

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



DKD

**Richtlinie
DKD-R 1-1**

**Messung und Erzeugung kleiner
Wechselspannungen mit
induktiven Spannungsteilern**

Ausgabe 09/2018

<https://doi.org/10.7795/550.20180828A>



	<p>Messung und Erzeugung kleiner Wechselspannungen mit induktiven Spannungsteilern</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20180828A</p>	DKD-R 1-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	2/19

Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Im DKD sind Kalibrierlaboratorien von Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen seit der Gründung 1977 zusammengeschlossen. Am 03. Mai 2011 erfolgte die Neugründung des DKD als *technisches Gremium* der PTB und der akkreditierten Laboratorien.

Dieses Gremium trägt die Bezeichnung Deutscher Kalibrierdienst (DKD) und steht unter der Leitung der PTB. Die vom DKD erarbeiteten Richtlinien und Leitfäden stellen den Stand der Technik auf dem jeweiligen technischen Fachgebiet dar und stehen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) für die Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien zur Verfügung. Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden von der DAkkS als Rechtsnachfolgerin des DKD akkreditiert und überwacht. Sie führen Kalibrierungen von Messgeräten und Maßverkörperungen für die bei der Akkreditierung festgelegten Messgrößen und Messbereiche durch. Die von ihnen ausgestellten Kalibrierscheine sind ein Nachweis für die Rückführung auf nationale Normale, wie sie von der Normenfamilie DIN EN ISO 9000 und der DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert wird.

Kontakt:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
DKD-Geschäftsstelle
Bundesallee 100 38116 Braunschweig
Postfach 33 45 38023 Braunschweig
Telefon Sekretariat: (05 31) 5 92-8021
Internet: www.dkd.eu

	Messung und Erzeugung kleiner Wechselspannungen mit induktiven Spannungsteilern https://doi.org/10.7795/550.20180828A		DKD-R 1-1	
			Ausgabe:	09/2018
			Revision:	0
			Seite:	3/19

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 1-1 Messung und Erzeugung kleiner Wechselspannungen mit induktiven Spannungsteilern, Ausgabe 09/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: <https://doi.org/10.7795/550.20180828A>

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt und unterliegt der Creative Commons Nutzerlizenz CC by-nc-nd 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>). In diesem Zusammenhang bedeutet „nicht-kommerziell“ (NC), dass das Werk nicht zum Zwecke der Einnahmenerzielung verbreitet oder öffentlich zugänglich gemacht werden darf. Eine Nutzung seiner Inhalte für die gewerbliche Verwendung in Laboratorien ist ausdrücklich erlaubt.



Autoren der deutschen Fassung:

Mitglieder des Fachausschusses *Gleichstrom und Niederfrequenz* des DKD in der Zeit von 1999 bis 2009.

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für den Deutschen Kalibrierdienst (DKD) als Ergebnis der Zusammenarbeit der PTB mit dem Fachausschuss *Gleichstrom und Niederfrequenz* des DKD.

	Messung und Erzeugung kleiner Wechselspannungen mit induktiven Spannungsteilern https://doi.org/10.7795/550.20180828A	DKD-R 1-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	4/19

Deutsche Fassung der Publikation EA-10/09 (EAL-G32), Edition 1, Oktober 1997
„Measurement and Generation of Small AC Voltages with Inductive Voltage Dividers“

Inhaltsverzeichnis	Seite
0 Einleitung	5
1 Geltungsbereich	5
2 Begriffe und Abkürzungen	5
3 Kalibriereinrichtungen	6
4 Vorbereitung für die Kalibrierung	6
5 Beschreibung des Kalibrierverfahrens	6
6 Literatur	19

Vorwort

DKD-Richtlinien sind Anwendungsdokumente zu den Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025. In den Richtlinien werden technische, verfahrensbedingte und organisatorische Abläufe beschrieben, die den akkreditierten Kalibrierlaboratorien als Vorbild zur Festlegung interner Verfahren und Regelungen dienen. DKD-Richtlinien können zum Bestandteil von Qualitätsmanagementhandbüchern der Kalibrierlaboratorien werden. Durch die Umsetzung der Richtlinien wird die Gleichbehandlung der zu kalibrierenden Geräte in den verschiedenen Kalibrierlaboratorien gefördert und die Kontinuität und Überprüfbarkeit der Arbeit der Kalibrierlaboratorien verbessert.

Die DKD-Richtlinien sollen nicht die Weiterentwicklung von Kalibrierverfahren und -abläufen behindern. Abweichungen von Richtlinien und neue Verfahren sind im Einvernehmen mit der Akkreditierungsstelle zulässig, wenn fachliche Gründe dafür sprechen.

Die vorliegende Richtlinie wurde vom Fachausschuss *Gleichstrom und Niederfrequenz* in Zusammenarbeit mit der PTB und akkreditierten Kalibrierlaboratorien bereits 1999 erstellt. Die vorliegende geänderte Neuauflage enthält lediglich ein aktualisiertes Impressum. Sie ist inhaltsgleich mit der DAkkS-DKD-R 1-1 (Ausgabe 2010). Die DAkkS wird die DAkkS-DKD-R 1-1 spätestens zum 01.01.2021 zurückziehen.

Ausgabe: 01/1999, veröffentlicht vom DKD

1. Neuauflage: 08/2002, durch den DKD
2. Neuauflage: 2010, durch die DAkkS
3. Neuauflage: 09/2018, durch den DKD, inhaltsgleich mit der 2. Neuauflage

	Messung und Erzeugung kleiner Wechselfspannungen mit induktiven Spannungsteilern https://doi.org/10.7795/550.20180828A		DKD-R 1-1	
			Ausgabe:	09/2018
			Revision:	0
			Seite:	5/19

0 Einleitung

- 0.1 Die Fachausschüsse der European co-operation for Accreditation (EA) haben u. a. die Aufgabe, technische Richtlinien zu erstellen, die von akkreditierten Kalibrierlaboratorien benutzt werden können. Dadurch wird die Gleichbehandlung der zu kalibrierenden Geräte in den verschiedenen Kalibrierlaboratorien sichergestellt und die Transparenz der Arbeit der Kalibrierlaboratorien verbessert.
- 0.2 Die Richtlinien erheben nicht den Anspruch, alle Einzelheiten der jeweiligen Messgeräte vollständig zu behandeln. Sie wenden sich an Fachleute und legen nur fest, was im Sinne ihrer Zielsetzung notwendig ist. Sie können als interne Verfahrensanweisungen dienen und damit Bestandteil der Qualitätssicherungshandbücher der Kalibrierlaboratorien werden.
- 0.3 Diese Richtlinie behandelt die Erzeugung und Messung kleiner Wechselfspannungen für Kalibrierzwecke mit Hilfe induktiver Spannungsteiler. Sie beschreibt akkreditierfähige Verfahren für die Erzeugung und Messung kleiner Wechselfspannungen.

