 Einfache raumluftechnische Anlagen mit Klappenverstellung	262
10.1.1 Klappen-Auf-Zu-Steuerung	262
10.1.2 Mischluft-Temperaturregelung	264
10.2 Regelung raumluftechnischer Anlagen mit Lufterhitzer/-kühler	269
10.2.1 Konstante Zuluft-Temperaturregelung	270
10.2.2 Sequenzregelung Heizen-Kühlen	272
10.2.3 Zuluft-Temperaturregelung mit Wärmerück- gewinnungssystem	274
10.3 Gleitende Temperaturregelung	275
10.4 Raumluf-Temperaturregelung/Kaskadenregelungen . . .	276
10.4.1 Zulufttemperatur-Minimalbegrenzung	277
10.4.2 Konstante Raumtemperaturregelung	278
10.4.3 Raumluf-Temperaturregelung mit Sommer-/ Winterbetrieb	279
10.4.4 Sequenzregelung Klappen, Lufterhitzer und Luftkühler	280
10.5 Luftfeuchteregeung bei raumluftechnischen Anlagen .	282
10.5.1 Taupunktregelung	282
10.5.2 Direkte Feuchteregeung	284
10.6 Beispiel einer Klimaanlagenregelung	287
10.7 Druckregelung von raumluftechnischen Anlagen	289
10.8 Variable Volumenstromregelung	291
10.9 Frostschutzmaßnahmen bei raumluftechnischen Anlagen	297
10.10Energiemanagementmaßnahmen bei raumluf- technischen Anlagen	299
10.11Gerätetechnik zur Realisierung der Steuerungs- und Regelungsaufgaben	302
Quellenverzeichnis	306
Formelverzeichnis	307
Stichwortverzeichnis	311

1

Grundlagen der Meßtechnik

□ Meßtechnische Grundbegriffe

Für die Realisierung von Steuerungs- bzw. Regelungsfunktionen sowie die Gewährleistung entsprechender Sicherheitsfunktionen in Anlagen der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik ist die Erfassung der zu beeinflussenden Größen von größter Bedeutung. Ohne meßtechnische Erfassung dieser Größen ist eine weitere Verarbeitung nicht möglich. Dem Thema Meßtechnik kommt damit eine grundlegende Bedeutung zu.

Auch für die vertragsrechtliche Abrechnung von verbrauchten Medien ist eine Messung unerlässlich.

Oberstes Gebot in der Meßtechnik ist die Aussage:

Messen Sie nie so genau wie möglich, sondern immer so genau wie nötig.

Die vielfältigen Begriffe, die in der Meßtechnik Anwendung finden, sind in der DIN 1319 Teil 1 bis 4 dargelegt. Es sollen an dieser Stelle einige wichtige Begriffe erläutert werden.

Unter **Messen** versteht man den experimentellen Vorgang, durch den ein spezieller Wert einer physikalischen Größe als Vielfaches einer Einheit ermittelt wird.

Die **Meßgröße** ist dabei diejenige physikalische Größe, der die Messung gilt. Aus dem Bereich der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik sind dies z. B. die Temperatur, Feuchte, Druck u. a.

Als **Meßobjekt** wird der Träger der physikalischen Größe bezeichnet. Meßobjekte können Körper, Vorgänge oder Zustände sein. So ist bei der Messung einer Lufttemperatur die Luft (Körper) selbst das Meßobjekt.

Ein **Meßgerät** stellt die Einrichtung zur Ermittlung der Meßgröße dar. Es liefert oder verkörpert auch die Verknüpfung mehrerer unabhängiger Werte. Es werden Geräte mit direkter Ausgabe (z. B. anzeigendes **MG**, registrierendes MG) und übertragende Meßgeräte (Meßverstärker, Meßumformer) unterschieden.

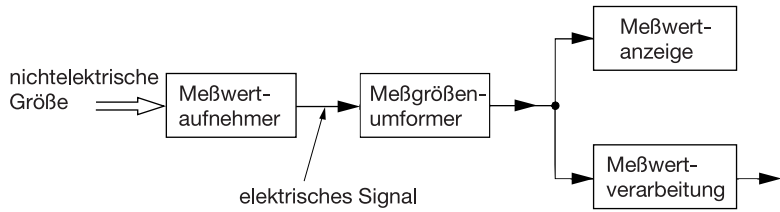
Werden mehrere zusammenhängende Meßgeräte mit zusätzlichen Geräten (Hilfsgeräte) kombiniert, so spricht man von einer **Meßeinrichtung**.

