

III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle

III.1 Kalibrierverfahren – Direkte Messung an konstanten Quellen

III.1.1 Voltmeter

Die Kalibrierung von Voltmetern erfolgt durch direkte Messung an variablen AC/DC-Quellen (Kalibratoren wie Fluke 5700A/ 5720A, Fluke 5500A/5520A, Wavetek 9000/ 9100 etc.), an konstanten Quellen oder festen Normalen. Für die Gleichspannungswerte 10 V, 1 V und 1,018 V stehen DC Spannungs-Standards ("Zener") wie Datron 4910 oder Fluke 732A zur Verfügung, mit denen kleine Messunsicherheiten erreicht werden können. Diese Normale können aufgrund der langen Historie sehr genau extrapoliert werden. Für das Spannungsnormal Datron 4910 hat sich zum Beispiel eine Näherung mit einem gleitenden Fenster der letzten 10 Jahre als praktikabel erwiesen. Die beste Extrapolationsstrategie (z. B. linear oder als Polynom) ist abhängig von der „Qualität“ der Regression, die anhand des Abstands zwischen Näherung („Fit“) und gemessenen Werten beschrieben werden kann. Mit der sog. „Step-Up“-Methode besteht zudem die Möglichkeit, die kleinen Messunsicherheiten der Spannungs-Standards auch auf abweichende Nominalspannungen im Bereich von 1 mV bis 1000 V zu übertragen (Näheres siehe [„AA0341-DC-Step-Up-Methode-an-DMM“](#)). Diese Methode bietet zudem den Vorteil, dass ein Voltmeter und eine DC-Spannungsquelle gleichzeitig kalibriert werden können.

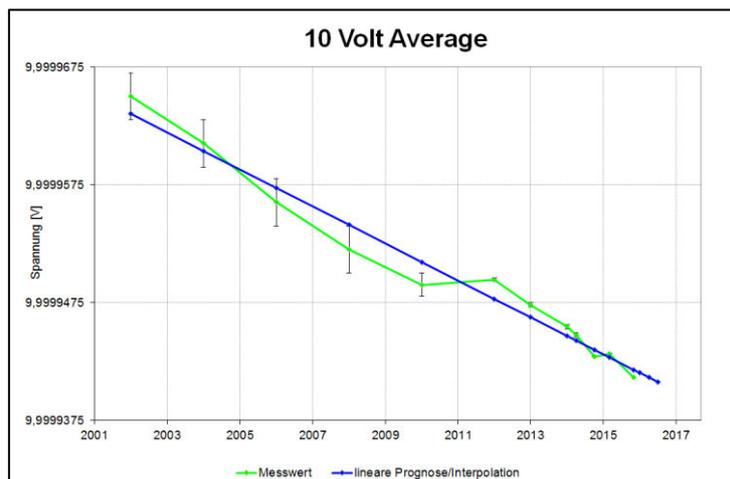


Bild III.1a Historie und Prognose der 10 V Zelle, Datron 4910

Um die Messunsicherheiten möglichst niedrig zu halten werden für den Anschluss des Kalibriergegenstandes im DC-Bereich Spezialleitungen z. B. von Fluke verwendet (geschirmte Leitung, Spezialstecker mit geringer Thermospannung). Für AC-Messungen sind geschirmte, verdrehte Leitungen kurzer Länge am besten geeignet (Pomona 1167, 40 cm). Abweichende Aufbauten sind mit einem erhöhten Anteil der Messunsicherheit zu bewerten (siehe Tabelle III.1.1.1). Wenn vorhanden wird der Guard-Anschluss des Voltmeters mit dem Kalibrator verbunden, die Verbindung von Guard zur Erde erfolgt nur am Kalibrator (Bild III.1). Bei Voltmetern mit geerdetem LO-Anschluss muss der Kalibrator auf EXT GRD geschaltet und die Brücke am Kalibrator entfernt werden, d.h. die Verbindung erfolgt am Voltmeter (siehe hierzu auch das Fluke 5700A Operator Manual). Abweichungen von diesem Anschluss sind nur dann zulässig, wenn der Hersteller des Kalibriergegenstandes andere Messaufbauten vorschlägt. In jedem Fall wird im Kalibrierschein notiert, wie der Kalibriergegenstand am Normal angeschlossen wurde.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	1 von 1

Referenz	in mV	Delta in μV
Fluke 5440-7002, 40cm, #1	9,999880	
Fluke 5440-7002, 40cm, #2	10,000080	0,200
Fluke 5440-7002, 75cm	9,999825	-0,055
Fluke vergoldet, 75cm	10,000050	0,170
Fluke vergoldet, 75cm	9,999315	-0,255
Eigenbau, 2xRG58U auf 4mm Banane, vergoldet, 75cm	9,999975	0,095
3mm Banane, 1m vergoldet, verdreht	10,000255	0,375
Eigenbau, 2xRG58U auf 3mm Banane, unvergoldet, 75cm	9,998580	-1,300
3mm Banane, 1m unvergoldet, unverdreht	9,999330	-0,550
Pomona 1167, 40 cm, verdreht, geschirmt	9,999615	-0,265
Pomona 1167, 1m, verdreht, geschirmt	9,999735	-0,145

Tabelle III.1.1.1 - Abschätzung von thermoelektrischen Effekten verschiedener Anschlussstechniken: Die Verwendung optimaler Anschlussstechnik lässt die Unterdrückung von thermoelektrischen Effekten kleiner 100 nV zu.

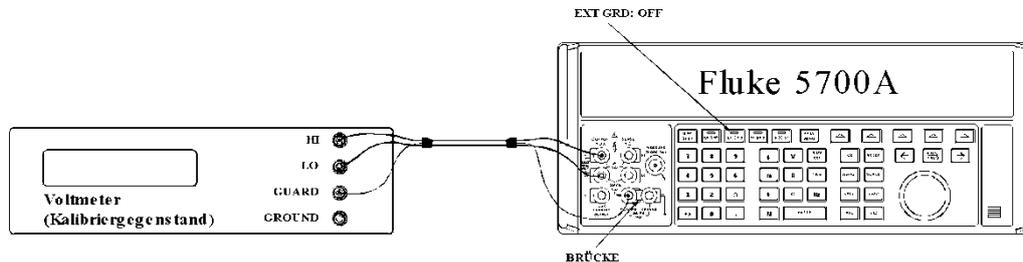


Bild III.1b Voltmeter am Kalibrator Fluke 5700A (DC - 10 kHz)

Der Nullpunkt wird mit kurzgeschlossenem Eingang gemessen. Dazu müssen Kurzschlussstecker wie Fluke 8508A-7000K (für Fluke 8508A) oder Eigenbau Kupferbügel (z. B. für HP/ Agilent 3458A) verwendet werden, die durch vergoldete Kontakte geringe Thermospannungen aufweisen oder vollständig aus Kupfer gefertigt sind. Oxidschichten sind vor Gebrauch durch die Reinigung mit Säure oder durch mechanisches Blankpolieren zu entfernen. Zu empfehlen sind neuwertige, blank glänzende Kupferstücke als Nullnormale. Messkabel mit Klemmlaschen (Kabelschuhe) lassen sich am besten kurzschließen, indem die beiden Laschen z. B. an der LO-Buchse eines Kalibrators übereinander geklemmt werden. Nach dem Einstecken der Kurzschlussstecker bzw. Übereinanderklemmen der Kabelschuhe muss so lange gewartet werden, bis sich das thermische Gleichgewicht eingestellt hat. Dies ist daran zu erkennen, dass der Messwert nur noch statistische Schwankungen aufweist und nicht mehr in eine bestimmte Richtung driftet. Nach einigen Minuten ist dieser Zustand in der Regel erreicht. Zur Verifikation und Abschätzung der Messunsicherheit wurden Messreihen mit Standard- und Präzisionsbügeln durchgeführt (Messung von Differenz und Streuung gegenüber einem „guten“ Kurzschlussbügel). Aus dem mittleren Abweichungsbetrag σ_{Offset} der Kurzschlussstücke untereinander und deren Streuung σ_{sDev} an einem typischen hochauflösenden Digitalmultimeter (z. B. Fluke 8508A) bestimmt sich die Unsicherheit U_{Zero} der Nullnormale:

$$U_{\text{Zero}} = 2 \cdot \sqrt{\sigma_{\text{Offset}}^2 + \sigma_{\text{sDev}}^2}$$

Daraus ergibt sich die beste Unsicherheit für die Null-Messung bzw. Erzeugung bei Verwendung blank glänzender, neuwertiger oder polierter Kupferdrähten aus der statistischen Reihe aufgerundet zu 35 nV¹ innerhalb kurzer Messzeiten, z.B. zur Bestimmung des Nullpunktes. Bei längeren Messzeiten kann sich dieser Anteil auf bis zu 100 nV erhöhen.

