



Wolfgang Helbig

Praxiswissen in der Messtechnik

Arbeitsbuch für Techniker,
Ingenieure und Studenten

 Springer Vieweg

Praxiswissen in der Messtechnik

Wolfgang Helbig

Praxiswissen in der Messtechnik

Arbeitsbuch für Techniker, Ingenieure und
Studenten

Wolfgang Helbig
Dresden, Deutschland

ISBN 978-3-658-27801-4 ISBN 978-3-658-27802-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-27802-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Reinhard Dapper

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die Idee zu diesem Fachbuch ist durch meine langjährige Tätigkeit als DKD- und später DAkS-Stellen-Leiter sowie als Gastdozent in vielen großen Unternehmen entstanden.

Meine Vorträge zu messtechnischen Problemen wurden sehr oft mit einem Praktikum für alle Seminarteilnehmer abgeschlossen. Dadurch konnte ich mir einen umfangreichen Überblick zu den am häufigsten begangenen Fehlern in der Messtechnik verschaffen.

Der Schwerpunkt meiner Arbeit als Gastdozent richtete sich auf eine genaue Analyse der Messaufgabe sowie eine effektive und normgerechte Bearbeitung mit anschließender Fehlerbetrachtung und Auswertung. Viele und sehr oft gestellte Fragen der Praktiker habe ich durch einen Praxisbezug in meinem Buch aufgenommen.

In vielen Fachbüchern werden Gebiete der Messtechnik oder Datenverarbeitung für den Praktiker schwer lesbar beschrieben. Deshalb habe ich beschlossen, eine didaktisch ansprechende Darstellung zu schreiben. Mein Hauptanliegen ist es, dem Anwender des Buches durch Aufzeigen eines systematisch gegliederten Lösungsweges das Bearbeiten messtechnischer Aufgaben in vielen Gebieten zu erleichtern.

Dieses Fachbuch ist so aufgebaut, dass vorerst die wichtigsten Grundbegriffe der Messtechnik sowie der Signalarten und Darstellungsverfahren erläutert werden. Zum besseren Verständnis der oft sehr komplexen Messaufgaben werden im ersten Kapitel die wichtigsten Fachausdrücke aus der Messtechnik normgerecht erklärt.

Einen breiten Raum nehmen die Auswirkungen des neuen SI-Einheitensystems ein, welches sich auf physikalische Fundamentalkonstanten bezieht. In diesem Buch findet der Leser viele Hinweise für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Messungen, wobei besonderer Wert auf eine umfangreiche Fehleranalyse gelegt wurde.

Anhand der Lösungsansätze sowie der ausführlichen Beispiele kann der Leser die Richtigkeit seiner eigenen Ergebnisse nachprüfen und die gewonnenen Erkenntnisse auf ähnlich gelagerte Messaufgaben übertragen.

Gegenstand der weiteren Hauptabschnitte ist die Beschreibung der Messgeräte, des Zubehörs sowie der Aufbau und die Wirkungsweise von oft in der Messtechnik verwendeten Sensoren.

Häufige Störeinflüsse auf den Messprozess durch unterschiedliche Einkopplungsarten werden analysiert und Lösungsvorschläge zur Verringerung oder Beseitigung angeboten.

Für die Realisierung von Automatisierungslösungen werden unterschiedliche Übertragungsarten und Maßnahmen zur Datensicherheit vorgestellt.

Prüfprozesse können nur mit einem gut organisierten Prüfmittelmanagement beherrscht werden. Die Inhalte des Prüfmittelmanagements von der Prüfmittelbeschaffung bis zur Prüfmittelüberwachung mit DAkkS-Kalibrierschein werden normgerecht dargestellt und bewertet.

Die Fülle messtechnischer Problemstellungen machte in einigen Kapiteln eine Beschränkung und Auswahl auf typische und häufig wiederkehrende Anwendungsfälle erforderlich.

Der Inhalt dieses Fachbuches ist vorwiegend für Techniker und Ingenieure zur Weiterbildung sowie für Studenten in technischen Fachrichtungen geeignet.