Meßtechnische Grundbegriffe

1

Meßgerät

Bild 1.1
Aufbau einer Meßeinrichtung als Meßkette



Meßeinrichtung. Ihre wesentliche Aufgabe ist die Aufnahme des Wertes einer physikalischen Größe, die Weiterleitung und Umformung des Meßsignals und die Ausgabe eines entsprechenden Meßwertes.

Bei einer Meßeinrichtung werden die einzelnen Glieder in Kette geschaltet; diese wird auch als **Meßkette** (Bild 1.1) bezeichnet.

Unter **Meßanlagen** versteht man mehrere voneinander unabhängige Meßeinrichtungen, die in räumlichem oder funktionellem Zusammenhang stehen. Dies ist beispielsweise bei Meßwarten von Umformerstationen der Fall.

Ein Meßgerät kann innerhalb eines bestimmten Bereiches seines Eingangssignals eingesetzt werden. Dieser **Meßbereich** ist derjenige Bereich von Geräten, in dem vorgegebene, vereinbarte oder garantierte Fehlergrenzen nicht überschritten werden. Der Meßbereich wird durch seine Grenzen *Anfangswert* und *Endwert* angegeben.

Die Differenz zwischen Anfangs- und Endwert wird als **Meßspanne** bezeichnet. Bei anzeigenden Meßgeräten ist der Meßbereich häufig ein Teil des Anzeigebereiches.

Zur Gewinnung von Meßwerten werden bei den Meßfühlern verschiedene **Meßprinzipien** angewandt, d. h., es werden verschiedene charakteristische Erscheinungen genutzt, um den Meßwert zu erfassen. Bei der Temperaturmessung verwendet man beispielsweise die Längenausdehnung von Festkörpern bei Erwärmung, die Widerstandsänderung eines elektrischen Widerstandes u. a. m.

Alle experimentellen Maßnahmen, die der Gewinnung eines Meßwertes dienen, bezeichnet man als **Meßverfahren**. Es werden u. a. unterschieden:

- Arten**
- direktes Meßverfahren
Der Meßwert wird als Größenwert dieser Meßgröße ausgegeben bzw. unmittelbar angezeigt (Temperatur bei einem Flüssigkeitsthermometer);
 - indirektes Meßverfahren
Die Ermittlung erfolgt als Größenwerte einer anderen physikalischen Größe. Der gesuchte Meßwert muß daraus unter Verwendung bekannter physikalischer Zusammenhänge errechnet werden (Wärmemenge wird aus ermitteltem Durchfluß und ermittelter Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf errechnet).

Hauptstempel einer Eichung
(Bleiplombe bzw. Klebeplakette)

Vorderseite



Rückseite
(Jahr der Eichung)



Hauptstempel einer Beglaubigung
(Bleiplombe bzw. Klebeplakette)

Vorderseite



Rückseite
(Jahr der Beglaubigung)



Bild 1.2
h- und Beglaubigungszeichen

Die Einordnung bezüglich der Genauigkeit von Meßgeräten erfolgt über die **Fehlerklasse**. Sie bezeichnet einen Zahlenwert, der den größten zulässigen absoluten Fehler, bezogen auf die Meßspanne, in Prozent ausdrückt. So ist bei einem Manometer mit einem Meßbereich von 0 bis 10 bar und einer Fehlerklasse 2,5 mit einer maximalen Abweichung von $\pm 0,25$ bar zu rechnen. Diese Abweichung wird auch als **Fehlergrenze** des Gerätes bezeichnet.

In manchen Bereichen ist ein exakter Meßwert gar nicht erforderlich. Hier ist nur die Aussage interessant, ob eine bestimmte Größe innerhalb definierter Grenzen liegt. Es erfolgt eine **Prüfung**, bei der festgestellt wird, ob ein Prüfling eine oder mehrere vorgegebene Bedingungen erfüllt. Ein typisches Beispiel ist die Prüfung einer Fernleitung auf Durchgang bzw. Unterbrechung.

Eichen umfaßt die von einer Eichbehörde nach Vorschriften vorzunehmende Prüfung und die entsprechende Stempelung bzw. Beurkundung. Dabei wird festgestellt, ob das vorliegende Meßgerät den Eichvorschriften entspricht und seine meßtechnischen Eigenschaften den gestellten Anforderungen genügen. Denken wir in diesem Zusammenhang an die im Gesetz über das Meß- und Eichwesen (Eichgesetz) festgelegte Eichpflicht bei der Durchflußmessung bzw. Wärmemengenmessung. Bei Meßgeräten für Elektrizität, Gas, Wasser und Wärme ist die **Beglaubigung** durch eine staatlich anerkannte Prüfstelle (z.B. beim Hersteller oder Versorgungsunternehmen) der amtlichen Eichung gleichwertig. In Bild 1.2 sind verwendete Eich- und Beglaubigungszeichen dargestellt.