1 Geltungsbereich

- 1.1 Diese Richtlinie gilt für die Erzeugung und Messung kleiner Wechselfspannungen von 1 mV bis 1 V und in Abhängigkeit vom gewählten Verfahren und von der angewendeten Methode im Frequenzbereich von 50 Hz bis 100 kHz. Die Akkreditierung der Messgröße „Wechselfspannung“ für Spannungen von über 1 V wird vorausgesetzt.
- 1.2 Die Messverfahren und Messmittel, die von dem akkreditierten Laboratorium für die Durchführung der Kalibrierung verwendet werden, müssen so beschaffen sein, dass alle für die Kalibrierung notwendigen Parameter auf die akkreditierten Größen des Laboratoriums rückführbar sind. Die Rückführbarkeit auf nationale Normale sowie die laborspezifischen Messverfahren müssen dokumentiert und nachvollziehbar sein.

2 Begriffe und Abkürzungen

D	Nennwert des Teilungsverhältnisses (Einstellwert)
IVD	induktiver Spannungsteiler
\underline{K}	komplexe Korrektur des Teilungsverhältnisses
K_B	Blindanteil der komplexen Korrektur des Teilungsverhältnisses
K_W	Wirkanteil der komplexen Korrektur des Teilungsverhältnisses
PC	Personal Computer
R_S	Serienwiderstand
\underline{U}_a	komplexe Ausgangsspannung
\underline{U}_e	komplexe Eingangsspannung
\underline{Z}_a	komplexe Ausgangsimpedanz des induktiven Teilers
\underline{Z}_l	komplexe Lastimpedanz

	Messung und Erzeugung kleiner Wechselspannungen mit induktiven Spannungsteilern https://doi.org/10.7795/550.20180828A	DKD-R 1-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	6/19

3 Kalibriereinrichtungen

3.1 Anforderungen an die Kalibriereinrichtungen

3.1.1 Die Kalibrierung ist mit Messeinrichtungen durchzuführen, die durch direkten oder indirekten Vergleich und mit einer bekannten zugehörigen Messunsicherheit auf nationale Normale rückgeführt sind.

3.2 Bezugsbedingungen

3.2.1 Die Kalibrierung von kleinen Wechselspannungen ist unter denselben Bedingungen durchzuführen, unter denen die Kalibrierung des speziellen Messaufbaus vorgenommen wurde.

3.2.2 Vor Beginn der Messungen ist sicherzustellen, dass Einlaufzeiten eingehalten werden, dass sich der Messaufbau im thermischen Gleichgewicht befindet und dass Störfelder – sofern relevant – abgeschirmt werden.

4 Vorbereitung für die Kalibrierung

4.1 Das Messgerät oder -system ist einer Beschaffenheitsprüfung und einer Funktionsprüfung zu unterziehen. Werden dabei Mängel festgestellt, sind diese zu beseitigen. Wenn das nicht möglich ist, ist die Kalibrierung abzulehnen.

5 Beschreibung des Kalibrierverfahrens

5.1 Erzeugung kleiner Wechselspannungen für Kalibrierzwecke mit einem induktiven Spannungsteiler

5.1.1 Geltungsbereich des Verfahrens

5.1.1.1 Unter den beschriebenen Voraussetzungen kann dieses Kalibrierverfahren für die Erzeugung kleiner Wechselspannungen in einem von dem induktiven Teiler vorgegebenen Spannungs- und Frequenzbereich (z.B. 1 mV bis 1 V und 50 Hz bis 1 kHz) in akkreditierten Laboratorien benutzt werden.

5.1.2 Messverfahren

5.1.2.1 Kleine Wechselspannungen können durch Teilung einer bekannten höheren Spannung von z.B. 1 V unter Verwendung eines kalibrierten induktiven Spannungsteilers erzeugt werden. Mit dem Spannungsteiler werden Spannungsverhältnisse auf Windungszahlverhältnisse zurückgeführt.

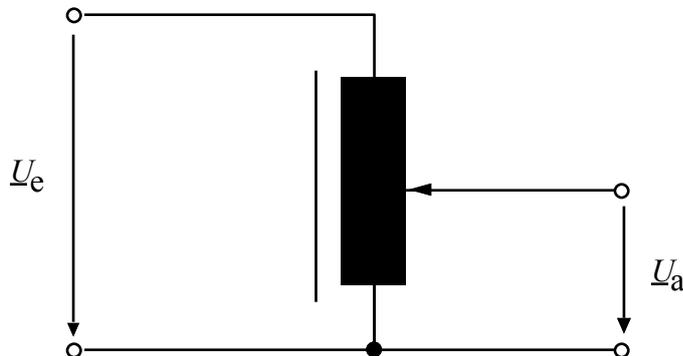


Bild 1: Prinzipschaltbild eines unbelasteten induktiven Spannungsteilers

5.1.2.2 Das komplexe Verhältnis der Ausgangsspannung \underline{U}_a eines unbelasteten induktiven Spannungsteilers zu seiner Eingangsspannung \underline{U}_e ergibt sich aus der Beziehung

$$\underline{U}_a / \underline{U}_e = D + \underline{K} = D + K_W + jK_B \quad (1)$$

Darin ist D der Nennwert des Teilungsverhältnisses. Er wird durch die Schaltereinstellung festgelegt. \underline{K} ist die komplexe Korrektur des Teilungsverhältnisses. Sie besteht aus dem Wirkanteil (Realanteil) K_W und dem Blindanteil (Imaginäranteil) K_B . Unter der Annahme, dass K_W und $K_B \ll D$ ist, ist K_W die Korrektur des Betrages von $\underline{U}_a / \underline{U}_e$, während der Quotient K_B / D näherungsweise den Phasenwinkel zwischen \underline{U}_a und \underline{U}_e im Bogenmaß beschreibt.