¹ <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/DC-NF-High-End/Vergleich-Kurzschlussbuegel-Fluke8508A-HP3458A.xlsx>

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	2 von 1



Referenz: Fluke 4W Short 8508A-7000K für den Abgleich des Nullpunktes
DMM Fluke 8508A (esz-ID: 001093; bzw. esz-ID: 000002)
Einstellungen: 5 Hz Low Pass Filter, Fast
Bedingungen: Wartezeit ≥ 2 min

	Kurzschlussstecker (vergoldet)		Kurzschlussstecker (versilbert)		Kupferbügel (gereinigt)		Kupferdrahtstücke (neu)	
	Offset [μ V]	sDev [μ V]	Offset [μ V]	sDev [μ V]	Offset [μ V]	sDev [μ V]	Offset [μ V]	sDev [μ V]
Nr. 1	2,167	0,005	2,407	0,023	0,022	0,013	0,024	0,011
Nr. 2	2,454	0,009	2,102	0,013	0,095	0,009	0,014	0,007
Nr. 3	2,134	0,024	2,407	0,023	0,039	0,011	0,013	0,011
Nr. 4	2,683	0,029	2,083	0,013			0,003	0,009
Nr. 5	2,226	0,029	2,407	0,023			0,003	0,009
Nr. 6							0,020	0,008
Nr. 7							0,007	0,010
Nr. 8							0,011	0,012
Nr. 9							0,030	0,014
Nr. 10							0,008	0,011
$\bar{\Delta}_{\text{Offset}}$	2,333	0,019	2,281	0,019	0,052	0,011	0,013	0,010
$\bar{\Delta}_{\text{sDev}}$	0,176		0,176		0,038		0,009	
MU [μV] (k=2)	4,679		4,575		0,129		0,032	

Tabelle III.1.1.2 - Abschätzung von thermoelektrischen Effekten verschiedener Kurzschlussstechniken am DMM Fluke 8508A: Die Verwendung neuwertiger Kupferbügel lässt die Unterdrückung von thermoelektrischen Effekten bis etwa 35 nV zu. Am besten lässt sich der Effekt der Anschlussstechnik (siehe Tabelle III.1.1.1) kompensieren wenn die Offsetkompensation gemeinsam mit dem angeschlossenen Kabel (Übereinanderklemmen der Kabelschuhe) erfolgt.



Referenz: neuwertiger Kupferbügel für den Abgleich des Nullpunktes
DMM HP 3458A (esz-ID: 000272), NPLC 200, NDIG 8, Wartezeit ≥ 2 min

	Kurzschlussstecker (vergoldet)		Kurzschlussstecker (versilbert)		Kupferbügel / - drahtstücke (oxidiert)		Kupferdrahtstücke (neu)	
	Offset [μ V]	sDev [μ V]	Offset [μ V]	sDev [μ V]	Offset [μ V]	sDev [μ V]	U [mikroV]	SD [mikroV]
Nr. 1	0,609	0,059	0,798	0,042	0,136	0,058	0,038	0,051
Nr. 2	0,837	0,087	0,958	0,044	0,070	0,045	0,106	0,046
Nr. 3	0,796	0,036	1,252	0,049	0,171	0,046	0,013	0,036
Nr. 4	1,009	0,040	1,404	0,060	0,017	0,050	0,047	0,052
Nr. 5	1,082	0,035					0,039	0,054
Nr. 6							0,026	0,067
Nr. 7							0,066	0,059
Nr. 8							0,067	0,041
Nr. 9							0,032	0,037
Nr. 10								
$\bar{\Delta}_{\text{Offset}}$	0,867	0,051	1,103	0,049	0,099	0,050	0,048	0,049
$\bar{\Delta}_{\text{sDev}}$	0,186		0,275		0,069		0,028	
MU [μV] (k=2)	1,773		2,274		0,240		0,111	

Tabelle III.1.1.3 – Dieselbe Messung am DMM HP/ Agilent 3458A: Die niedrigere Auflösung im 100 mV-Bereich führt zu einem höheren Anzeigerauschen verglichen mit Fluke 8508A. Im Mittel ist der Nullpunkt unabhängig der Oxidation mit einer Unsicherheit von 240 nV abgleichbar. Aufgrund der Materialunterschiede der Konnektoren sind für die Nullpunkt Kompensation ausschließlich Kupferdrahtbrücken zulässig. Die Verwendung des Nullnormals Fluke 4W Short 8508A-7000K führt konstruktionsbedingt zu höheren Differenzen mit Unsicherheiten bis zu 450 nV.

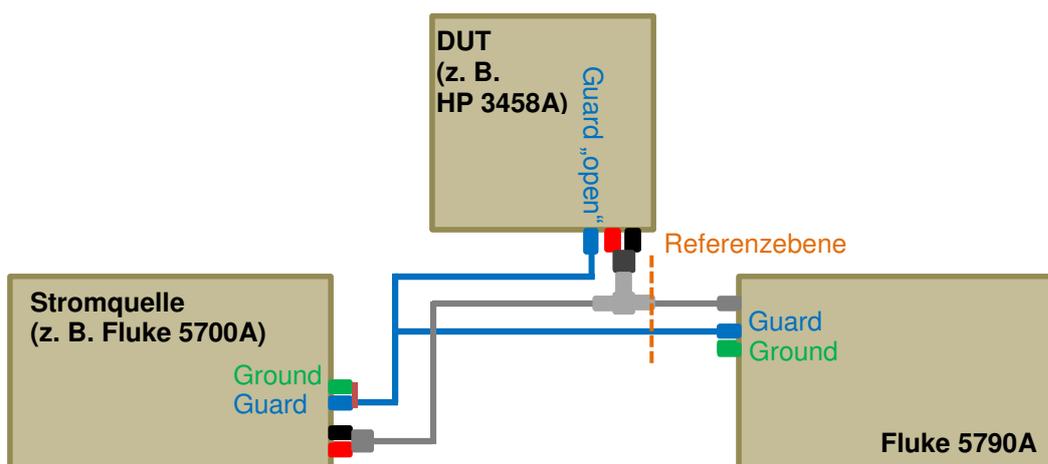
Für hohe Spannungen hoher Frequenzen steht z. B. der Breitbandverstärker Fluke 5725A zusammen mit der Ansteuereinheit zur Verfügung. Die Abweichungen und Driften dieser Verstärkerkombination sind aus der Kalibrierung bekannt. Somit können für Festwerte und Zwischenwerte bessere Unsicherheiten erzielt werden als vom Hersteller für die gesamte Serie ermittelt wurden.

III.1.1.1 Variante mit parallelem AC/DC Transfornormal Fluke 5790A

Mit einem parallel zu einer stabilen und klirrarmen Wechselspannungsquelle (z.B. Fluke 5700A) betriebenen AC/DC-Transfornormal (Fluke 5790A) ist es als Variante zum Direkterzeugungsverfahren möglich Wechselspannungskalibrierungen mit sehr kleinen Messunsicherheiten durchzuführen. Dabei sind besonders bei hohen Frequenzen >100 kHz kurze und geschirmte Kabelführungen unverzichtbar, da sich alle Korrekturwerte des Normal auf die bei der Kalibrierung des Normal definierte Referenzebene beziehen. Als Referenzebene wurde das offene Ende des mit dem Fluke 5790A fest verbundene Typ-N-Verbindungskabel festgelegt. Zusätzliche Abstände zur Referenzebene wirken sich negativ auf das Messergebnis aus und sind daher zu vermeiden. Um bei Anschluss des Verbindungskabels an Bananen-Buchsen den Messfehler so klein wie möglich zu halten, wird der in Bild III.1e abgebildete Eigenbauadapter verwendet, der den kleinstmöglichen Abstand zwischen Kabelende und Bananen-Buchsen gewährleistet. Zwar kann dabei das AC/DC-Transfornormal auch mit einer externen DC-Referenz im Modus „Transfer“ betrieben werden, dies ist jedoch nicht zwingend erforderlich, da der interne Vergleich bereits sehr gute Messergebnisse erzielt. Zusammen mit der Historie des Normal und der Abschätzung von Wiederholbarkeit und Kabeinfluss lassen sich so auch im Direktbetrieb („Direct“) kleine Messunsicherheiten an den kalibrierten und rückgeführten festen Stützpunkten erzielen. Für den Betrieb zwischen diesen Stützpunkten wird angenommen, dass die Spezifikationen des Herstellers eingehalten werden, sofern nur die Frequenz geändert wird ist die Interpolation gemäß Abs. III.1.6 zwischen benachbarten Frequenzen möglich.

Einstellungen am Fluke 5790A, um die (unbekannte) Spannung der Quelle zu bestimmen:

- Es wird immer der „Input 1“ mit der „Range-Lock“ Funktion am 5790A eingestellt, so dass auch bei überschneidenden Bereichen die Impedanz, Belastung und der Korrekturwert von Normal und Quelle bekannt sind oder den Kalibrierbedingungen der externen Kalibrierung entsprechen.
- Ext.Guard ist auf „EIN“.
- Die Brücke von ERDE zu GUARD am 5790A ist offen.
- Die Spannungsquelle ist der Erdpotentialpunkt aller Messgeräte – Es darf nur eine Messerde im Aufbau geben!



Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	4 von 1

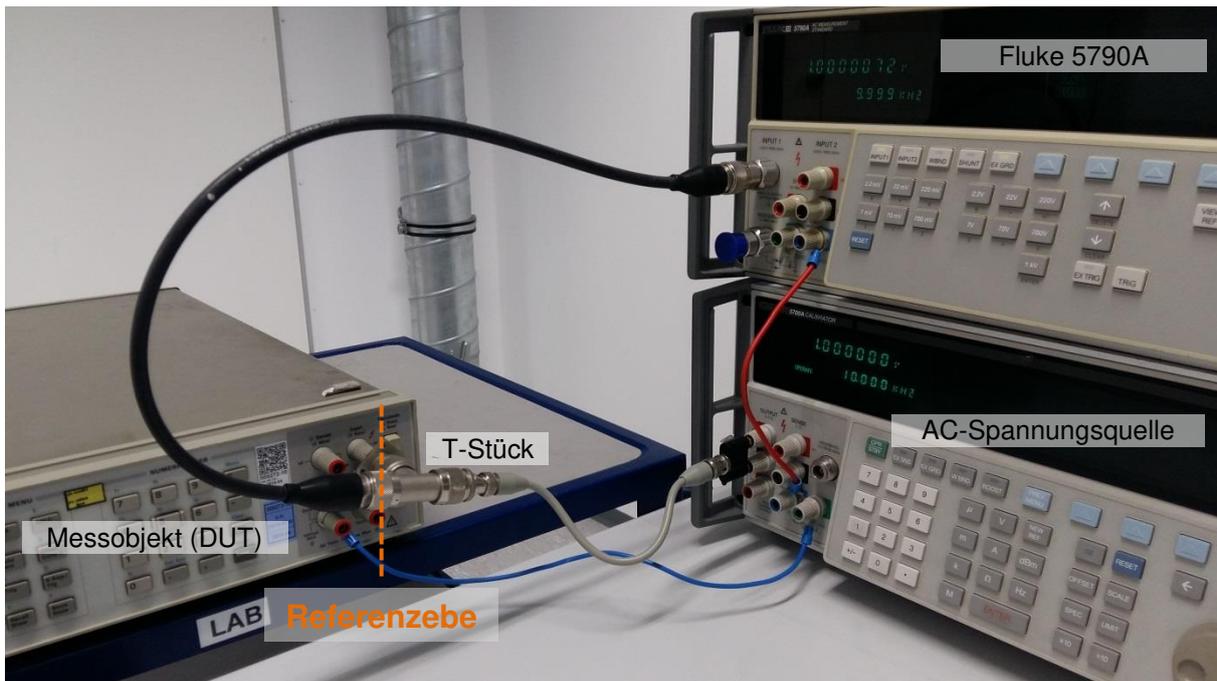


Bild III.1d - Kalibrierung eines Wechselspannungsmessgerätes am Beispiel HP 3458A.