2

Messen elektrischer Größen

- Strommessung
- Spannungsmessung
- Widerstandsmessung
- Analog-Digital-/Digital-Analog-Umsetzung

Der Meister für Heizungs-, Lüftungs- und Klima- sowie Sanitärtechnik muß in der Lage sein, an Anlagen bzw. Komponenten davon bei der Fehlersuche einfache Messungen elektrischer Größen durchzuführen. Dazu zählt die Messung von Spannung, Strom bzw. des elektrischen Widerstandes. Die Einhaltung der einschlägigen Sicherheitsbestimmungen ist dabei selbstverständlich zu beachten.

Für die Messung dieser Größen gibt es eine Vielzahl von Prinzipien bzw. Gerätetypen. Am häufigsten im Einsatz sind dabei kombinierte Meßgeräte, sogenannte **Vielfachmesser**, die sowohl Spannungs-, Strom- als auch Widerstandsmessungen zulassen.

2.1 Strommessung

Als Folge des Betriebes elektrischer Geräte entsteht ein fließender elektrischer Strom. Die Kenntnis über seine Höhe kann in vielen Fällen einen Aufschluß über das Betriebsverhalten des Gerätes geben. Die zur Messung eingesetzten Geräte werden daher von dem zu messenden Strom durchflossen und haben die Aufgabe, dessen Wert zur Anzeige zu bringen.

Solche Meßgeräte zur Messung fließender Ströme besitzen einen geringen Innenwiderstand. Sie werden in Reihe zum entsprechenden Verbraucher geschaltet, so daß der fließende Strom das Meßgerät passieren muß. Bild 2.1 zeigt die Einschaltung eines Strommessers in einen Stromkreis.

Bei der Messung unbekannter Ströme erfolgt eine Einstellung des Meßbereiches ausgehend vom größten Bereich. Erfolgt nur ein geringer Ausschlag, so kann zum nächstkleineren Meßbereich umgeschaltet werden.

Bei der Meßbereichumschaltung zu größeren Bereichen (Erweiterung) erfolgt das Parallelschalten von sogenannten Nebenwiderständen (Shunts) zum Meßgerät selbst. Durch geeignete Wahl dieser Shunts kann

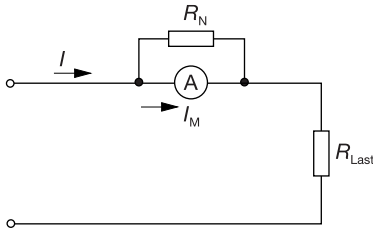


Bild 2.1
Schaltung eines Strommessers mit Nebenwiderstand

eine Erweiterung des Bereiches als Vielfaches des Grundwertes erfolgen. Für die selbständige Realisierung der Meßbereichserweiterung eines Strommessers muß der Innenwiderstand des verwendeten Gerätes bekannt sein. Mit Gleichung 2.1 läßt sich der **Nebenwiderstand** leicht ermitteln. Dabei ist I_M der durch den Strommesser fließende Strom bei Vollausschlag. Mit I wird der Strom bezeichnet, der künftig nach der Erweiterung gemessen werden soll. Der Innenwiderstand des Meßgerätes wird als R_I bezeichnet.

$$R_N = \frac{I_M \cdot R_I}{(I - I_M)} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Die Nebenwiderstände müssen teilweise erhebliche Belastungen abhalten. Bei der Dimensionierung ist der Querschnitt des Widerstandsmaterials als erstes festzulegen, damit dieses nicht die Funktion einer Glühwendel bzw. sogar einer Schmelzsicherung übernimmt. Solche Effekte weisen auf einen zu geringen Querschnitt des Drahtes hin.

Danach läßt sich durch Umstellen der Gleichung

$$R = \frac{\varrho \cdot l}{A} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

die Länge des Widerstandsdrahtes

$$l = \frac{R \cdot A}{\varrho} \quad (\text{Gl. 2.3})$$

ermitteln und damit der Nebenwiderstand exakt einstellen.

Geeignet für die Strommessung von Gleichströmen sind z.B. Drehspulmeßwerke. Sie werden u. a. in Vielfachmeßgeräten eingesetzt. Für die Messung von Wechselströmen werden sie mit zusätzlichen Bauelementen ausgestattet. Zur Effektivwertmessung von Wechselgrößen sind auch Dreheisenmeßwerke geeignet.

2.2 Spannungsmessung

Mittels Spannungsmessern wird die an einem elektrischen Verbraucher anliegende bzw. durch eine Spannungsquelle bereitgestellte elektrische Spannung in ihrer Höhe festgestellt.