5.1.2.3 Danach gilt näherungsweise für den Betrag der Ausgangsspannung des unbelasteten Teilers:

$$|U_a| \approx |U_e| \times [D + K_W] \quad (2)$$

5.1.2.4 Die Ausgangsspannung eines mit der Impedanz \underline{Z}_2 belasteten Teilers kann wie folgt berechnet werden:

$$\underline{U}_a \approx \underline{U}_e [D + K_W + jK_B - D \times \underline{Z}_a / \underline{Z}_2] \quad (3)$$

mit \underline{Z}_a Ausgangsimpedanz des induktiven Spannungsteilers.

5.1.2.5 Zur Abschätzung eines Messergebnisses nach Gl. (3) ist folgendes zu beachten:

- Die Eingangsspannung $|U_e|$ muss mit dem akkreditierten Wechselspannungsmessverfahren bestimmt werden.
- Das Teilungsverhältnis D wählt man zweckmäßigerweise z.B. zu 0,1; 0,01; 0,001. Bei diesen Teilungsverhältnissen ist die Ausgangsimpedanz \underline{Z}_a induktiver Spannungsteiler meist klein, so dass die Belastungsabhängigkeit gering ist.
- Die komplexe Korrektur \underline{K} und deren Teile K_W und K_B sind bei den Frequenzen 400 Hz und 1 kHz und den o. g. Teilungsverhältnissen auf nationale Normale zurückzuführen.
- Der Belastungseinfluss $\underline{Z}_a / \underline{Z}_2$ ist zu berücksichtigen. Die Ausgangsimpedanz \underline{Z}_a des induktiven Spannungsteilers wird dazu als Serienschaltung eines Widerstandes R_S und einer Induktivität L_S angenommen. Ihre Werte müssen in dem genannten Frequenzbereich und für die gewählten Teilungsverhältnisse bekannt sein. Wenn \underline{Z}_a nicht bekannt ist, kann der Belastungseinfluss experimentell durch Belastungsverdoppelung (Halbierung von \underline{Z}_2) ermittelt werden, wobei gleichzeitig \underline{U}_a gemessen wird.

	Messung und Erzeugung kleiner Wechselspannungen mit induktiven Spannungsteilern https://doi.org/10.7795/550.20180828A	DKD-R 1-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	8/19

5.1.3 Einflüsse auf das Messergebnis

5.1.3.1 Das mit dem aktuellen Messaufbau erzielte Messergebnis unterliegt einer Reihe von Einflüssen, die berücksichtigt werden müssen. In diesem Abschnitt sind verschiedene Faktoren beschrieben, die das Messergebnis beeinflussen können. Desgleichen werden *Maßnahmen* zur Minimierung dieser Einflüsse vorgeschlagen.

- Belastung der Wechselspannungsquelle (Kalibrator) durch die Eingangsimpedanz des induktiven Spannungsteilers.

Die Messung von $|U_e|$ ist erforderlich, wenn der Innenwiderstand der Quelle nicht vernachlässigbar ist.

Es ist zu beachten, dass eine induktive Last wie z.B. ein induktiver Spannungsteiler die Ausgangsspannung einiger Quellen erhöhen kann.

- Erdschleifen

Definierte Guard-Technik anwenden.

- Einstrahlung durch Fremdfelder.

Wenn notwendig, sind die Messungen in abgeschirmten Räumen durchzuführen. Einstrahlung durch Datenverarbeitungseinrichtungen (PCs, Drucker) und die Regeln für elektromagnetische Verträglichkeit sind zu beachten.

- Rauschspannung von der Wechselspannungsquelle oder dem Messgerät, mit dem $|U_e|$ gemessen wird. Diese Rauschspannung wird in keinem Fall durch das Teilungsverhältnis geteilt. Bei kapazitiver Kopplung kann die Rauschspannung am Teiler Ausgang fast so groß wie die Eingangsausgangsspannung sein.

Wenn notwendig, ist ein Filter zu verwenden, um die Eingangsausgangsspannung zu senken.

- Vom Messgerät und von der zu kalibrierenden Quelle erzeugte Rauschspannungen sind zu beachten.
- Der Einfluss der Teilerbelastung, insbesondere durch längere Messkabel, ist zu beachten.

Es sind abgeschirmte (doppelt geschirmte) Messkabel zu verwenden.

- Die Betriebsbedingungen des induktiven Teilers sind zu beachten.
- Systematische Beeinflussung durch den Prüfling.
- Kontaktübergangswiderstände des Teilers (Instabilität der Ausgangsspannung).

5.1.4 Unsicherheitsanalyse

5.1.4.1 Die zur gemessenen Spannung $|U_a|$ gehörige Messunsicherheit ist nach EA-4/02 [4] auf der Grundlage der o.g. Gleichung (2) bzw. (3) zu ermitteln.

5.1.4.2 Die Abschätzungen sollten alle in Abschnitt 5.1.3 erwähnten Einflüsse berücksichtigen. Der drastische Anstieg der Korrektur K_w und ihrer Unsicherheit bei kleinen Teilungsverhältnissen ist zu berücksichtigen; er ist nicht zu vernachlässigen.

	Messung und Erzeugung kleiner Wechselspannungen mit induktiven Spannungsteilern https://doi.org/10.7795/550.20180828A		DKD-R 1-1	
			Ausgabe:	09/2018
			Revision:	0
			Seite:	9/19

5.1.5 Rückführung

5.1.5.1 Die Spannung $|\underline{U}_e|$ muss auf nationale Normale rückgeführt sein. Der induktive Spannungsteiler muss gemäß Abschnitt 5.1.2 auf nationale Normale rückgeführt sein. Werden andere als die kalibrierten Frequenzen verwendet, sind die zusätzlichen Anteile der Messunsicherheit unter Berücksichtigung der Angaben des Herstellers abzuschätzen.