Bild III.1e - Eigenbauadapter für Typ N-Verbindungskabel

III.1.1.2 Einflussgrößen und Messunsicherheit

Die dargestellte Messvariante mit einem parallel betriebenen AC/DC-Transferstandard zur Erzeugung von Wechselspannungen kann mit dem Modell der Messung bei zusätzlicher Berücksichtigung der Quantisierung am Messobjekt (Auflösung) dargestellt werden. Ist dieser vom Messobjekt abhängige (also erst bei der konkreten Messung bestimmbare) Anteil sehr klein, entspricht das Ergebnis der Messunsicherheitsbilanz der direkten Messung bei der Kalibrierung einer Quelle. Details dazu sind Kapitel IV entnehmbar.

Ausgabe: DMS.11	erstellt von: PF am: 06.08.2018	geprüft/genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	Seite 5 von 1
---------------------------	--	---	--	-------------------------

Wesentliche Einflussgrößen (siehe Kapitel IV) dieser Messvariante sind

- Wiederholbarkeit der Werte am Messobjekt:
Zur Bestimmung einer „typischen“ Wiederholbarkeit wurden Messreihen unter denselben Bedingungen wiederholt und deren gegenseitigen Abweichungen ausgewertet.
- Abweichungen zwischen Referenzebene und Anschlussebene des Messobjektes
Um den Kabellängeneinfluss zu bestimmen erfolgten Messungen mit doppelter Kabellänge/ doppelter Entfernung zur Referenzebene. Diese Analyse enthält zwar die Kombination aus Wiederholbarkeit alleine und Kabellängeneinfluss, sollte jedoch eine gute Größenordnung der entsprechenden Einflussgrenzen ermöglichen
- (Kalibrier-)Unsicherheit der Korrektion und dessen Langzeitinstabilität des Transferrnormals
Diese können aus dem Kalibrierschein bzw. der Historie ermittelt werden

III.1.2 Amperemeter

Kalibratoren Fluke 5700A/5720A, Fluke 5500A/5520A, etc.

Die Kalibrierung von Amperemetern kann durch direkte Messung an Kalibratoren wie Fluke 5700A/ 5720A, Fluke 5500A/5520A oder Wavetek 9000/9100 erfolgen. Alternativ kann die Erzeugung von Stromstärken auch mithilfe eines Nebenwiderstands (Shunt) in Reihe mit einer stabilen Quelle realisiert werden (beschrieben in [Kapitel VI](#) dieses QMH).

Für den Anschluss des Kalibriergegenstandes (Bild III.2) werden Spezialleitungen z. B. von Fluke (geschirmte Leitung, Spezialstecker mit geringer Thermospannung) oder (geschirmte) Laborleitungen ausreichenden Querschnitts (z.B. 2x RG58U auf Banane für Messströme <2,2A) verwendet. Wenn vorhanden wird der Guard-Anschluss des Amperemeters mit dem Kalibrator verbunden, die Verbindung von Guard zur Erde erfolgt wie bei der Kalibrierung von Voltmetern.

Abweichungen von diesem Anschluss sind nur dann zulässig, wenn der Hersteller des Kalibriergegenstandes andere Messaufbauten vorschlägt. In jedem Fall wird im Kalibrierschein notiert, wie der Kalibriergegenstand am Normal angeschlossen wurde.

Im Zweifelsfall muss der Kalibrator immer so angeschlossen und betrieben werden, wie er selbst kalibriert wurde (aus aktuellem Kalibrierschein zu entnehmen).

Für hohe Stromstärken >2,2 A stehen z. B. Kalibratoren der Serie Fluke 55xxA oder die Breitbandverstärker Fluke 5725A, Fluke 52120A oder Fluke 5220A, zusammen mit den Ansteuereinheiten zur Verfügung.

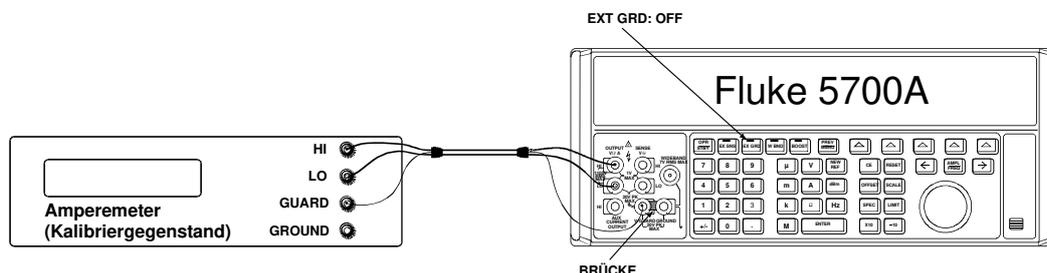


Bild III.2 - Amperemeter am Kalibrator Fluke 5700A

Eine "Nullmessung" oder Erzeugung ist dabei prinzipiell ähnlich wie bei Gleichspannungen möglich. Das "Null-Ampere-Normal" stellt dabei ein Leerlauf, also z.B. die offene Buchse am Messgerät selbst, dar. Da ein möglicher Einfluss z.B. störender Ladungen an guten Multimetern fast nicht messbar ist (Anzeige bei $\pm 0,001$ nA), wurde zur Abschätzung der Messunsicherheit am Elektrometer unter Standard-Laborbedingungen (ungeschirmte Umgebung) der Gerätenullpunkt einmal mit vom Eingang abgekoppeltem Messverstärker (Zero Check) und offenen Buchsen im kleinsten Bereich verglichen. Aus den Messungen wurde ein maximales Einflussintervall einer offenen Buchse abgeleitet und als Grenze einer Rechteckverteilung für die Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit verwendet.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	6 von 1

Messung 1	0,0084 pA
Messung 2	0,0090 pA
Messung 3	0,0090 pA
maximal geschätztes Intervall (rechteckig)	0,0100 pA
U (k=2)	0,012 pA

Kleine Stromstärken bis 1 pA

am Kalibrator (direkte Erzeugung)

Zum Kalibrieren von Elektrometern, Strom-, Spannungs-, Ladungs- und Widerstandsmessgeräten steht z. B. die Multifunktionsquelle Keithley 263 im Labor zur Verfügung. Das Gerät ergänzt neben

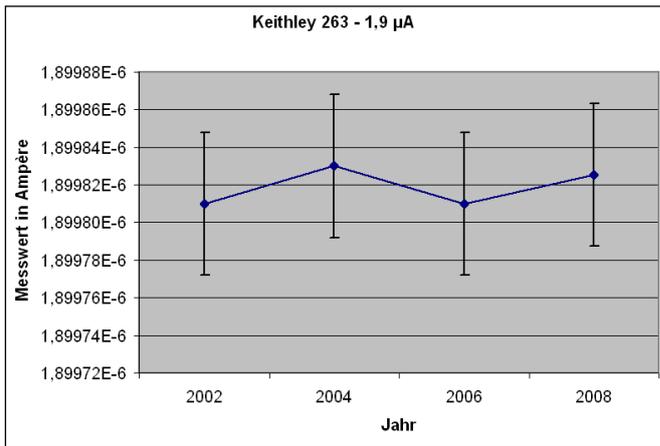


Bild III.4a Keithley 263: Historie des 2 µA Bereichs. Die maximale Änderung im Kalibrierintervall (2 Jahre) beträgt $1,1 \cdot 10^{-5}$. Diese Grenzen werden als Unsicherheitsintervall einer möglichen Rechteckverteilung angenommen. Daneben ergibt sich die maximale Abweichung vom Einstellwert als $6,3 \cdot 10^{-5}$ und wird als Interpolationsunsicherheit im variablen Bereich (>20 nA bis 200 nA) verwendet.

den Kalibratoren der Serie Fluke 5700A die rückgeführten DC-Messbereiche. In überschneidenden Bereichen können darüber hinaus Kontroll- und Vergleichsmessungen des eigenen Equipments durchgeführt werden.

Der Anschluss erfolgt über eine Triax-Buchse auf der Geräterückseite mittels einer geschirmten Messleitung (Keithley 6011).

Kleinstmögliche Messunsicherheiten werden mit vollständig geschirmtem Anschluss ohne weitere Adapter erzielt. So lässt sich beispielsweise das Elektrometer Keithley 617 oder 6517 über eine einzige Triax-Leitung mit der Quelle verbinden. Im Modus AMPS kann somit die aktive Stromquelle mit DC-Compliance-Spannungen bis 12 V genutzt werden und sorgt für konstanten Stromfluss am Messobjekt oder Messgerät. Der Betrieb empfiehlt sich

relativ gegenüber STANDBY.

Die Auswertung der Historie dieses Geräts und die maximalen Abweichungen im Kalibrierintervall sind seit 1995 vorhanden und werden in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt (s. Bild III.4a).