Mein besonderer Dank gilt Frau Martina Börnig für die Unterstützung bei der Korrektur des Buches sowie bei der Gestaltung von Bildern.

Frau Sibylle Englert von der FES GmbH danke ich für die Bereitstellung von VDI/VDE/DGQ-Richtlinien sowie für die Erstellung der DAkkS-Kalibrierscheine.

Wolfgang Helbig

Inhaltsverzeichnis

1 Grundbegriffe in der Messtechnik	1
1.1 Messgrößen und Messsysteme	1
1.1.1 Rückwirkungen in Messsystemen	2
1.1.2 Wechselwirkungen in der Systemtechnik	4
1.2 Erfassen einer Messgröße	5
1.2.1 Konkretisierung der Messaufgabe	5
1.2.2 Einteilung der verschiedenen Messverfahren	6
1.2.3 Analoge Messmethoden	6
1.3 Signale für den Informationsaustausch	10
1.3.1 Begriffsbestimmung und Übersicht	10
1.3.2 Signalarten (Hauptgruppen)	11
1.3.3 Messsignalumformung	11
1.4 Messwertverarbeitung und Ausgabe der Messwerte	14
1.4.1 Allgemeines	14
1.4.2 Messdatenverarbeitung	15
1.5 Grundbegriffe in der Messtechnik	15
1.5.1 Zusammenstellung von messtechnischen Begriffen	15
2 Das neue Internationale Einheitensystem (SI)	25
2.1 Begriffserklärung	25
2.2 SI-Basiseinheiten	26
2.2.1 SI-Vorsätze für Maßeinheiten	27
2.2.2 Abgeleitete SI-Einheiten	28
2.2.3 Einheiten für Verhältnisgrößen	32
2.3 Vorbereitung der Einführung des „revidierten SI“	33
2.3.1 Naturkonstanten zur Darstellung der Einheiten	33
2.3.2 Auswirkungen auf die Messung elektrischer Größen	33
2.3.3 Überblick über die Neudefinition der SI-Basiseinheiten	34

3	Elementare Fehlerrechnung	41
3.1	Definition des Messfehlers	41
3.2	Fehlerarten	42
3.2.1	Systematische Fehler	43
3.2.2	Zufällige Fehler	43
3.3	Wahrscheinlichkeitsverteilungen	43
3.3.1	Verteilungsarten	44
3.4	Rechnerische Erfassung zufälliger Fehler	46
3.5	Praxisgerechte Ermittlung der Messfehler	49
4	Vorbereitung, Ausführung und Auswertung von Messaufgaben mit analogen und digitalen Messgeräten	55
4.1	Aufgaben und Ziele des Qualitätsmanagements	56
4.2	Auswahl, Beschaffung und Einteilung der Mess- und Prüfmittel	56
4.2.1	Vorbereitung der Messaufgabe durch Optimierung der Prüfmittel	57
4.2.2	Einteilung der Messgeräte	57
4.3	Fehlerkenngrößen für Messgeräte	61
4.3.1	Bewertungskriterien des statischen Verhaltens für Mess- und Prüfgeräte	62
4.3.2	Messbereichserweiterung – Spannungsmessung	65
4.3.3	Messbereichserweiterung – Strommessung	66
4.4	Digitale Messwertverarbeitung	66
4.4.1	Digitale Signale	66
4.4.2	Messprinzip	67
4.4.3	Weitere Verfahren	68
4.5	Digitalmultimeter	68
4.5.1	Allgemeines	68
4.5.2	Funktionsprinzip	69
4.5.3	Anwendungsgebiet	70
4.5.4	Zusatzfehler und Herkunftsbereiche in der digitalen Messtechnik	70
4.6	Messung von Gleich- und Wechselgrößen	75
4.6.1	Messtechnische Hinweise zur Messung von Gleichspannung und Gleichstrom	75
4.6.2	Kenngrößen sinusförmiger Wechselgrößen	76
4.6.3	Präzise Messung von Wechselspannung und Wechselstrom	78
4.6.4	Messtechnische Hinweise zur Bestimmung von Wechselgrößen	78
4.6.5	Digitale Widerstandsmessung	79