Diese Spannungsmesser besitzen einen hohen Innenwiderstand. Sie werden parallel zur Spannungsquelle bzw. zum Verbraucher geschaltet (Bild 2.2). Im ersten Fall läßt sich die Speisespannung der Anlage ermitteln. Bei Anschluß am Verbraucher wird die an ihm anliegende Spannung festgestellt. Für die Messung sind ebenfalls Drehspul- bzw. Dreheisenmeßwerke geeignet. Bei elektronischen Vielfachmessern wird dem Meßwerk zur Erhöhung des Innenwiderstandes ein **Meßverstärker** vorgeschaltet.

Die Erweiterung des Meßbereiches ist bei Spannungsmessern durch Einbau von Vorwiderständen (R_V) problemlos möglich. Auch hier ist eine Dimensionierung des Vorwiderstandes notwendig. Dafür ist Gleichung 2.4 anzuwenden.

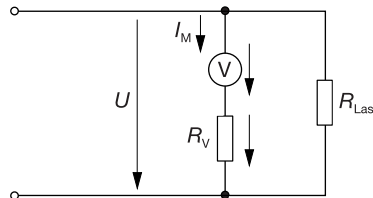
$$R_V = \frac{U}{I_M} - R_i \quad (\text{Gl. 2.4})$$

Herkömmliche anzeigende Spannungsmesser verursachen bei der Messung einen kleinen fließenden Strom (Meßwerkstrom), der bei hochohmigen Spannungsquellen zu einer Verfälschung der Anzeige führt. Durch die Belastung der Quelle mit dem Meßgerät kommt es an dem Innenwiderstand der Quelle zu einem Spannungsabfall, der durch den Innenwiderstand selbst und dem fließenden Strom bestimmt wird. Damit kann an den Anschlußklemmen der Spannungsquelle nie die tatsächlich entstandene Spannung gemessen werden. Bei heutigen Spannungsmessern setzt man elektronische Verstärker mit hohen Eingangswiderständen ein, um den fließenden Meßstrom gegen null gehen zu lassen.

Eine andere Variante für die Messung von Gleichspannungen ohne größeren Aufwand stellt die Spannungskompensation dar. Bei diesem Verfahren wird der fließende Strom im Meßkreis auf null gebracht.

**Spannungs-
kompensation**

Bild 2.2
Schaltung eines Spannungsmessers mit
Vorwiderstand



Dazu wird der unbekannt, zu messenden Spannung eine bekannte Referenzspannung entgegengeschaltet. Diese Referenzspannung wird nun so lange in ihrer Höhe variiert, bis an dem eingebauten Galvanometer kein Ausschlag mehr vorhanden ist. Der fließende Strom ist somit Null, und die unbekannte Spannung ist gleich groß der eingestellten Referenzspannung.

Anwendung findet dieses Verfahren beispielsweise bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen in Form von Motorkompensatoren. Typische Anwendungsschaltungen für die Spannungskompensation sind der Poggendorf-Kompensator (Bild 2.3) bzw. der Lindeck-Rothe-Kompensator (Bild 2.4). Sie unterscheiden sich nur in der Bereitstellung der veränderlichen **Referenzspannung**. Sie erfolgt beim Poggendorf-Kompensator über ein Potentiometer. Die zu messende Spannung beträgt bei Nullabgleich am Galvanometer dann

$$U_X = \frac{U_{\text{Ref}} \cdot R_1}{R_{\text{ges}}} \quad (\text{Gl. 2.5})$$

Beim **Lindeck-Rothe-Kompensator** wird die veränderliche Referenzspannung durch einen mit Widerstand R_a veränderlichen Strom erzeugt, der durch den Normalwiderstand R_N fließt und darüber einen Spannungsabfall hervorruft. Der Strom wird mit einem hochgenauen Strommesser erfasst und daraus die zu messende Spannung errechnet:

$$U_X = U_{RN} = R_N \cdot I \quad (\text{Gl. 2.6})$$

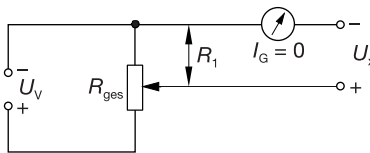


Bild 2.3
Poggendorf-Kompensator

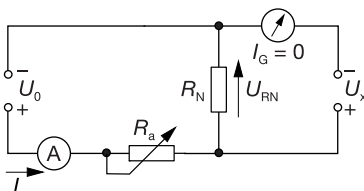


Bild 2.4
Lindeck-Rothe-Kompensator

2.3 Widerstandsmessung

Elektrische Widerstände spielen in der Meßtechnik eine nicht unerhebliche Rolle. Die Ermittlung der Widerstände ist für die Inbetriebnahme vieler Verfahren als auch die Überprüfung im Fehlerfalle unerlässlich. So können auf einfache Weise Unterbrechungen von Fernleitungen (Widerstand geht gegen unendlich) bzw. Kurzschlüsse der Leitungen (Widerstand nimmt sehr, sehr kleine Werte an) ermittelt werden.