Mit Vergleichsmessungen am Elektrometer Keithley 617 oder 6517 wurden darüber hinaus Ergebnisse zu Kurzzeitstabilität und Reproduzierbarkeit von Messwerten gewonnen und die Abschätzung für den Unsicherheitsbeitrag δX_A getroffen.

Die Ladungssynthese erfolgt auf Basis konstanten Stromflusses z.B. für eine Sekunde gemäß dem Zusammenhang

$$Q = \int_t I(t) dt \text{ bzw. } Q = I \cdot t \text{ sofern } I = \text{const.}$$

Die Zeitkonstante kann z.B. an einem Oszilloskop hoher zeitlicher Auflösung verifiziert werden oder über elektronische Schalter können die Gleichstromstärken der Kalibratoren über einen zeitbasissynchronisierten Funktionsgenerator mit fester Dauer programmiert und am Messobjekt angelegt werden:

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	7 von 1

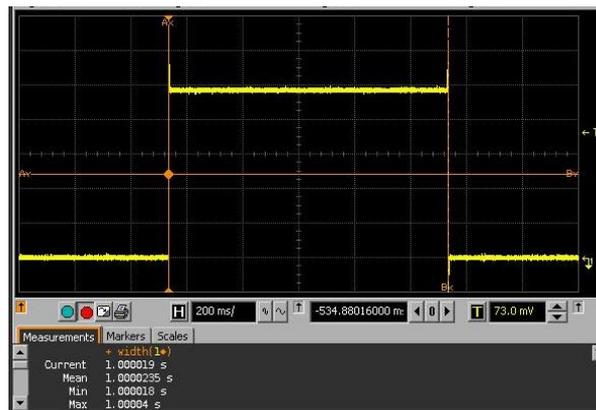


Bild III.4b Stromimpuls (Ladungsabgabe) der Quelle Keithley 263 (Mittelwert einer Stichprobe N=16) am Oszilloskop

Gute Messergebnisse sind dabei unter Beachtung einwandfreier Triggerung des Messsystems gegenüber Entladung (ZERO) und den möglichen Offsetabweichungen ab etwa 10 pC möglich. Gemäß Kapitel V bzw. V.2 kann das an der Quelle „eingemessene“ (abgeglichene) Elektrometer wie Keithley 617 daneben mit den gleichen Messunsicherheiten wie die Quelle genutzt werden, da auflösungsbedingt mit keinen zusätzlichen Einflüssen zu rechnen ist.

Wenn die Unsicherheit der Zeitkonstante des Rechteckimpulses ($\leq 10 \mu\text{s}$) und der Einfluss der Anstiegszeit (Differenz Anstiegs- zu Abfallzeit $\leq 100 \mu\text{s}$) klein genug gehalten werden kann, gilt mit der relativen Unsicherheit der Kalibrierstromstärke $W_{I,in}$ für die gesamte Messunsicherheit der Ladungserzeugung $U(Q)$

$$U(Q) = W_{I,in} \cdot Q$$

an Hochohmdekade (indirekte Erzeugung)

Alternativ zur Stromstärkeerzeugung mit dem Keithley 263 können kleine Stromstärken auch mit Hochohmwiderständen im Verbund mit einer Konstantspannungsquelle erzeugt werden. Dazu müssen die Spannungsquelle, der Hochohmwiderstand und das Stromstärkemessgerät in Reihe geschaltet werden. Der Innenwiderstand des Strommessgeräts muss dabei im Vergleich zum Wert des Hochohmwiderstands vernachlässigbar sein. Der Verbund aus Spannungsquelle und Hochohmwiderstand kann als Stromquelle aufgefasst werden, welche den Strom $I = \frac{U}{R}$ liefert. Mit $100 \text{ V} \leq U \leq 1000 \text{ V}$ und $100 \text{ M}\Omega \leq R \leq 100 \text{ T}\Omega$ können somit Stromstärken von 1 pA bis 10 μA erzeugt werden. Als Hochohmwiderstand kann z. B. die Widerstandsdekade IET Labs VRS-100-10-1K-BP (esz-ID: 001704) verwendet werden, für welche spannungsabhängige Korrekturwerte bekannt und kleine Messunsicherheiten im Widerstandsbereich erzielbar sind. Als Spannungsquelle empfiehlt sich die Verwendung eines Kalibrators des Modelltyps Fluke 57xxA bzw. 55xxA, dessen Ausgangsspannung durch Beschaltung mit konstanter 10 M Ω Last stabilisiert werden kann.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	8 von 1

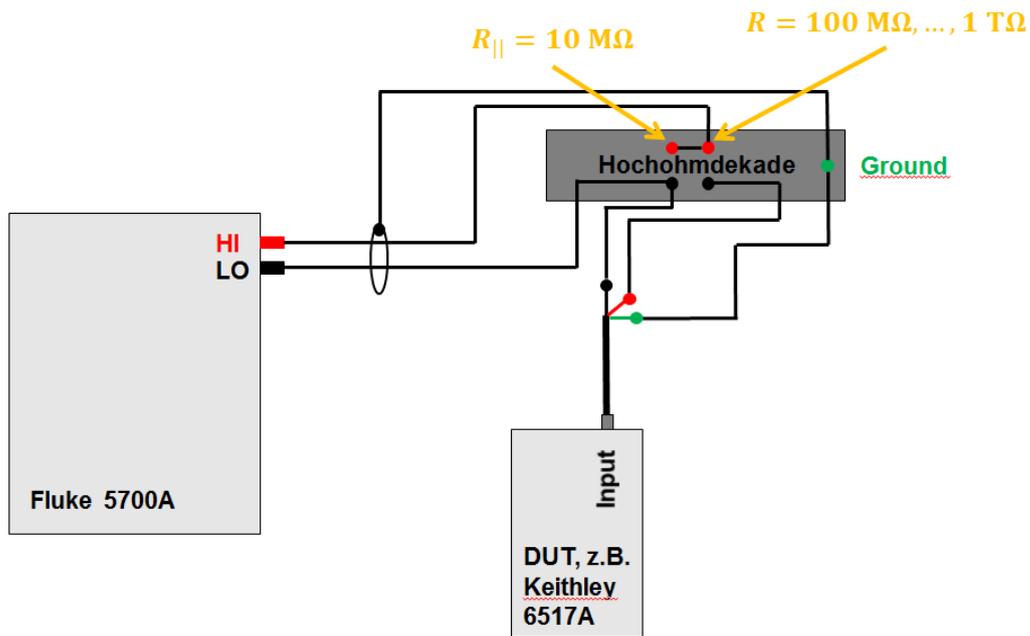
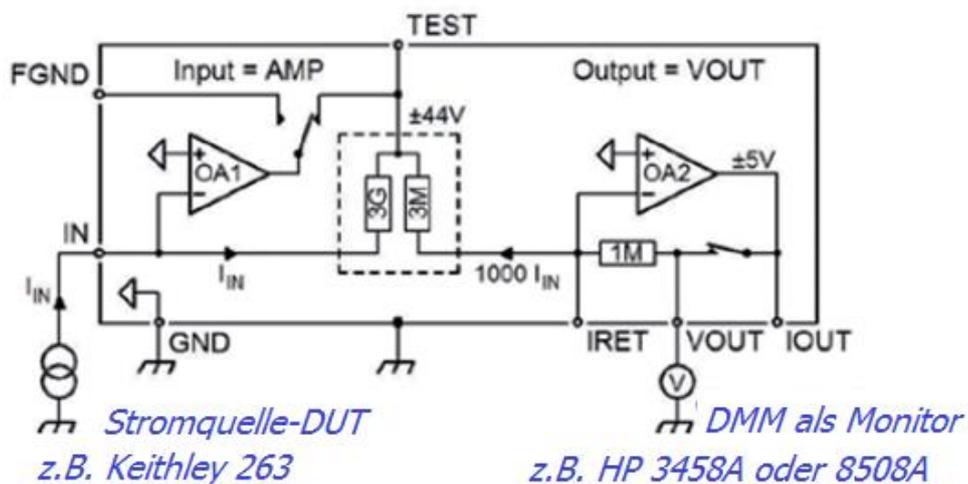


Bild III.5 indirekte Erzeugung kleiner Stromstärken

Mit ULCA (Ultrastable Low-noise Current Amplifier), gemonitorter Ausgang

Das Bezugsnormal ULCA (engl. Ultrastable Low-noise Current Amplifier) ist als Bezugsnormal für Kleinströme (1 pA bis 1 μA) zu verwenden. Bei diesem Instrument handelt es sich um einen ultrastabilen, rauscharmen Stromverstärker/-wandler für die höchstpräzise Messung und Erzeugung von kleinen Stromstärken im Bereich ±5 μA. Das ULCA-Prinzip entspricht in seiner Theorie dem eines Transimpedanz-Verstärkers, also der Wandlung eines Eingangsstroms I in eine über die Transimpedanz Z proportionale Ausgangsspannung U . Das Messinstrument ULCA verfügt über insgesamt vier unterschiedliche Betriebsmodi – es kann zur Strommessung und Stromerzeugung sowohl im normal mode ($I \leq 5 \text{ nA}$) als auch im extended mode ($5 \text{ nA} \leq I \leq 5 \text{ μA}$) betrieben werden. Grundsätzlich wird der ULCA hierfür „von außen“ über seine SMA-Buchsen beschalten und über seine Batteriebox, respektive den Input/Output Schaltern, angesteuert. Die zu messende bzw. erzeugende Stromstärke wird unabhängig der Modi mit einem geeigneten Präzisions-Digitalmultimeter (z.B. HP 3458A oder Fluke 8508A) verifiziert. Abhängig vom ULCA-Betriebsmodus muss die am DMM gemessene Spannung unter Berücksichtigung der jeweiligen ULCA-Konfigurations-Formel auf den zu kalibrierenden Stromwert zurück berechnet werden. Die Verwendung des Gerätes ist in Arbeitsanweisung „[AA0360-Kleinststromkalibrierung mit ULCA](#)“ beschrieben.



Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	9 von 1

III.1.3 Ohmmeter

Fluke 5700A

Die Kalibrierung von Ohmmetern (Widerstandsmessgeräte) erfolgt z.B. durch direkte Messung an einem Kalibrator wie Fluke 5700A oder kalibrierten Festwiderständen. Der Kalibrierschein enthält Messwerte für jeden Bereichsendwert und den Nullpunkt des Kalibriergegenstandes. Soweit sinnvoll kann auch die Linearität des Ohmmeters bestimmt werden.

Für den Anschluss des Kalibriergegenstandes werden Spezialleitungen z. B. von Fluke (geschirmte Leitung, Spezialstecker mit geringer Thermospannung) verwendet. Wenn vorhanden wird der Guard-Anschluss des Ohmmeters mit dem Kalibrator verbunden, die Verbindung von Guard zur Erde erfolgt wie bei der Kalibrierung von Voltmetern.

Ohmmeter sind in der Regel mit Vierdrahtanschluss ausgestattet (Bild III.3a). Die Stromquelle des Kalibriergegenstandes wird dazu mit den SOURCE-Anschlüssen des Kalibrators verbunden, die Sense-Leitungen von Messgerät und Normal werden ebenfalls miteinander verbunden. Um die Leitungswiderstände zu kompensieren kann auch bei Geräten mit Zweidrahtmessung die SENSE-Leitung des Kalibrators am Kalibriergegenstand mit den SOURCE-Leitungen verbunden werden und der Kalibrator mit EX SNS auf den Vierdrahtbetrieb umgestellt werden. Zusätzlich bietet das Gerät für Widerstände bis 19 kΩ die Funktion 2-Wire-Compensation, mit der der Einfluss der Anschlussleitungen weiter reduziert werden kann.

Abweichungen von diesem Anschluss sind nur dann zulässig, wenn der Hersteller des Kalibriergegenstandes andere Messaufbauten vorschlägt oder im aktuellen Kalibrierschein andere Angaben gemacht werden. In jedem Fall wird im Kalibrierschein notiert, wie der Kalibriergegenstand am Normal angeschlossen wurde.

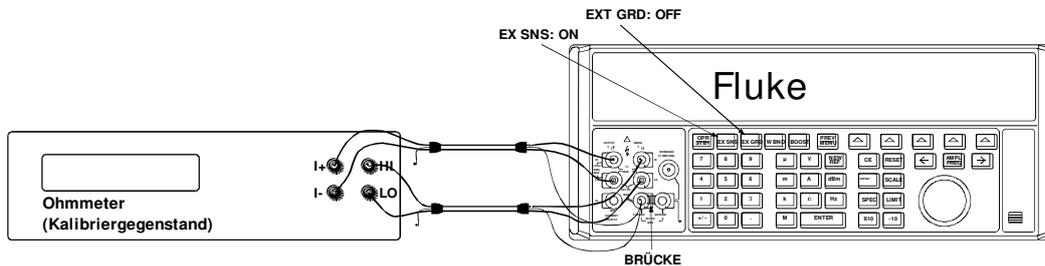


Bild III.3a Kalibrierung von Widerstandsmessgeräten

Für den Nullpunkt von Widerstandsmessgeräten mit kommerziellen Kurzschlussbügeln wurde eine Messreihe zur Abschätzung der Rest-Widerstände durchgeführt:

Durchgangswiderstand bei 1A	R_{Short}
KS4, schwarz, versilbert	0,16 mΩ
Kupferbügel 2	0,36 mΩ
KS1, grau, vergoldet	0,22 mΩ
Kupferbügel, poliert	0,22 mΩ

Da mit dem Zweidrahtverfahren kein Wert gleich Null erzielt werden kann wird von einem u-förmigen Unsicherheitsintervall innerhalb des beobachteten Maximums ausgegangen:

$$U_{Zero,\Omega} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\max(R_{Short})}{\sqrt{2}}\right)^2} = 0,51 \text{ m}\Omega$$

Diese Unsicherheit lässt sich unter der Annahme einer speziellen ZERO-Prozedur oder bei 4-Draht-Messung sogar noch weiter verkleinern: Schaltet das Ohmmeter seine Konstantstromquelle bei der Nullmessung aus und kompensiert mit einem Kurzschluss lediglich einen Spannungsoffset, so ergibt

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	10 von 1

sich die Unsicherheit lediglich aus der Unsicherheit der Nullspannung im Verhältnis zur Messstromstärke im kleinsten Bereich. Bei einer typischen Stromstärke von 100 mA ergibt sich somit

$$U(R) = \frac{U(0V)}{100\text{ mA}} = \frac{0,035\ \mu\text{V}}{100\text{ mA}} = 0,35\ \mu\Omega$$

Sofern vom Hersteller nicht anders angegeben gilt: Der Offset der 4-Draht-Widerstandsbereiche von Digitalmultimetern sollte idealerweise über einen 3-fach-Kurzschluss gemessen oder korrigiert werden. Wird ein 4-fach-Kurzschluss verwendet, also alle Hi-Lo, SenseLo-Lo UND SenseHi-Hi kurzgeschlossen wird der Spannungsabfall über dem Kurzschluss an Hi-Lo ebenfalls gemessen und kann das Ergebnis verfälschen. Der Restwiderstand eines einfachen Kurzschlussbügels kann dabei wie oben genannt bis zu 500 µOhm betragen. Vermieden wird dies durch den 3-fach-Kurzschluss (also alle Hi-Lo und nur SenseLo-Lo sind kurzgeschlossen, siehe Bild). In diesem Fall fließt der Strom über den Restwiderstand des Kurzschlusses, jedoch wird die daran abfallende Spannung nicht dem Messeingang an Sense zugeführt.

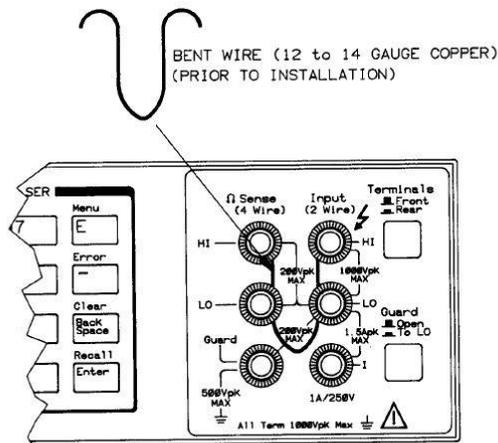


Figure 1. 4-Terminal Short

3-fach Kurzschluss für 4-Draht-Widerstandsbereich

Da manche Messobjekte auch die Offset-Korrektur von Induktivität und Kapazität mit einem Kurzschluss bzw. Leerlauf erfordern, wurde anhand der am LCR-Messgerät gemessenen Restkapazität bzw. -Induktivität ein möglicher Einfluss aus den gemessenen Maximalwerten bestimmt (Rechteckverteilung):

Kurzschluss, typisch			Unsicherheit, k=2
Kapazität, OPEN, ca. 2 cm Abstand	10	kHz	0,2 pF
Induktivität, SHORT, ca. 2 cm	10	kHz	0,03 µH

Fluke 742A

Bei der Kalibrierung von Ohmmetern oder Kalibratoren mittels den Fluke 742A Referenzwiderständen sind die im Kalibrierschein gemessenen Werte und Bedingungen einzuhalten. Der Anschluss erfolgt prinzipiell genauso wie oben, s. auch Bild III.3b, für Mittelwertbildung empfiehlt sich die Messstromstärke mindestens einmal umzupolen bzw. der Betrieb von Ohmmetern mit einer Offset-Kompensation, z.B. OCOMP am HP 3458A.

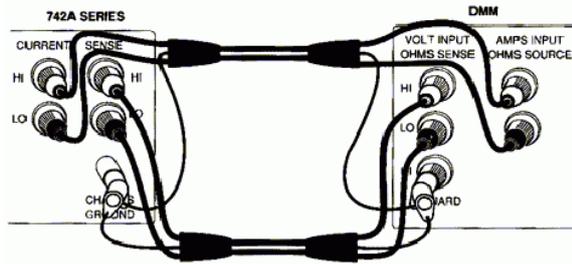


Bild III.3b Ohmmeter an Fluke-Referenzwiderstand (Vierdrahtmessung)

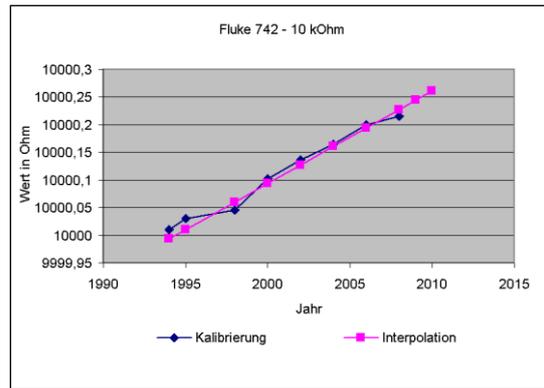


Bild III.3c Historie des 10 kOhm-Widerstandes. Die Messunsicherheitsbetrachtung berücksichtigt die maximale Differenz zwischen Interpolation und Messung

Hochohmwiderstände als Normal

An Festwiderständen ist die Kalibrierung von (Tera-) Ohmmetern bis 100 TΩ möglich. Die Anschlüsse liegen dabei auf zwei 4mm-Buchsen oder den Innenleitern von je zwei BNC- oder Typ-N-Buchsen, so dass für hohe Widerstände eine geschirmte Leitungsführung und eine Schirmung des Gehäuses möglich sind. Dazu wird die Gehäuseklemme mit einem geerdeten Punkt des Messaufbaus oder, soweit vorhanden, dem GUARD-Anschluss des Kalibriergegenstandes verbunden. Der genaue Wert der einzelnen Festwiderstände wird dem aktuellen Kalibrierschein entnommen. Durch die Auswertung der Drift im Zeitraum kann des Weiteren eine genäherte Hochrechnung über den Kalibrierwert zum aktuellen Zeitpunkt getroffen werden (s. Bild III.5).