5 Sensoren zur Sicherstellung geeigneter Umgebungsbedingungen für Messprozesse	81
5.1 Einflussfaktoren auf den Messprozess	82
5.2 Wechselwirkung zwischen Messobjekt und Messgerät	82
5.3 Einfluss von Temperatur, Strömung und Feuchte auf den Messprozess	83
5.4 Wandlung nichtelektrischer in elektrische Größen	84
5.5 Sensorelemente für die Temperaturmessung	85
5.5.1 Konventionelle Ausführungsformen der Widerstandsthermometer	85
5.5.2 Physikalische Grundlagen	86
5.5.3 Genauigkeitsklassen für Widerstandsthermometer	87
5.5.4 Thermoelemente	87
5.5.5 NTC-Widerstände (Heißeleiter)	90
5.5.6 Feuchtesensoren	92
5.5.7 Strömungssensoren	95
6 Störeinflüsse auf Messstromkreise und in der Datenübertragung	97
6.1 Allgemeines	97
6.2 Einkopplungsarten auf elektrische und elektronische Stromkreise	98
6.2.1 Galvanische Kopplung	99
6.2.2 Kapazitive Kopplung	99
6.2.3 Induktive Kopplung	101
6.2.4 Wellen- und Strahlungsbeeinflussung	102
6.3 Störspannungsunterdrückung	102
6.3.1 Gleichtakt- und Gegentaktstörungen	102
6.3.2 Gleichtakt-Gegentakt-Umwandlung	104
6.3.3 Störeinflüsse auf Leitungen	106
7 Datenübertragung in der Messtechnik	107
7.1 Allgemeines	107
7.2 Digitale Schnittstellen zur Datenübertragung	108
7.2.1 Serielle Schnittstellen	109
7.2.2 Parallele Schnittstellen	110
7.3 Störfaktoren	110
7.3.1 Störfaktoren von außen	110
7.3.2 Störfaktoren von innen	111
7.4 Datenfernübertragung	111
7.5 Datensicherung im Messwesen	112
7.5.1 Schutz der Messdaten	112
7.5.2 Verfahren zur Fehlererkennung	113
7.5.3 Datensicherung bei Programmunterbrechungen	115

8 Wichtige Elemente des Prüfmittelmanagements zur Sicherstellung von Produkt- und Prozessqualität	117
8.1 QM-Elemente in der Überwachungsphase	117
8.1.1 Referenzbedingungen für Mess- und Prüfräume	118
8.1.2 Prüfräume für Kalibrieraufgaben	119
8.2 Dokumentation und Auswertung von Messergebnissen	121
8.2.1 Dokumentation	121
8.3 Auswertung der Gesamtmessunsicherheit	122
8.3.1 Erweiterte Messunsicherheit	122
8.3.2 Kalibrierscheine (2 Beispiele aus der Praxis)	123
8.4 Die Behandlung fehlerhafter Prüfmittel	134
8.5 Durch Automatisierungslösungen zu höherer Effektivität und Genauigkeit in der Messtechnik	136
8.5.1 Qualitätsmanagement in der heutigen Praxis	136
8.5.2 Anforderungen und Ziele für die Zukunft	136
Literatur	139
Stichwortverzeichnis	141