2.3.1 Indirekte Messung

Um den Widerstand R nach dem Ohmschen Gesetz ermitteln zu können, sind eine Strom- und eine Spannungsmessung notwendig. Mit der Strommessung wird der durch den unbekanntem Widerstand fließende Strom ermittelt. Der Spannungsmesser ermöglicht die Bestimmung des Spannungsabfalles am Widerstand. Je nach Größe des unbekanntem Widerstandes kommt dabei die spannungsrichtige bzw. stromrichtige Schaltung (Bild 2.5) zur Anwendung, da es durch die Meßgeräte selbst zur Beeinflussung der Meßwerte kommt.

2.3.2 Direkte Messung

Einfacher ist die Handhabung der **Ohmmeter**, die in den Vielfachmeßgeräten integriert sind.

Das Reihenohmmeter eignet sich beispielsweise für die vielfältigsten Anwendungen, d. h. für Widerstandswerte von ca. 200Ω bis zum $M\Omega$ -Bereich. Das Prinzipschaltbild ist in Bild 2.6 dargestellt. Das Meßgerät selbst fungiert dabei eigentlich als Strommesser. Zum Betrieb ist das Vorhandensein einer Spannungsquelle unerlässlich. Durch eine Prüftaste wird zu Beginn der Messung der Meßanschluß überbrückt und mit dem

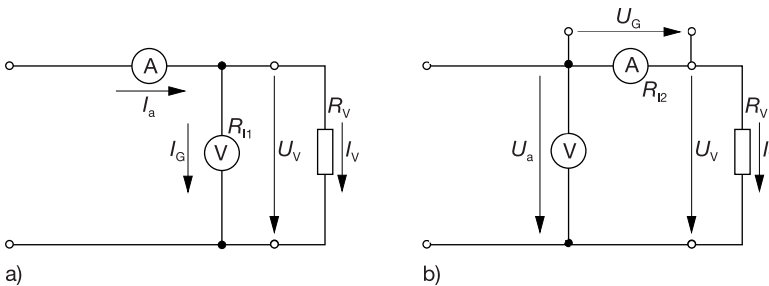


Bild 2.5
Spannungs- und stromrichtige Schaltung

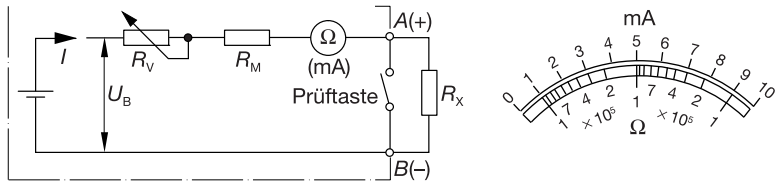


Bild 2.6 Reihenohmmeter; U_B Betriebsspannung der Batterie; R_V Vorwiderstand zum Nullabgleich; R_M Widerstand des Meßgerätes; R_X Widerstand des Prüflings

veränderlichen Widerstand R_V das Meßwerk auf Vollausschlag eingestellt. Dabei fließt I_{max} , und der am Meßgerät angezeigte Widerstandswert ist Null. Die Prüftaste wird im Anschluß freigegeben und der zu messende Widerstand statt dessen angeschlossen. Damit geht der fließende Strom zurück, und an der Ohm-Skala kann der gesuchte Wert direkt abgelesen werden.

Parallelohmometer

Problematisch wird die Messung kleiner Widerstände. Hierfür verwendet man eher das Parallelohmometer (Bild 2.7). Dabei arbeitet das Meßwerk eigentlich als Spannungsmesser, der den Spannungsabfall am unbekanntem Widerstand erfaßt und an einer ohmgeteilten Skala dann den Widerstand zur Anzeige bringt.

Die hier aufgeführten Ohmmeter besitzen eine nichtlineare Skalenteilung, die sich zum Ende hin verdichtet. Eine Nutzung für genaue Messungen ist damit nur in einem Teilbereich sinnvoll.