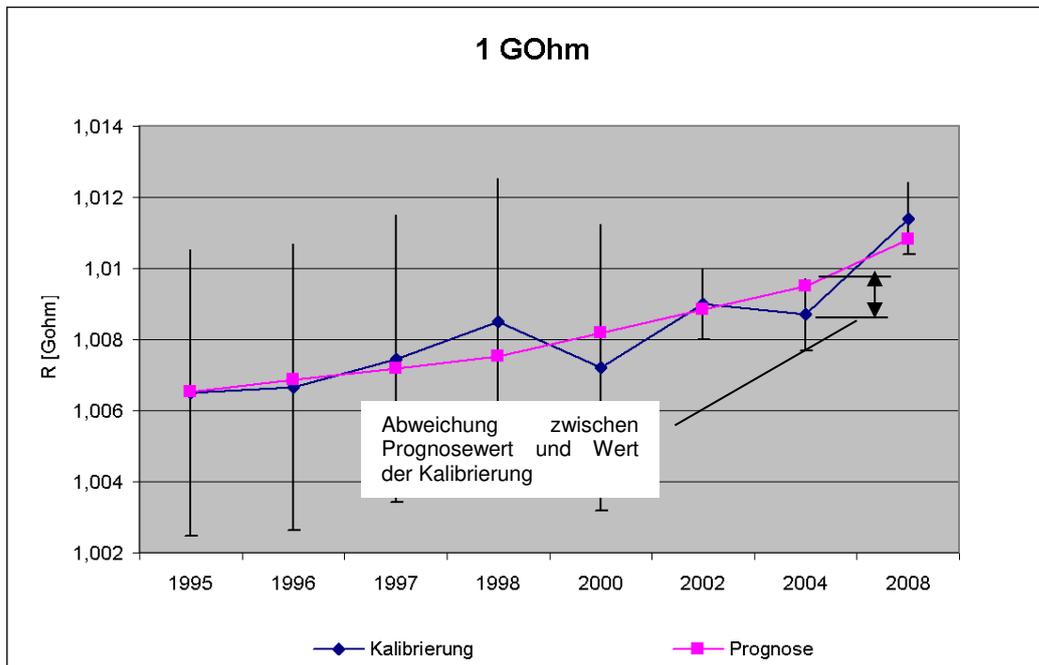


Bild III.5 beispielhafte Historie eines 1 GΩ-Normals bis 2008

Die Messergebnisse sind bezogen auf die Kalibrierung mit konstanter Spannung wie $U_{mess}=100\text{ V}$ am Normalwiderstand. Im gezeigten Beispiel ergibt der Vergleich der Näherung mit den Werten der Kalibrierung (Doppelpfeil) Differenzen zwischen $7,5 \cdot 10^{-5}$ und $1,5 \cdot 10^{-3}$ von Prognosewert und dem Wert der Kalibrierung. Der mittlere Abweichungsbetrag der langjährigen Betrachtung liefert beispielsweise $7,3 \cdot 10^{-4}$ und wird als 1σ -Intervall (Normalverteilung) angenommen (s. Tabelle III.1) und in der

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	12 von 1

Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt. Ist noch keine genaue Historie und Prognose bekannt werden die Angaben des Herstellers als unbekanntes Driftintervall verwendet.

Um Informationen des Spannungseinflusses der Widerstände zu gewinnen sind mindestens zwei Stützwerte (z.B. 100 V und 1000 V) bekannt, aus denen die Grenzen der Spannungsabhängigkeit für den schlechtesten Fall abgeleitet werden.

Die präzise Kalibrierung von Tera-Ohmmetern ist dabei nur mit geschirmten Leitungen (z.B. auf gleicher Anschlussebene, BNC) und geringer Umgebungsluftfeuchte <55% sinnvoll. Ungeschirmte Leitungsführungen sind mit erhöhten Messunsicherheiten zu berücksichtigen, Vergleichsmessungen mit eigenen Instrumenten (Keithley 617, Elektrometer) und ungeschirmten Konnektoren ergaben stabile, ablesbare Messergebnisse bis 100 TΩ. Gute Messgeräte liefern reproduzierbare Werte im Bereich von 0,1% bis 1%.

Daneben wurden signifikante Verbesserungen der Messverfahren im Teraohmbereich durch Durchführung der Kalibrierung in Eigenbau-Schirmkammern (s. Kapitel IV.4) festgestellt. D.h. die Messung erfolgt in halb-geschirmten Alukammern (ca. 0,7 x 1 x 2m, Kammerwand geerdet). Durch automatische Messdatenerfassung (IEEE-Bus), Kameras, bzw. eine Weitwinkellinse in der Kammerwand, kann der Messaufbau beobachtet und die Messwerte abgelesen werden. Daneben kann durch Einbringen von Salzkristall-Entfeuchtern in der Kammer die Luftfeuchte im Messvolumen weit genug gesenkt werden.

III.1.4 Multimeter

Multimeter werden entsprechend ihrer Messfunktionen nach den Anweisungen für Voltmeter, Amperemeter und Ohmmeter gemäß Werksrichtlinie AA0097 angelehnt an die Richtlinie **VDI/ VDE DGQ/ DKD 2622-Blatt 3** kalibriert. Der Kalibrierschein enthält Messwerte für Bereichsendwert, Linearität, Symmetrie und Nullpunkt des Kalibriergegenstandes.

III.1.5 Fluke 57xxA Artefaktgleich, Drift und Historie (informativ)

Neben der regelmäßigen "externen" Kalibrierung liefern der Artefaktgleich und die Möglichkeiten des sog. "Calibration Check" der Kalibratoren der Serie Fluke 57xxA sehr praktikable Möglichkeiten die Unsicherheiten im Labor kontinuierlich zu überwachen und klein zu halten. Aus Publikationen wie SAS Dokument Nr. 212.dw der Schweizer Akkreditierungsstelle SAS "*Richtlinien für die Anwendung der Artefaktkalibrierung beim Multifunktionskalibrator Fluke 5700 in den akkreditierten Kalibrierlaboratorien*" oder "*Artifact Calibration: An Evaluation of the Fluke 5700A Series II Calibrator*" des Van Swinden Laboratoriums (NMI-VSL, Niederlande), der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB, Deutschland) und des Swedish National Testing and Research Institute (SP, Schweden) und den eigenen Untersuchungen sind wesentliche Eigenschaften dieser Geräte bekannt und ableitbar. Auch wurde die Historie der meisten im Labor eingesetzten Geräte untersucht, so dass bekannt ist wie sich die individuellen Geräte unter überwachten Bedingungen im Gegensatz zur Serie verhalten. Somit können die vom Hersteller genannten Intervallgrenzen für die Performanz der gesamten Serie zum Teil deutlich unterschritten werden. Zusammen mit dem Artefaktgleich können somit die Geräte auch zwischen den Kalibrierungen mit sehr kleinen Unsicherheiten betrieben werden. Zusätzlich liefert der "Calibration Check", der min. alle 3 Monate durchgeführt wird, Aussagen über eine mögliche Verschiebung seit dem letzten Abgleich oder der letzten Kalibrierung. Dies sei dann ausgeschlossen, wenn die selbst gemessene maximale Lage im Toleranzfeld <75% der eigenen Spezifikation beträgt. Mit den u.g. Untersuchungen kann gezeigt werden, dass der Artefaktgleich die Rückführkette nicht zerstört, sondern diese verstärkt. In der Regel sollten ein oder zwei vollständige externe Kalibrierungen ausreichen, um ein individuelles Gerät einer Serie zu charakterisieren. Dann kann bereits neben dem Langzeitverhalten auf die Qualität der Ausgangswerte ("Nominalwertabweichung") nach erneutem Artefaktgleich oder auf Frequenzgänge und Erfolg der Selbstcharakterisierung geschlossen werden. Kalibrierintervalle lassen sich auf diese Weise zusammen mit einem regelmäßigem Calibration Check erhöhen, ohne das Vertrauen in Mess- oder Korrekturwerte zu verlieren. Die Einhaltung der Hersteller-Gerätespezifikation wird nach jedem Abgleich garantiert, sofern dieses Verhalten bereits ein einziges Mal nachgewiesen werden konnte. Daneben lässt sich mit der Untersuchung von mehreren Abgleichen individuelle Geräte so etwas wie

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	13 von 1

eigendefinierte Spezifikationsintervalle für die einzelnen Bereiche ermitteln und die Unsicherheiten individuell angeben und verkleinern.

III.1.5.1 Gleichspannung

Die umfangreichen Untersuchungen der Reproduktion (Gedächtnis) des Abgleichs und den Abweichungen vom eingestellten Wert an dem regelmäßig abgeglichenen und extern kalibrierten Gerät und den Untersuchungen der internen Laborgeräte zeigen:

- Artefaktgleich eliminiert Abweichungen auf kleiner $1\mu\text{V/V}$ (zzgl. $0,3\mu\text{V}$ thermoelektrische Residuen)
- Artefaktgleich „transportiert“ Zener-Unsicherheit auf den Bereich bis 1000 V
- Reproduktion der Korrektionswerte besser $1,5\mu\text{V/V}$ bis $2\mu\text{V/V}$ (95% Überdeckung)
- Linearität $<1\mu\text{V/V}$ über alle Bereiche
- mittlere Drift aller untersuchten Geräte, alle Bereiche $<1,5\mu\text{V/V}$ p.a.