5.2 Erzeugung kleiner Wechselspannungen zu Kalibrierzwecken nach der Spannungsverhältnismethode

5.2.1 Geltungsbereich des Verfahrens

5.2.1.1 Dieses Verfahren zur Erzeugung und Messung kleiner Wechselspannungen im Bereich von 1 mV bis 1 V kann in akkreditierten Laboratorien im Frequenzbereich von 50 Hz bis 100 kHz in Abhängigkeit vom eingesetzten induktiven Teiler und unter Berücksichtigung der beschriebenen Voraussetzungen verwendet werden. Es wird vorausgesetzt, dass das Laboratorium für die Messung von Wechselspannungen von 1 V und größer bei diesen Frequenzen akkreditiert ist.

5.2.1.2 Dieses Verfahren kann für die Kalibrierung sowohl von anzeigenden Messgeräten (siehe UUT in Bild 2) als auch von Wechselstromkalibratoren (siehe AC-CAL in Bild 2) verwendet werden.

5.2.2 Messverfahren

5.2.2.1 Prinzip

a) Dieses Verfahren beruht auf der Bestimmung des Teilungsverhältnisses des induktiven Spannungsteilers mit bekannten Wechselspannungen U_e und U_a im V-Bereich. Es beinhaltet deshalb grundsätzlich zwei Schritte:

1. Ermittlung des Teilungsverhältnisses des eingesetzten induktiven Teilers bei höheren Spannungen im V-Bereich
2. Erzeugung und Messung kleiner Wechselspannungen mit dem kalibrierten Teiler.

5.2.2.2 Verfahrensbeschreibung

a) Ermittlung des Teilungsverhältnisses des induktiven Spannungsteilers

Das genaue 1:10-Teilungsverhältnis des induktiven Teilers wird durch Wechselspannungsmessungen bei 1 V und 10 V ermittelt. Die Kalibrierung erfolgt in den in Tabelle 1 gezeigten Schritten in dem Messaufbau nach Bild 2.

A Am Wechselstromkalibrator (AC-CAL) ist die bekannte Spannung 10 V bei der Frequenz f einzustellen.

Das Teilungsverhältnis am induktiven Spannungsteiler (IVD) ist auf 0,1 einzustellen.

Mit dem rauscharmen Vorverstärker (AMP) ist die Verstärkung zu ändern, um den Bezugswert - z.B. 1,000... V - in der Anzeige des Wechselstrommessgeräts (DMM) einzustellen.

B Am AC-CAL ist die bekannte Spannung 1 V bei der Frequenz f einzustellen. Am IVD ist das Teilungsverhältnis so einzustellen, dass das Anzeige-DMM den Bezugswert 1,000... V zeigt. Die Verstärkung des AMP wird dabei nicht geändert. Dieses Teilungsverhältnis ist als R aufzuzeichnen.

	Messung und Erzeugung kleiner Wechselspannungen mit induktiven Spannungsteilern https://doi.org/10.7795/550.20180828A		DKD-R 1-1	
			Ausgabe:	09/2018
			Revision:	0
			Seite:	10/19

b) Kalibrierung der Spannungen 100 mV, 10 mV, 1 mV

100 mV

C Der auf dem AC-CAL gemäß (B) eingestellte Spannungswert 1 V und die Frequenz f sind unverändert zu lassen.

Der IVD ist auf das Teilungsverhältnis 0,1 einzustellen.

Die Verstärkung des AMP ist zu verändern, um den Bezugswert in der Anzeige des DMM wieder einzustellen.

D Am AC-CAL sind 100 mV und die Frequenz f einzustellen.

Am IVD ist das Teilungsverhältnis auf R , wie unter B. ermittelt, einzustellen. Die AMP-Verstärkung ist nicht zu verändern. Der AC-CAL ist so einzustellen, dass die Anzeige des DMM den Bezugswert 1,000... V zeigt. Die Ausgangsspannung des AC-CAL ist innerhalb der angegebenen Messunsicherheit gleich 100 mV.

10 mV

E Am AC-CAL sind die 100 mV-Einstellung und die Einstellung der Frequenz f am AC-CAL eingestellt zu lassen.

Am IVD ist das Teilungsverhältnis auf 0,1 zu stellen. Die Verstärkung des AMP ist zu verändern, um den Bezugswert in der Anzeige des DMM wieder einzustellen.

F Am AC-CAL sind 10 mV und die Frequenz f einzustellen.

Am IVD ist das Teilungsverhältnis auf R , wie unter B. ermittelt, einzustellen. Die AMP-Verstärkung ist nicht zu verändern. Der AC-CAL ist so einzustellen, dass die Anzeige des DMM den Bezugswert 1,000... V zeigt. Die Ausgangsspannung des AC-CAL ist innerhalb der angegebenen Meßunsicherheit gleich 10 mV.

1 mV

Die Kalibrierung bei 1 mV erfolgt analog den vorher beschriebenen Schritten nach Tabelle 1 Punkt g) und h). In Tabelle 1 sind die Vorgehensweise zur Bestimmung des Teilungsverhältnisses des induktiven Teilers und die Ableitung der kalibrierten Spannungswerte für 100 mV, 10 mV und 1 mV tabellarisch zusammengefasst.