Wheatstone-Meßbrücke

Zur genauen Bestimmung unbekannter Widerstände ist daher am ehesten die Wheatstone-Meßbrücke geeignet. Bild 2.8 stellt den Aufbau

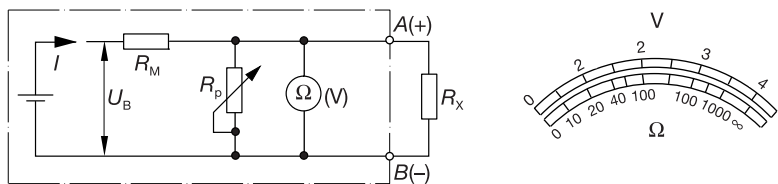


Bild 2.7 Parallelohmometer; U_B Betriebsspannung der Batterie; R_M Vorwiderstand; R_P veränderlicher Parallel- bzw. Nebenwiderstand; R_X Widerstand des Prüflings

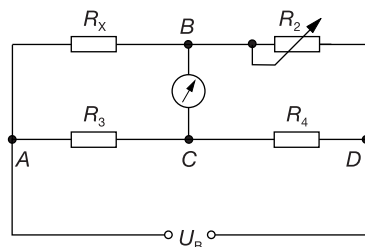


Bild 2.8 Wheatstone-Brücke

der Brücke dar. Sie besteht aus zwei Brückenzeigen, in denen jeweils zwei Widerstände eingebaut sind. Im Querzweig (Anschlüsse B und C) befindet sich ein empfindliches Meßwerk (Galvanometer), das als Nullindikator arbeitet. Im oberen Brückenzeig befinden sich der zu bestimmende Widerstand R_x und ein veränderlicher Widerstand R_2 . Im unteren Brückenzeig befinden sich zwei feste Widerstände. Der Anschluß einer Spannungsquelle ist für die Durchführung der Messung erforderlich.

Nach Anschluß des zu messenden Widerstandes an die Brücke und dem Zuschalten der Spannungsquelle wird der Widerstand R_2 so lange verstellt, bis am Galvanometer Nullausschlag erkennbar ist. Die Brücke ist nunmehr abgeglichen, und es gilt Gleichung 2.7 für die Bestimmung des gesuchten Widerstandes. Der Wert für R_2 kann dabei an der an ihm angebrachten Skala abgelesen werden.

$$R_x = \frac{R_3}{R_4} \cdot R_2 \quad (\text{Gl. 2.7})$$

Mit Wheatstone-Brücken können Widerstandswerte im Bereich von wenigen Ohm bis zu mehreren Megaohm ermittelt werden.

Brückenschaltungen (Bild 2.9) als solche finden in etwas abgewandelter Form auch noch bei anderen Messungen Anwendung (vgl. dazu z.B. auch Abschnitt 3.1). Sie dienen der Auswertung von Widerstandsänderungen, hervorgerufen bei Widerstandsthermometern, Dehnmeßstreifen oder ähnlichem. Man bezeichnet die Anwendung hier auch als Ausschlagverfahren, da zu Beginn der Messung (Ruhelage, Anfangszustand) die Brücke abgeglichen vorliegt und durch die Widerstandsänderung der Fühler verstimmt wird. Als Folge schlägt das Meßgerät im Brückenquerzweig aus.

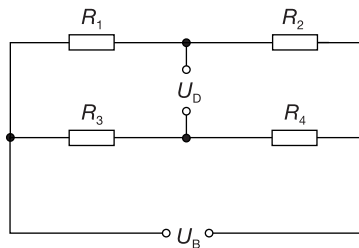
Je nachdem, wie viele der Brückenwiderstände als Meßfühler ausgelegt sind, erfolgt die Bezeichnung als Viertel-, Halb- oder Vollbrücke.

Bei der Messung mit der Viertelbrücke wird nur der Widerstand R_1 durch die Meßgröße geändert. Diese Meßschaltung hat die geringste

Ausschlagverfahren

Viertelbrücke

Bild 2.9
Brückenschaltung



Empfindlichkeit und besitzt für größere relative Widerstandsänderungen eine Linearitätsabweichung.

Halbbrücke In der Halbbrücke werden die Widerstände R_1 und R_2 gegenseitig geändert. Damit verdoppelt sich die Empfindlichkeit, und die Kennlinie wird linear.

Vollbrücke Bei der Vollbrücke werden alle vier Widerstände als Meßfühler ausgelegt. Sie verhalten sich in der Widerstandsänderung gegensinnig. R_1 und R_4 vergrößern sich, während R_2 und R_3 sich verkleinern. Somit erreicht man nochmals eine Verdopplung der Empfindlichkeit, wenn alle vier Widerstände den gleichen Grundwert besitzen.