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Messsystem – Blockschema	2
Abb. 1.2	Rückwirkung in der Messtechnik	3
Abb. 1.3	Rückwirkung durch Wärmeableitung	4
Abb. 1.4	Einfluss von Wechselwirkungen auf das Messgerät	4
Abb. 1.5	Kontinuierliche Messmethoden	7
Abb. 1.6	Spannungskompensator für Gleichstrom (Poggendorf-Kompensator)	8
Abb. 1.7	Stromkompensator für Gleichstrom	8
Abb. 1.8	Analoges Signal. a) kontinuierlich, b) diskontinuierlich	10
Abb. 1.9	Arten der determinierten Signale	11
Abb. 1.10	Beispiele für Signalformen ($A \hat{=}$ Amplitude, $t \hat{=}$ Zeit, $I \hat{=}$ Informationsparameter)	13
Abb. 2.1	Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagessehen $V(\lambda)$ in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ	38
Abb. 3.1	Übersicht über Messfehlerarten (nach Ursache und Bearbeitung)	42
Abb. 3.2	Gaußsche Verteilungskurve	44
Abb. 3.3	Auswertung der Messwerte	52
Abb. 4.1	Optimierung der Prüfmittelauswahl	58
Abb. 4.2	Dreheisenmesswerk (Rundspulausführung)	59
Abb. 4.3	Drehspulmesswerk (Außenmagnetausführung). 1 Eisenkern, 2 Polschuhe, 3 Dauermagnet	60
Abb. 4.4	Elektrodynamisches Messwerk (eisengeschlossen)	60
Abb. 4.5	Spannungsmessbereichserweiterung	65
Abb. 4.6	Strommessbereichserweiterung	66
Abb. 4.7	Prinzipschaltbild für Mehrfach-Rampen-Verfahren: 1 – Integrationsverstärker, 2 – Komparator, 3 – Eingangs-Ausgangs- Signalverknüpfung, 4 – Referenzspannungsquelle.	67
Abb. 4.8	Ausgangssignal am Integrator	67
Abb. 4.9	Digitalmultimeter (Grundstruktur)	69

Abb. 4.10	Zählfehler (digitaler Restfehler) bei konstanter Messzeit t_m	71
Abb. 4.11	Ursache für nichtideale Gleichtaktunterdrückung	72
Abb. 4.12	Wechselspannung und Wechselstrom	76
Abb. 5.1	Wechselwirkung zwischen Messobjekt und Messgerät	83
Abb. 5.2	Einflussfaktoren auf den Messprozess	83
Abb. 5.3	Messeffekte zur Wandlung nichtelektrischer in elektrische Größen . . .	84
Abb. 5.4	Aufbau der Widerstandsthermometer	85
Abb. 5.5	Ausführungsform für einen Pt-100-Fühler	85
Abb. 5.6	Aufbau der Thermoelemente	87
Abb. 5.7	Anschlussstellen für Thermoelemente	90
Abb. 5.8	Widerstandsänderung eines NTC-Widerstandes	92
Abb. 5.9	Aufbau eines Feuchtesensors	93
Abb. 5.10	Einflussfaktoren auf die Sensorkennlinie	94
Abb. 5.11	Aufbau des Sensors und Auswertung der Querempfindlichkeit im Kennlinienfeld	95
Abb. 5.12	Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit einem Konstant- Temperatur-Anemometer	96
Abb. 6.1	Darstellung der wichtigsten Koppelmechanismen von elektrischen und elektronischen Stromkreisen	98
Abb. 6.2	Galvanische Kopplung	99
Abb. 6.3	Kapazitive Kopplung	99
Abb. 6.4	Beeinflussung zweier Stromkreise. 1 = störendes System, 2 = gestörtes System	100
Abb. 6.5	Störfrequenzunterdrückung. 1 = störendes System, 2 = gestörtes System, Frequenzbereich beachten	100
Abb. 6.6	Induktive Kopplung zwischen stromdurchflossenen Leiterschleifen . . .	101
Abb. 6.7	Galvanisch getrennte Stromkreise. Modell: Gegeninduktivität	101
Abb. 6.8	Einkopplungsprinzipien	102
Abb. 6.9	Prinzip der Gleichtaktstörung	103
Abb. 6.10	Prinzip der Gegentaktstörung	104
Abb. 6.11	Gleichtakt-Gegentakt-Umwandlung	104
Abb. 6.12	Störbeeinflussung mit geerdeter Messstelle	105
Abb. 8.1	Einflussgrößen auf die Messunsicherheit	120
Abb. 8.2	Muster-Kalibrierschein Multimeter	124
Abb. 8.3	Muster-Kalibrierschein AC Current Clamp	131
Abb. 8.4	Muster einer Fehlermeldekarte für fehlerhafte Prüfmittel	135