	Messung und Erzeugung kleiner Wechselspannungen mit induktiven Spannungsteilern https://doi.org/10.7795/550.20180828A	DKD-R 1-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	11/19

Tabelle 1: Stufen für die Kalibrierung von 100 mV, 10 mV und 1 mV und Unsicherheitsquellen

AC-CAL	IVD	AMP	DMM	Ziel	Unsicherheitsquellen
a) 10 V anlegen	Teilverhältnis 0,1	Bezugswert	z.B. 1,000...	<i>Ermittlung des Teilverhältnisses</i>	Teilverhältnis 1:10 mit AC/DC-Transfornormal, bei weiteren Schritten Korrelation beachten
b) 1 V anlegen	Bezugswert mit Teilverhältnis Einstellen	keine Änderung	1,000... ablesen		
c) 1 V angelegt lassen	Teilverhältnis 0,1	x10/ref. einstellen	z.B. 1,000...	<i>100 mV- Einstellung</i>	Einfluss der Belastung des Teilers eliminiert durch Messungen a) und b) und Verfahrensweise
d) 100 mV anlegen AC-CAL so einstellen, dass DMM 1,000... anzeigt	Teilverhältnis wie unter b)	x10/keine Änderung	1,000... ablesen		
e) 100 mV angelegt lassen	Teilverhältnis 0,1	x100/ref. einstellen	z.B. 1,000...	<i>10 mV- Einstellung</i>	zeitliche Instabilitäten
f) 10 mV anlegen AC-CAL so einstellen, dass DMM 1,000... anzeigt	Teilverhältnis wie unter b)	x100/keine Änderung	1,000... ablesen		
g) 10 mV angelegt lassen	Teilverhältnis 0,1	x1000/ref. einstellen	z.B. 1,000...	<i>1 mV- Einstellung</i>	Rauschen, Erdschleifen usw.
h) 1 mV anlegen AC-CAL so einstellen, dass DMM 1,000... anzeigt	Teilverhältnis wie unter b)	x1000/keine Änderung	1,000... ablesen		

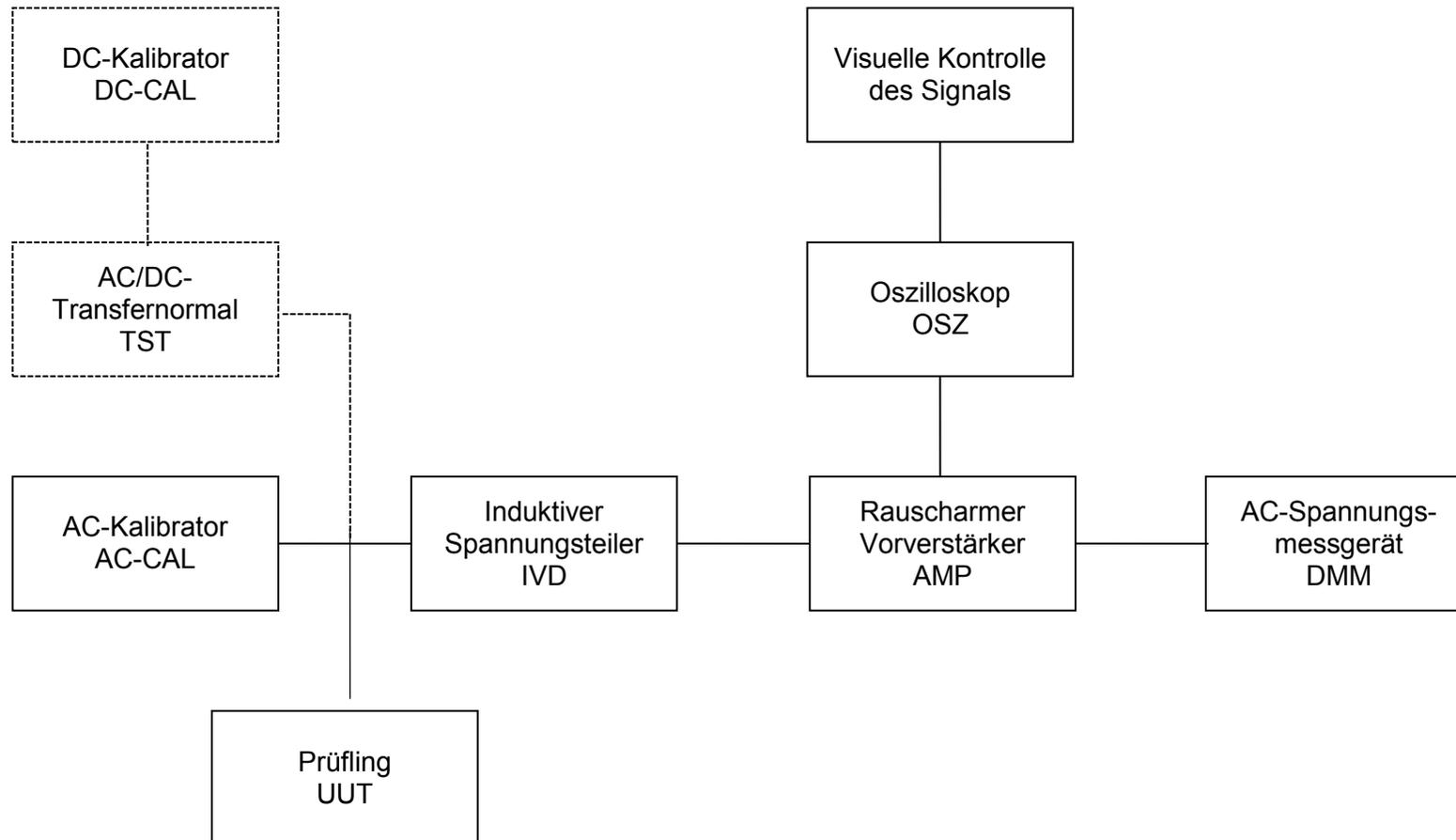


Bild 2: Aufbau für die Kalibrierung kleiner Wechselfspannungen nach dem Spannungsverhältnisverfahren

	Messung und Erzeugung kleiner Wechselfspannungen mit induktiven Spannungsteilern https://doi.org/10.7795/550.20180828A		DKD-R 1-1	
			Ausgabe:	09/2018
			Revision:	0
			Seite:	13/19