2.4 Analog-Digital-/Digital-Analog-Umsetzung

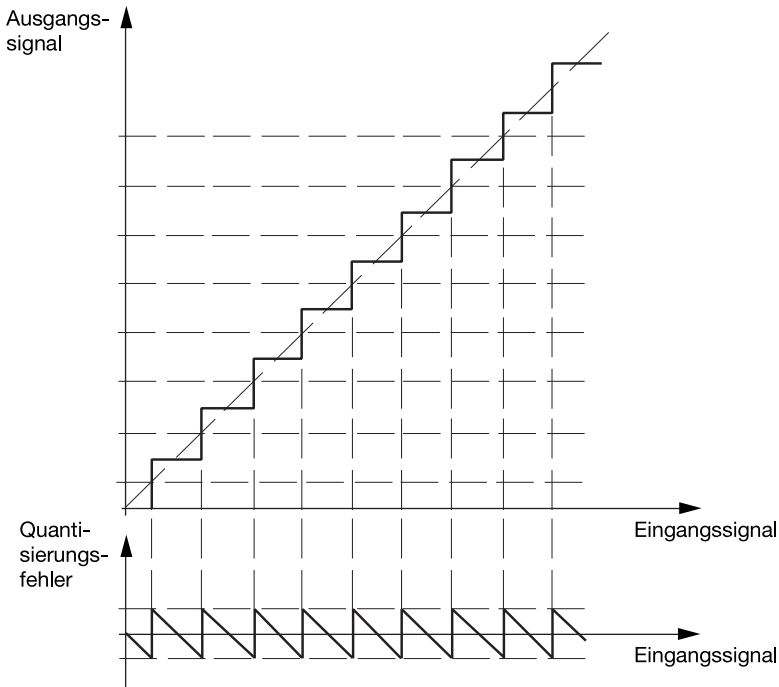
Infolge der rasanten Entwicklung in der Halbleitertechnik und der damit verbundenen Kostenreduzierung verdrängen Digitalmeßgeräte die elektromechanischen Geräte in der Meßtechnik zunehmend. Der Einsatz von Mikroprozessoren erlaubt außerdem auf kleinstem Raum Meßfunktionen zu realisieren, die in früheren Jahren nur teuren und großen Laboreinrichtungen vorbehalten waren. Auch in der Steuerungs- und Regelungstechnik haben Steuer- und Regelgeräte auf Basis von Mikrorechnern Einzug gehalten und lösen die herkömmlichen Gerätschaften ab (vgl. Abschnitt 10.11).

Meßfühler bzw. Meßumformer liefern in den meisten Fällen analoge Signale der Prozeßgrößen. Diese Signale können im gesamten genutzten Bereich unendlich viele Werte annehmen (siehe auch Definition in DIN IEC 60 050-351).

Digitalgeräte benötigen jedoch Signale, die im gesamten Bereich nur eine endliche Anzahl von Werten annehmen können. Es muß also ein Analog-Digital-Umsetzer zwischengeschaltet werden. Das Ausgangssignal des **1** ADU kann nur die durch die Stufen vorgegebenen Werte annehmen, Zwischenwerte sind nicht möglich. Der Übergang von einer zur nächsten Stufe findet immer dann statt, wenn das Eingangssignal eine der Schwellen überschreitet (Bild 2.10). Werden entsprechend viele Stufen durch den ADU realisiert (man spricht auch von der Auflösung eines ADU), erreicht man Genauigkeiten, die mit einer analogen Meßwertverarbeitung nicht machbar sind. Der Prozeß der Quantisierung kann dabei nach verschiedenen Verfahren erfolgen, die hier aber nicht weiter vorgestellt werden sollen (für Interessierte sei auf [1] verwiesen). Diese ADU sind bei Digitalmeßgeräten im Gerät enthalten. Bei digitalen Steuerungs- und Regelungseinrichtungen werden sie häufig als Zusatzbaugruppen (Eingangsbaugruppen) eingesetzt.

1
Analog-Digital-
Umsetzer

Bild 2.10
Kennlinie eines ADU



Soll nun als Ergebnis der Steuerung bzw. Regelung wieder in den Prozeß eingegriffen werden, so müssen die digitalen Ausgangssignale der Steuer- und Regelbaugruppen ebenfalls den Anforderungen der Stellglieder angepaßt werden. Diesmal sind die digitalen Signale in analoge umzuwandeln, diese Baugruppen tragen daher den Namen Digital-Analog-Umsetzer. Auch ② DAU sind in den Geräten bereits integriert bzw. als Zusatzbaugruppen verfügbar. Verfahren zur Umsetzung sind ebenfalls in [1] erläutert.