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Statistische Sicherheiten mit Vertrauensgrenzen.....	47
Tab. 3.2	Werte für t und t/\sqrt{n} bei verschiedenen Werten des Vertrauensniveaus	48
Tab. 3.3	Messwerte aus Einzelmessungen zur Mittelwertbildung	49
Tab. 3.4	Einzelmesswerte zur Mittelwertbildung	52
Tab. 5.1	Genauigkeitsklassen verschiedener Widerstandsthermometer	87
Tab. 5.2	Empfindlichkeiten verschiedener Metalle gegenüber Platin	89
Tab. 5.3	Änderung der Thermospannung bei unterschiedlichen Thermokombinationen	89
Tab. 7.1	Übersicht über die wichtigsten Digitalchnittstellen.....	108
Tab. 7.2	BCD-Code mit Paritätsbit	114
Tab. 8.1	Übersicht Normalklimate	118
Tab. 8.2	Normalklimate mit Grenzabweichungen.....	119



Zusammenfassung

Messen ist die quantitative Bestimmung von Größen, wobei genormte Grundbegriffe und Grundstrukturen zur Anwendung kommen. Nach Konkretisierung der Messaufgabe erfolgt die Auswahl geeigneter Messverfahren sowie Messmethoden, um ein optimales Messergebnis zu erhalten. Dabei werden Rückwirkungen und Wechselwirkungen in Messsystemen betrachtet. Für den Informationsaustausch werden unterschiedliche Signalarten benötigt, welche in einer Übersicht dargestellt sind. Die meisten Messsignale können nicht direkt weiterverarbeitet werden, sodass eine Signalumformung erfolgen muss. Anschließend werden die Hauptgebiete der Messwertverarbeitung erläutert, welche sich in Messwerterfassung, Messdatenverarbeitung und Messwertausgabe gliedern. Zum besseren Verständnis aller Kapitel erfolgt eine Zusammenstellung von wichtigen messtechnischen Begriffen.

1.1 Messgrößen und Messsysteme

Das Messen ist eine der wichtigsten Aufgaben in der Wissenschaft, Technik sowie der gesamten Wirtschaft.

Schon sehr früh, zu C. F. Gauß' Zeiten, wusste man sehr genau, dass jede Messung mit Unsicherheiten behaftet ist. Die Ursachen dafür sind zufällige Effekte wie kurzzeitige Änderungen der Umweltbedingungen oder unterschiedliche Einflüsse durch den Beobachter. Jede Messung, auch wenn sie unter gleichen Bedingungen wiederholt wird, zeigt einen unterschiedlichen Anzeigewert.

Viele Ursachen für Messunsicherheiten sind auch systematischer Art und fast immer korrigierbar. Systematische Fehler werden vor allem durch die Drift des Messgerätes

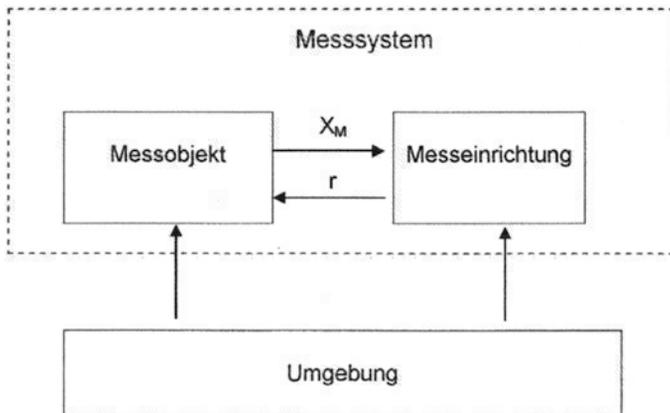


Abb. 1.1 Messsystem – Blockschema

sowie durch die zeitliche Änderung des Bezugsnormals bestimmt. Jedes Bezugsnormal weist auch noch eine Unsicherheit durch die Kalibrierung auf.