5.2.3 Unsicherheitsanalyse

- 5.2.3.1 Die Messunsicherheit muss für das Verfahren nach EA-4/02 ermittelt werden. Die den Spannungspegeln der einzelnen 1:10-Schritte beizuordnenden Messunsicherheiten sind korreliert, da zur Übertragung des Verhältnisses derselbe induktive Spannungsteiler benutzt wird. Daher müssen die Messunsicherheiten für jeden 1:10-Schritt unter Berücksichtigung dieser Korrelationen ermittelt werden, die sich vorwiegend aus den 1 V- und 10 V-Spannungspegeln des AC-Kalibrators (AC-CAL) beizuordnenden Messunsicherheiten ergeben.
- 5.2.3.2 Die Belastung des Teilerausgangs erzeugt keine zusätzlichen Unsicherheitsanteile, da sie im Rahmen des Verfahrens einkalibriert wird. Dies gilt, solange sich die Eingangsimpedanz des rauscharmen Vorverstärkers (AMP) nicht mit seiner Verstärkungseinstellung ändert.
- 5.2.3.3 Die Stabilität der Vergleichskette (IVD, AMP und DMM) ist eine wesentliche Quelle der Unsicherheit. Die Kurzzeitstabilität zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messschritten ist hierbei entscheidend. Die Bedeutung der Kurzzeitstabilität des Vorverstärkers als wesentliche Quelle der Unsicherheit steigt mit abnehmender Eingangsspannung. Das gleiche gilt für Fremdeinflüsse durch Erdschleifen, Rauschspannungen, elektromagnetische Störungen usw.
- 5.2.3.4 Mit abnehmendem Eingangsspannungspegel gewinnt die Auflösung der Messgeräte AMP und DMM für die relative Messunsicherheit an Bedeutung. Das gleiche gilt für Fremdeinflüsse durch Erdschleifen, elektromagnetische Felder, Rauschspannungen usw.
- 5.2.3.5 Andere Quellen der Unsicherheit wie das Rauschen oder der Gleichstrom-Offset des AC-Kalibrators (AC-CAL) können durch geeignete Filterung beseitigt werden.

5.2.4 Beispiel einer Unsicherheitsanalyse

(Die Zahlen dienen nur zur Veranschaulichung.)

- 5.2.4.1 Die Ermittlung der Messunsicherheit gliedert sich in zwei Schritte: die Bestimmung der dem IVD-Verhältnis beizuordnenden Messunsicherheit und die Bestimmung der den Ergebnissen der Kalibrierung bei 100 mV, 10 mV und 1 mV beizuordnenden Messunsicherheiten.
- 5.2.4.2 Bei der Ermittlung des IVD-Teilungsverhältnisses werden die Pegel der an den IVD angelegten Eingangsspannungen während des Verfahrens nicht direkt gemessen, sondern von dem kalibrierten AC-CAL abgeleitet. Das Verhältnis wird entsprechend den Schritten a) und b) in Tabelle 1 ermittelt:

$$R = \frac{r_{0,1}}{r_{1,0}} = \frac{V_1}{V_{10}} v_N v_i \quad (1)$$

worin

$r_{0,1}, r_{1,0}$

Transferverhältnisse von Ausgangs- und Eingangsspannungen des induktiven Spannungsteilers bei seinen 0,1- und 1,0-Einstellungen

$$v_N = \frac{1 + \frac{\delta V_{N1}}{V_{in}}}{1 + \frac{\delta V_{N10}}{V_{in}}}$$

Verhältnis der Korrekturen aufgrund der Instabilität des Vorverstärkers und anderer Störeinflüsse

$$V_{in} = r_{1,0} V_1 = r_{0,1} V_{10}$$

Spannung am Vorverstärkereingang bei den beiden Einstellungen

$$\delta V_{N1}, \delta V_{N10}$$

Korrekturen hinsichtlich Instabilität des Vorverstärkers und andere Störwirkungen

$$v_i = \frac{1 + \frac{\delta V_{i10}}{V_i}}{1 + \frac{\delta V_{i1}}{V_i}}$$

Verhältnis der Spannungen am DMM bei der 10 V- und bei der 1 V-Einstellung des Kalibrators (der Index i bedeutet „angezeigt“)

$$V_i$$

Spannungsanzeige (z.B. 1,000... V) am DMM bei den Einstellungen (der Index i bedeutet „angezeigt“)

$$\delta V_{i1}, \delta V_{i10}$$

Korrekturen der vom DMM angezeigten Spannungswerte aufgrund seiner endlichen Auflösung (der Index i bedeutet „angezeigt“)

- 5.2.4.3 Die Modellfunktion in Gl. (1) ist ein Produkt aus Termen. Die relative Standardmessunsicherheit, die der Kalibrierung des Teilungsverhältnisses R beizuordnen ist, ist in diesem Falle die für die Auswertung geeignete Größe. Ihr Quadrat wird durch die Quadratsumme gegeben:

$$w^2(R) = w^2(V_1) + w^2(V_{10}) + w^2(v_N) + w^2(v_i) \quad (2)$$

- 5.2.4.4 **Wechselstromkalibrator** (V_1, V_{10}) Für den Frequenzbereich 30 Hz bis 100 kHz stimmen die Werte der erzeugten Wechselspannung mit den entsprechenden Spannungseinstellungen für den 1 V- und den 10 V-Spannungspegel mit einer beigeordneten erweiterten relativen Messunsicherheit $W = 0,1 \times 10^{-3}$ (Erweiterungsfaktor $k = 2$) überein. Dieser Wert gibt die beigeordnete relative Messunsicherheit zum Zeitpunkt der Messung an. Er enthält einen Unsicherheitsbeitrag, der von den aus dem Kalibrierschein entnommenen Werten herrührt, und einen Unsicherheitsbeitrag der Drift seit der letzten Kalibrierung, der aus der Kalibrierungsgeschichte der Bezugsquelle bestimmt wird. Wenn eine AC/DC-Transfermessung zur Verfügung steht, kann die den oben genannten Spannungspegeln beigeordnete relative Messunsicherheit durch eine Kalibrierung der Pegel unmittelbar vor der Ermittlung des IVD-Verhältnisses bestimmt (siehe 5.2.4.9) werden. Hierdurch wird i. Allg. der Einfluss der Drift unterdrückt und die Messunsicherheit verringert. Dieser Fall ist in Bild 2 enthalten.