② *Digital-Analog-Umsetzer*

3 Messen nichtelektrischer Größen

- Temperaturmessung
- Druckmessung
- Feuchtemessung
- Mengen- und Durchflußmessung
- Wärmemengenmessung
- Schallpegelmessung

3.1 Temperaturmessung

Die Temperatur stellt eine der wichtigsten Basisgrößen in der Versorgungstechnik dar. Um die Werte in ihrer Höhe exakt bestimmen zu können, werden Skalen verwendet, deren Teilung sich an natürlichen Fixpunkten orientiert. Für die in Europa verwendete **Celsius-Skala** sind diese Fixpunkte der Gefrierpunkt bzw. der Siedepunkt von Wasser bei 1013 mbar Luftdruck.

Für die Temperaturmessung werden verschiedene Prinzipien genutzt, mit denen sich die Temperaturfühler in entsprechende Kategorien einteilen lassen.

Hinweise für die zweckmäßige Durchführung von Temperaturmessungen sind außerdem in der Richtlinie VDI/VDE 3511 zu finden.

3.1.1 Mechanische Berührungsthermometer

Als Berührungsthermometer werden alle diejenigen Thermometer bezeichnet, die in einem direkten Kontakt mit dem Meßobjekt stehen. Bei den folgend aufgeführten Prinzipien werden mechanische Vorgänge, wie z. B. Längenänderung, genutzt.

Ausdehnungsthermometer

Das Flüssigkeits-Ausdehnungsthermometer (Bild 3.1) nutzt die Volumenänderung einer Meßflüssigkeit bei Temperaturänderung. Es werden solche Flüssigkeiten gewählt, die sich bei Temperaturanstieg so stark

Flüssigkeits-Ausdehnungsthermometer

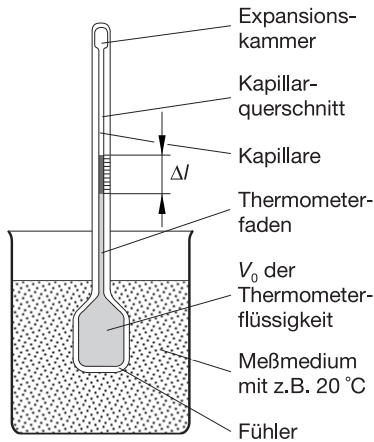


Bild 3.1
Aufbau eines Flüssigkeitsthermometers

ausdehnen, daß mit einfachen Mitteln an einer Vergleichsskala der genaue Wert abgelesen werden kann. Dabei nutzt man extrem dünne Kapillaren, die eine hohe Füllhöhenänderung hervorrufen und damit eine gute Ablesbarkeit gewährleisten.

Als Füllung werden verschiedene Stoffe eingesetzt. Das am häufigsten vorkommende Thermometer ist das **Quecksilber-Glasthermometer**. Damit sind Meßbereiche von ca. -40 °C bis etwa 300 °C möglich. Spezialausführungen (z. B. Quarzglasausführungen) erlauben Bereiche bis 800 °C . Andere Thermometer enthalten gefärbten Alkohol, Toluol u. a. als Meßflüssigkeit. Damit sind Temperaturmessungen auch unterhalb von -40 °C möglich (Tabelle 3.1).

Flüssigkeits-Ausdehnungsthermometer werden z. B. als Maschinenthermometer mit Einschraubstutzen bzw. Überwurfmutter angebo-

Tabelle 3.1 Gebräuchliche Temperaturmeßgeräte

Thermometerart	Nutzbarer Meßbereich	Bemerkung
Alkohol-Glasthermometer	ca. $-150 \dots 220\text{ °C}$	
Quecksilber-Glasthermometer	ca. $-50 \dots 800\text{ °C}$	Teilweise Spezialgläser
Dampfdruck- Federthermometer	ca. $-60 \dots 350\text{ °C}$	
Flüssigkeits-Federthermometer	ca. $-50 \dots 500\text{ °C}$	
Stabausdehnungsthermometer	ca. $-0 \dots 1000\text{ °C}$	
Bimetallthermometer	ca. $-70 \dots 400\text{ °C}$	
Pt-Widerstandsthermometer	ca. $-200 \dots 850\text{ °C}$	
Ni-Widerstandsthermometer	ca. $-80 \dots 50\text{ °C}$	
Thermistoren	ca. $-40 \dots 20\text{ °C}$	
Thermoelemente	ca. $0 \dots 1500\text{ °C}$	Je nach Thermopaar nur eingeschränkte Bereiche
Infrarot-Temperaturmessung	ca. $-50 \dots 4000\text{ °C}$	Je nach Ausführungstyp