Das quantitative Maß für die Qualität einer Messung wird immer durch die Messunsicherheit bestimmt. Auch international nimmt die Bedeutung einer einheitlichen Bewertung der Ergebnisse von Messungen und Prüfungen durch Bestimmung und Angabe der Messunsicherheit stetig zu.

Ergebnisse von Messungen werden in Zukunft nur dann als vergleichbar anerkannt werden, wenn deren Messunsicherheiten auf der Grundlage von international anerkannten Standarddokumenten ermittelt wurden.

Um Präzisionsmessungen nach Standarddokumenten durchführen zu können, ist ein größerer gerätetechnischer Aufwand erforderlich. Dabei bilden viele Baugruppen und Einzelgeräte zusammen ein Messsystem (Abb. 1.1). Zur Bereitstellung der Hilfsenergie, der Signalwandlung und Verstärkung werden zusätzliche Geräte benötigt. Diese Geräte werden unter dem Begriff Messmittel zusammengefasst.

Der Informationsaustausch zwischen Messobjekt und Messeinrichtung erfolgt über Signale. Vom Messobjekt wird in Signalform die Messgröße X_M an die Messeinrichtung gesendet, wobei oft eine Rückwirkung r auf das Messobjekt entsteht. Die Umgebung wirkt auf beide und beeinflusst damit die Messgröße.

1.1.1 Rückwirkungen in Messsystemen

Eine Messwertbildung verläuft nicht nur in eine Richtung, da das Messgerät (Messsystem) bei der Messung mit dem Messobjekt in Wechselwirkung steht.

In vielen Fällen wird dem Messobjekt Energie entzogen, wodurch sich der Wert der Messgröße verändert. Diese Beeinflussung der Messgröße wird als Rückwirkung bezeichnet.

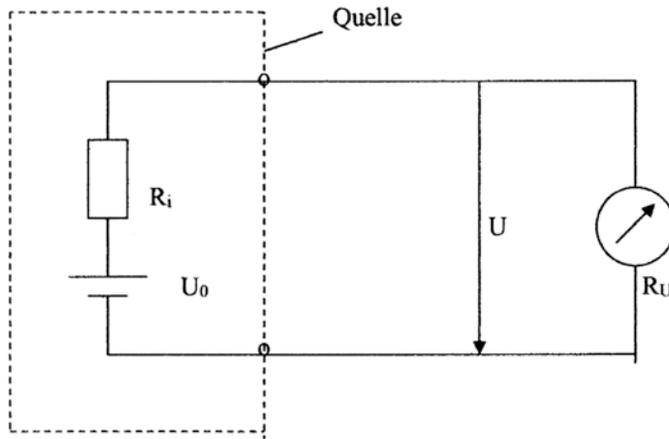


Abb. 1.2 Rückwirkung in der Messtechnik

Beispiel 1

Rückwirkung bei der Spannungsmessung an einer Spannungsquelle (Ausschlagverfahren; Abb. 1.2).

Es soll die Spannung eines galvanischen Elements gemessen werden. Das Spannungsmessgerät hat einen Innenwiderstand von $R_U = 20 \text{ k}\Omega$.

Das galvanische Element hat einen Innenwiderstand von $R_i = 6 \Omega$ bei einer *Leerlaufspannung* $U_0 = 1,55 \text{ V}$.

$$U = \frac{U_0}{1 + \frac{R_i}{R_U}}$$

$$U = \frac{1,55 \text{ V}}{1 + \frac{6 \Omega}{20 \text{ k}\Omega}}$$

$$U = 1,5495 \text{ V}$$

Durch die Rückwirkung wird der Messwert um 0,032 % verringert. In der Praxis kann dieser Fehler in den meisten Fällen vernachlässigt werden. ◀

Praxisbezug: Um den Fehler durch die Rückwirkung gering zu halten, sollte man ein Messgerät mit sehr hohem Innenwiderstand verwenden.