5.2.4.5 **Stabilität des Vorverstärkers und andere Störspannungen** (V_N): Spannungsschwankungen aufgrund der Kurzzeitstabilität des Vorverstärkers und anderer Störeinflüsse am Verstärkereingang sind aus den Angaben des Herstellers und aus früheren Messungen mit den folgenden Grenzen bekannt:

Eingangsspannung	Grenzen	relative Grenzen
1 V	2 μ V	$\pm 2 \times 10^{-6}$
100 mV	$\pm 4 \mu$ V	$\pm 4 \times 10^{-5}$
10 mV	$\pm 7 \mu$ V	$\pm 7 \times 10^{-4}$
1 mV	$\pm 10 \mu$ V	$\pm 10 \times 10^{-3}$

Für das Korrekptionsverhältnis v_N ergibt sich eine Dreieckverteilung mit dem Erwartungswert 1,000... und den Grenzen (siehe EA-4/02 S1, Beispiel S3):

Eingangsspannung	Grenzen
1 V	$\pm 4 \times 10^{-6}$
100 mV	$\pm 8 \times 10^{-5}$
10 mV	$\pm 14 \times 10^{-4}$
1 mV	$\pm 20 \times 10^{-3}$

5.2.4.6 **Voltmeter** (v_i) Die Auflösung des in dem 2V-Bereich benutzten 5 1/2-stelligen Voltmeters beträgt 10 μ V, was zu den Grenzen $\pm 5 \mu$ V für die endliche Auflösung des Geräts führt. Für das Verhältnis v_i der Spannungswerte am DMM ergibt sich eine Dreieckverteilung mit einem Erwartungswert 1,000... und den Grenzen $\pm 10 \times 10^{-6}$. (Nur unkorrelierte Beiträge der Korrekationen müssen berücksichtigt werden; siehe EA-4/02 S1, Beispiel S3).

5.2.4.7 **Messunsicherheitsbudget (Verhältnis R des induktiven Teilers):**

Größe	Schätzwert	Rel. Stand.mess-unsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Rel. Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	$w(x_i)$		c_i	$w_i(y)$
V_1	1,000 00 V	50×10^{-6}	Normal	1,0	50×10^{-6}
V_{10}	10,000 0 V	50×10^{-6}	Normal	1,0	50×10^{-6}
v_N	1,000 000	$1,63 \times 10^{-6}$	Dreieck	1,0	$1,63 \times 10^{-6}$
v_i	1,000 000	$4,08 \times 10^{-6}$	Dreieck	1,0	$4,08 \times 10^{-6}$
R	0,100 000				$70,8 \times 10^{-6}$

	Messung und Erzeugung kleiner Wechselspannungen mit induktiven Spannungsteilern https://doi.org/10.7795/550.20180828A		DKD-R 1-1	
			Ausgabe:	09/2018
			Revision:	0
			Seite:	16/19

5.2.4.8 Relative erweiterte Messunsicherheit

$$W = k \times w(R) = 2 \times 0,0708 \times 10^{-3} = 0,14 \times 10^{-3}$$

5.2.4.9 **Anmerkung:** Wenn die Ausgangsspannungen des Kalibrators durch Anschluss an Gleichstrom-Bezugsspannungen nach der AC-DC-Transfermethode (siehe Bild 2) kalibriert werden, kann die den Spannungspegeln V_1 und V_{10} beizuordnende Messunsicherheit mit den folgenden Gleichungen ermittelt werden:

$$V_1 = V_{DC1}(1 + \delta_1) \text{ und } V_{10} = V_{DC10}(1 + \delta_{10}) \quad (3)$$

mit

δ_1, δ_{10} relative AC-DC-Spannungs-Transferdifferenzen

V_{DC1}, V_{DC10} Gleichspannungen.

Dies kann zu einer Verringerung der dem IVD-Verhältnis R beizuordnenden Messunsicherheit führen. Ein Messunsicherheitsbudget für diese interne Kalibrierung ist hier nicht einbezogen.

5.2.4.10 Die Spannungspegel 100 mV, 10 mV und 1 mV werden abwärtsschreitend schrittweise (siehe Schritt c) bis h) in Tabelle 1) unter Verwendung des zuvor kalibrierten 1:10-Verhältnisses R des IVD kalibriert.

5.2.4.11 Der Wert $V_{0,1}$ des 100 mV-Pegels wird durch Anschluss an den Wert V_1 des 1 V-Pegels des Kalibrators kalibriert. Er ist gegeben durch

$$V_{0,1} = R V_1 v_N v_i \quad (4)$$

5.2.4.12 Bei der Ermittlung der dem Wert $V_{0,1}$ beizuordnenden relativen Standardmessunsicherheit müssen die Korrelationen zwischen R und V_1 berücksichtigt werden, die aus der Tatsache resultieren, dass V_1 bei der Bestimmung von R verwendet worden ist (siehe Gl. (1)). Daraus folgt

$$w^2(V_{0,1}) = w^2(R) + 3w^2(V_1) + w^2(v_N) + w^2(v_i) \quad (5)$$

Der Faktor 3 ergibt sich aus den genannten Korrelationen. Die Einzelheiten seiner Bestimmung werden hier nicht beschrieben.

5.2.4.13 Messunsicherheitsbudget (100 mV-Pegel)

Größe X_i	Schätzwert x_i	Rel. Stand.mess- unsicherheit $w(x_i)$	Verteilung	Sensitivitäts- koeffizient c_i	Rel. Unsicher- heitsbeitrag $w_i(y)$
R	0,100 000 V	$70,8 \times 10^{-6}$	Normal	1,0	$70,8 \times 10^{-6}$
V_1	1,000 00 V	50×10^{-6}	Normal	1,732	$86,6 \times 10^{-6}$
v_N	1,000 00	$32,7 \times 10^{-6}$	Dreieck	1,0	$32,7 \times 10^{-6}$
v_i	1,000 000	$4,08 \times 10^{-6}$	Dreieck	1,0	$4,08 \times 10^{-6}$
$V_{0,1}$	0,100 00 V				117×10^{-6}

5.2.4.14 Relative erweiterte Messunsicherheit

$$W = k \times w(V_{0,1}) = 2 \times 0,117 \times 10^{-3} = 0,23 \times 10^{-3}$$

5.2.4.15 Der Wert $V_{0,01}$ des 10 mV-Pegels wird durch Anschluss an den Wert $V_{0,1}$ des 100 mV-Pegels des Kalibrators kalibriert. Er ist gegeben durch:

$$V_{0,01} = R V_{0,1} v_N v_i \quad (6)$$

5.2.4.16 Bei der Ermittlung der dem Wert $V_{0,01}$ beizuordnenden relativen Standardmessunsicherheit müssen die Korrelationen zwischen R , V_1 und $V_{0,1}$ berücksichtigt werden, die aus der Tatsache resultieren, dass R für die Ermittlung von $V_{0,1}$ (siehe Gl. (4)) verwendet worden ist und R mit V_1 korreliert ist. Daraus folgt

$$w^2(V_{0,01}) = w^2(V_{0,1}) + 3w^2(R) + 2w^2(V_1) + w^2(v_N) + w^2(v_i) \quad (7)$$

Die Faktoren 3 und 2 ergeben sich aus den genannten Korrelationen. Die Einzelheiten ihrer Bestimmung werden hier nicht beschrieben.