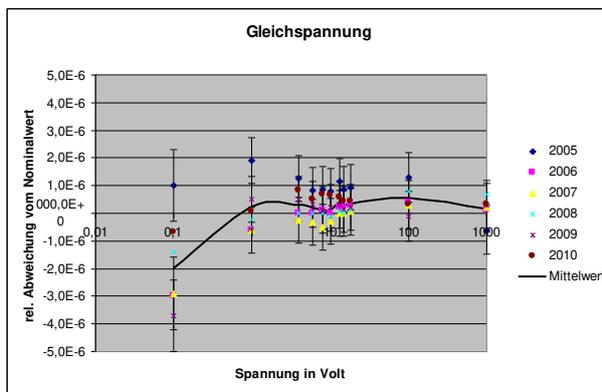


Bild III.1.5.1.1 gemessene und mittlere Abweichung vom eingestellten Wert

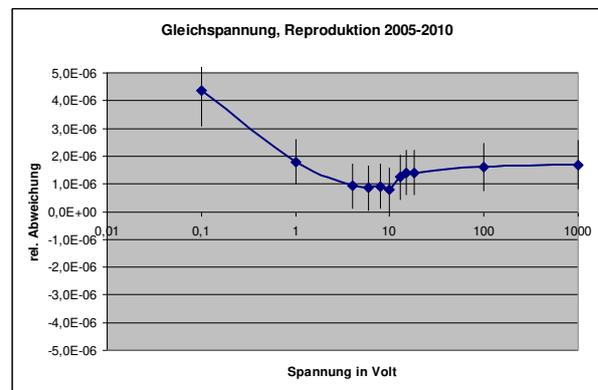


Bild III.1.5.1.2 Wiederholbarkeit (mit Kalibrierunsicherheit) des Korrekturwertes nach Artefaktgleich ($k=2$)

Die exzellente Performanz im Gleichspannungsbereich ist auf die hohe Qualität des eingebauten Teilers der Geräteserie zurückzuführen, die der eines Kelvin-Varley-Teilers nahe kommt bzw. entspricht. Die Abgleichroutine ist an metrologische Methoden angepasst und liefert mit der hervorragenden Linearität sehr gute Ergebnisse über die komplette dargestellte Wertespanne. Es wurde beobachtet, dass die Unsicherheit der Abgleichspannung der verwendeten Zener-Referenz quasi auf das Gerät „übertragbar“ ist, typischerweise sind Unsicherheiten besser als $2\mu\text{V/V}$ erzielbar. Ausgewählte Geräte unter Laborbedingungen ($23\text{ }^\circ\text{C}$, Dauerbetrieb), erzielen Driften, die denen von 10 V-Referenzen entsprechen, so dass kaum mit einer Verschlechterung der Ausgangswerte zu rechnen ist.

III.1.5.2 Gleichstromstärke

Die Gleichstromstärkesynthese, deren Rückführung und Abgleich entsprechen in hohem Maß ebenfalls metrologischen Methoden. Die Ausgangsstromstärke wird dabei zusammen über Spannungsreferenzen und die eingebauten Festwiderstände justiert und validiert. Sowohl die Qualität dieser Referenzen als auch die der gesamten Widerstandsreihe ist in der Regel so gut, dass Verschiebungen der Ausgangswerte (Driften) bei ausgewählten Geräten der Serie fast nicht messbar sind. Selbst bei sehr kleinen und bei hohen Ausgangsstromstärken werden dauerhaft Unsicherheiten erzielt, die denen klassischer Aufbauten (z.B. potentiometrische Verfahren, Stromteiler) entsprechen.

Zusammengefasst kann für ausgewählte Geräte gezeigt werden:

- Artefaktgleich eliminiert Abweichungen auf kleiner $5\mu\text{A/A}$ (bzw. $10\mu\text{A/A}$ bei 1A)
- Reproduktion der Korrektionswerte besser $11\mu\text{A/A}$, 95% Überdeckung
- Artefaktgleich in der Größenordnung der Verifikations-MU ($8\mu\text{A/A}$)
- Linearität $<8\mu\text{A/A}$ bis 1 A
- mittlere Drift aller untersuchten Geräte, alle Bereiche $<8\mu\text{A/A}$ p.a.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	14 von 1

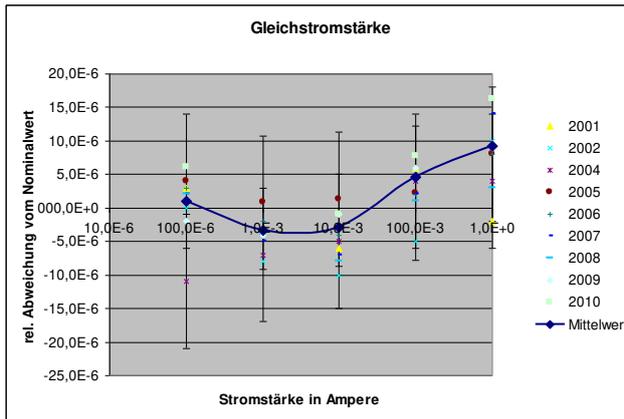


Bild III.1.5.2.1 gemessene und mittlere Abweichung vom eingestellten Wert

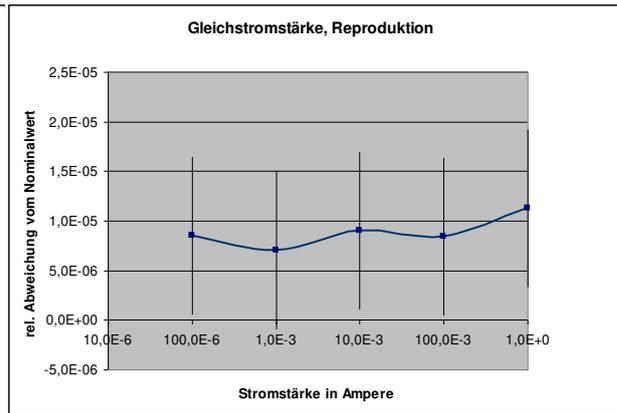


Bild III.1.5.2.2 Wiederholbarkeit (mit Kalibrierunsicherheit) des Korrekturwertes nach Artefaktabgleich (k=2)

III.1.5.3 Wechselfspannung

Für den Wechselfspannungsabgleich und die –synthese werden interne Thermokonverter eingesetzt, deren Eigenschaften mindestens einmalig durch eine externe Kalibrierung rückgeführt und nachgewiesen werden müssen. Da diese Bauelemente jedoch kaum einer Alterung unterliegen, kann gezeigt und sogar garantiert werden, dass die Ausgangswerte sich über die Lebensdauer des Gerätes (fast) nicht verändern. Dies gilt in jedem Fall in einem Frequenzbereich bis 100 kHz, darüber reagieren die Geräte z.T. aufgrund unterschiedlicher Last am Ausgang mit unterschiedlichem Regelverhalten der Ausgangsspannung. Dass sich das Verhalten oder die internen Bauteile ändern ist jedoch konstruktionsbedingt auszuschließen.

Zusammengefasst:

- Artefaktabgleich eliminiert Abweichungen bis 100 kHz
- vernachlässigbarer Frequenzverlauf zwischen 40 Hz und 100 kHz
- Reproduktion der Korrekturwerte bis 100 kHz besser als die Messunsicherheit: z.B. 9 µV/V (20 Hz bis 70 kHz), 95% Überdeckung
- >100 kHz werden Korrekturwerte besser als (0,8 µV/V + 5 nV)/ kHz wiederhergestellt
- >100 kHz wird min. die Spezifikation garantiert
- mittlere Driften / gemessene "Verschiebungen" aller untersuchten Geräte meist kleiner als die Messunsicherheit:

Frequenzbereich Spannungsbereich	10 Hz bis 40 Hz	>40 Hz bis 100 kHz	>100 kHz bis 1 MHz
2,2 mV	0,42 mV/V	0,63 mV/V	
22 mV	0,42 mV/V	88 µV/V	
220 mV	78 µV/V	40 µV/V	0,32 mV/V
2,2 V	20 µV/V	13 µV/V	0,36 mV/V
22 V	21 µV/V	9,3 µV/V	0,54 mV/V
220 V	8,7 µV/V	15 µV/V	
1000 V		31 µV/V	

Tabelle III.1.5.3.1 mittlere Driften aller untersuchten Geräte (zusammengefasste Frequenzbereiche)

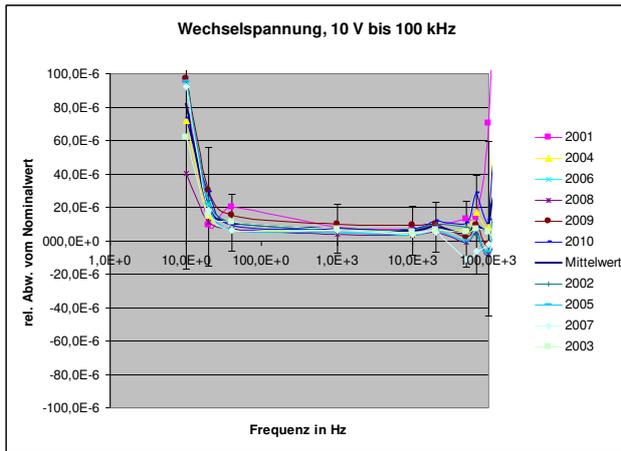


Bild III.1.5.3.1 gemessene und mittlere Abweichung vom eingestellten Wert im "flachen Frequenzband" bis 100 kHz

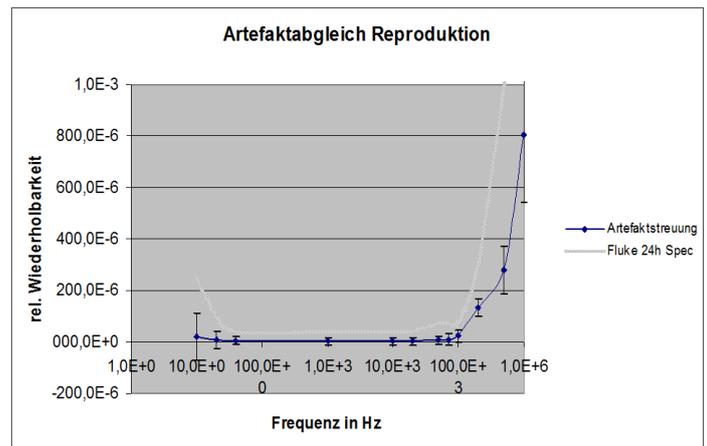


Bild III.1.5.3.2 Wiederholbarkeit (mit Kalibrierunsicherheit) des Korrekturwertes nach Artefaktgleich ($k=2$)