5.2.4.17 Messunsicherheitsbudget (10 mV-Pegel)

Größe X_i	Schätzwert x_i	Rel. Stand.mess- unsicherheit $w(x_i)$	Verteilung	Sensitivitäts- koeffizient c_i	Rel. Unsicher- heitsbeitrag $w_i(y)$
R	0,100 000 V	$70,8 \times 10^{-6}$	Normal	1,732	123×10^{-6}
$V_{0,1}$	0,100 00 V	117×10^{-6}	Normal	1,0	117×10^{-6}
V_1	-	50×10^{-6}	Normal	1,414	$70,7 \times 10^{-6}$
v_N	1,000 0	572×10^{-6}	Dreieck	1,0	572×10^{-6}
v_i	1,000 000	$4,08 \times 10^{-6}$	Dreieck	1,0	$4,08 \times 10^{-6}$
$V_{0,001}$	0,010 000 V				600×10^{-6}

5.2.4.18 Relative erweiterte Messunsicherheit

$$W = k \times w(V_{0,01}) = 2 \times 0,600 \times 10^{-3} = 1,2 \times 10^{-3}$$

5.2.4.19 Der Wert $V_{0,001}$ des 1 mV-Pegels wird durch Anschluss an den Wert $V_{0,01}$ des 10 mV-Pegels des Kalibrators kalibriert. Er ist gegeben durch:

$$V_{0,001} = R V_{0,01} \sqrt{1 + V_1} \quad (8)$$

5.2.4.20 Bei der Ermittlung der dem Wert $V_{0,001}$ beizuordnenden relativen Standardmessunsicherheit müssen die Korrelationen zwischen R , V_1 und $V_{0,01}$ berücksichtigt werden, die aus der Tatsache resultieren, dass R für die Ermittlung von $V_{0,01}$ verwendet worden ist (siehe Gl. (6)) und R mit V_1 korreliert ist. Daraus folgt

$$w^2(V_{0,001}) = w^2(V_{0,01}) + 5w^2(R) + 2w^2(V_1) + w^2(V_N) + w^2(V_i) \quad (9)$$

Die Faktoren 5 und 2 ergeben sich aus den genannten Korrelationen. Die Einzelheiten ihrer Bestimmung werden hier nicht beschrieben.

5.2.4.21 Messunsicherheitsbudget (1 mV-Pegel)

Größe X_i	Schätzwert x_i	Rel. Stand.mess- unsicherheit $w(x_i)$	Verteilung	Sensitivitäts- koeffizient c_i	Rel. Unsicherheits- beitrag $w_i(y)$
R	0,100 000 V	$0,071 \times 10^{-3}$	Normal	2,236	$0,159 \times 10^{-3}$
$V_{0,01}$	0,010 000 V	$0,606 \times 10^{-3}$	Normal	1,0	$0,606 \times 10^{-3}$
V_1	-	50×10^{-6}	Normal	1,414	$70,7 \times 10^{-6}$
V_N	1,000	$8,16 \times 10^{-3}$	Dreieck	1,0	$8,16 \times 10^{-3}$
V_i	1,000 000	$0,004 \times 10^{-3}$	Dreieck	1,0	$0,004 \times 10^{-3}$
$V_{0,001}$	0,001 000 V				$8,19 \times 10^{-3}$

5.2.4.22 Relative erweiterte Messunsicherheit:

$$W = k \times w(V_{0,001}) = 2 \times 8,19 \times 10^{-3} \cong 16 \times 10^{-3}$$

	Messung und Erzeugung kleiner Wechselspannungen mit induktiven Spannungsteilern https://doi.org/10.7795/550.20180828A	DKD-R 1-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	19/19

5.2.4.23 Die von dem Kalibrator erzeugten Spannungen betragen:

Einstellung	Wert
100 mV	$100,00 \times (1 \pm 0,23 \times 10^{-3}) \text{ mV}$
10 mV	$10,00 \times (1 \pm 1,2 \times 10^{-3}) \text{ mV}$
1 mV	$1,00 \times (1 \pm 16 \times 10^{-3}) \text{ mV}$

5.2.4.24 Die angegebene erweiterte Messunsicherheit ergibt sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$, der bei einer Normalverteilung einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % entspricht.

5.2.5 Rückführbarkeit

5.2.5.1 Die Akkreditierung für die Wechselspannungswerte 10 V und 1 V im betroffenen Frequenzbereich wird für die Rückführbarkeit der mit dem Verfahren erzielten Ergebnisse vorausgesetzt.

6 Literatur

- 1 Ramm, G.: *Darstellung und Weitergabe beliebiger Wechselspannungsverhältnisse mit induktiven Spannungsteilern*. PTB-Bericht E-31, S. 3-27, ISBN 3-88314-730-3
- 2 *Output Accuracy Test - Millivolt Ranges*, Bedienungshandbuch für das AC-Kalibratormodell 5200 A, Fluke Mfg. Co., Inc., Seattle/USA, Abschnitt 4-36, Ausgabe 1976
- 3 *Millivolts (LF) Full Range Calibration (1 mV-100 mV)*, Bedienungshandbuch für das AC-Kalibratormodell 4708, Wavetek Ltd., Datron Division, Norwich/UK, S. 1-21
- 4 DAKS-DKD-3:2010: *Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen* (deutsche Fassung von EA-4/02 (EAL-R2):1997: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*)