III.1.5.4 Wechselstromstärke

Der Wechselstromstärkeabgleich und die –Synthese erfolgen i.d.R. deutlich besser als spezifiziert. Auch hier ist jedoch mindestens eine externe Kalibrierung erforderlich um ein Gerät einer Serie rückzuführen und zu charakterisieren. Der größte Einfluss ist hier allerdings aufgrund der angeschlossenen Last im Betrieb zu erkennen, so dass die Ausgangsstromstärke unter identischen Bedingungen zwar sehr reproduzierbar ist, jedoch die Unsicherheit abhängig von Anschlusstechnik und Leitungstyp- und -führung ist. Auch ist die induktive Last des Kalibriergegenstandes als Einflussgröße ist zu beachten. Die Untersuchungen der einzelnen Geräte der Serie zeigten folgendes:

- Artefaktgleich eliminiert Abweichungen bis 1 kHz
- Reproduktion der Korrekturwerte besser als $25 \mu\text{A/A}$ (95% Überdeckung, 40 Hz bis 10 kHz)
- mittlere Driften / gemessene "Verschiebungen" aller untersuchten Geräte kleiner als die Messunsicherheit:

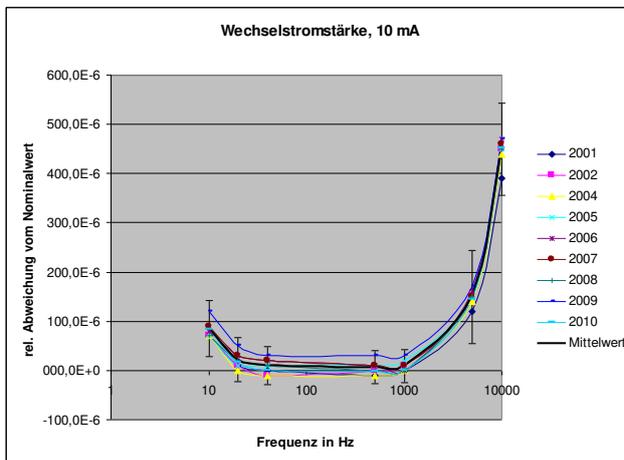


Bild III.1.5.4.1 gemessene und mittlere Abweichung vom eingestellten Wert im "flachen Frequenzband" bis 100 kHz

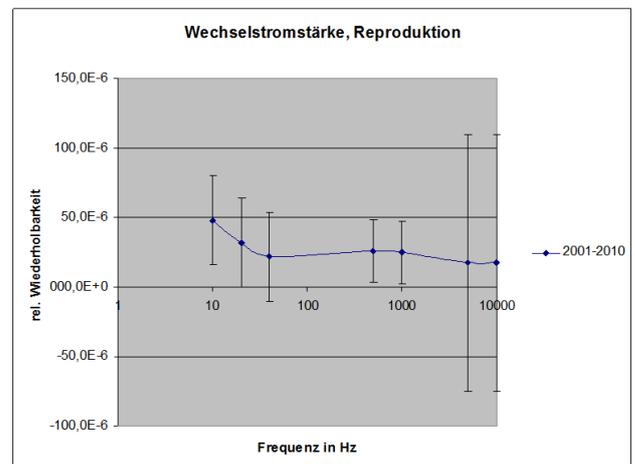


Bild III.1.5.4.2 Wiederholbarkeit (mit Kalibrierunsicherheit) des Korrekturwertes nach Artefaktgleich ($k=2$)

III.1.5.5 Gleichstromwiderstand

Die Gleichstromwiderstände und Referenzen haben unter Laborbedingungen eine erstaunliche Qualität. Oft funktioniert auch die interne Charakterisierung und der Abgleich besser als manch externe Kalibrierung mit Standardmethoden.

- (Selbst-)Charakterisierung erfolgt bis $<1 \text{ M}\Omega$ besser als $3 \mu\Omega/\Omega + 50 \mu\Omega$
- Darüber ca. $10 \mu\Omega/\Omega + 4 \mu\Omega/\Omega / 10 \text{ M}\Omega$
- mittlere Driften aller untersuchten Geräte $7,4 \mu\Omega/\Omega$ bis $1,9 \text{ M}\Omega$ bzw. $20 \mu\Omega/\Omega$ darüber

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	16 von 1

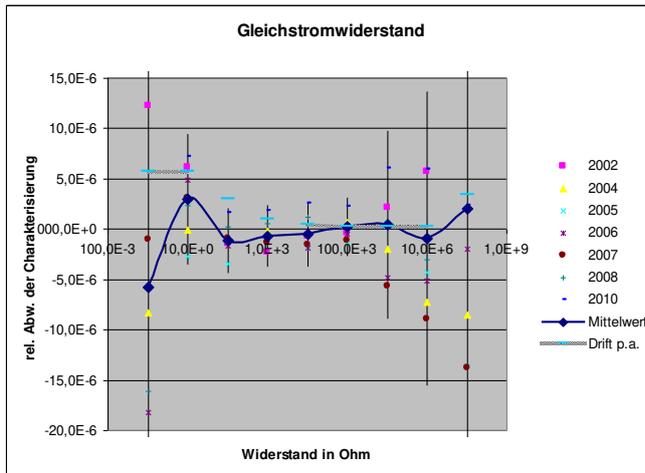


Bild III.1.5.5.1 gemessene und mittlere Abweichung vom charakterisierten Wert im "flachen Frequenzband" bis 100 kHz

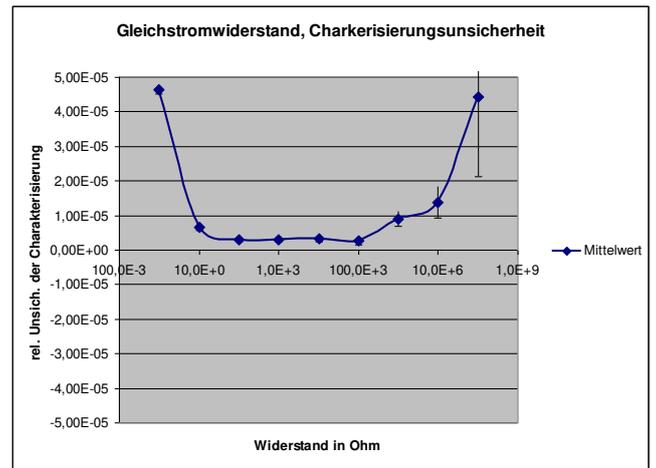


Bild III.1.5.5.2 Charakterisierungsunsicherheit (mit Kalibrierunsicherheit) des Korrekturwertes nach Artefaktabgleich (k=2)

III.1.6 Interpolation von Korrekturwerten zwischen bekannten Stützwerten

Jede Kalibrierung eines dynamisch abstimmbaren Normals hat den Nachteil, dass immer nur ausgewählte Einzelpunkte der Geräte (Stützpunkte) über den Betriebsbereich kalibriert und rückgeführt werden können. Soll ein solches Normal jedoch über den gesamten Betriebsbereich eingesetzt werden, sind Methoden erforderlich, die es ermöglichen die Korrekturwerte zwischen den Stützpunkten zu ermitteln oder abzuschätzen. Eine Näherung kann nach einem erfolgreichen Konformitätsnachweis natürlich die Anwendung der Herstellerspezifikation sein, d.h. wurde die nominelle Abweichung innerhalb der Spezifikation an einzelnen Punkten nachgewiesen wird angenommen, dass an allen abstimmbaren Punkten im Betriebsbereich diese Grenzen eingehalten werden. Diese Methode kann aber dazu führen, dass Messunsicherheiten (z.T. deutlich) überschätzt werden, gerade dann wenn einzelne Geräte besser arbeiten als die vom Hersteller getroffene schlechteste Annahme für die gesamte Serie. Auch wird damit immer nur die maximale Nominalwertabweichung beschrieben und nicht die tatsächlichen, richtigen Werte zwischen einzelnen Stützpunkten. Eine Alternative stellt daher die Korrekturwertinterpolation dar, so wie diese in anderen Fachbereichen, z.B. der Thermometrie bei der Kennlinienbestimmung von Widerstandsthermometern, der Polynomcharakterisierung von Kraftmessgeräten oder Druckaufnehmern, ebenfalls üblich ist. Aus bekannten Stützpunkten im Betriebsbereich wird, z.B. über die Methode der kleinsten Quadrate (sehr einfach durchführbar über die Trendberechnung in Microsoft Excel: Funktion RGP), eine lineare, polynomische oder passende Kennlinie bestimmt. Diese Kennlinie ergibt dann Grenzen der Interpolationsunsicherheit als maximale Abweichung der Stützpunkte von der daraus interpolierten Kurve. Ein signifikantes Vertrauensniveau sei dann erreicht, wenn mindestens $n+2$ (empfohlen jedoch $2n + 1$)² Stützpunkte zur Kontrolle zur Verfügung stehen. n sei der Grad der Kennlinienfunktion. Eine "quadratische" Polynomapproximation des Grades $n=2$ erfordert also mindestens fünf Kontrollpunkte über den zu interpolierenden Wertebereich, eine lineare Regression ohne konstantes Glied kann jedoch bereits mit zwei Stützpunkten (einer zur Ermittlung der Steigung, der zweite zur Kontrolle) durchgeführt werden.

Das u. g. Beispiel zeigt die bekannten Stützwerte und die daraus ermittelte Kennlinie eines Gleichspannungsnormals. Das Normal wurde an den Stützpunkten bei 10 %, 50 % und 100 % des Bereichsendwertes kalibriert und mit Korrekturwerten charakterisiert. Für einen flexiblen Einsatz über den gesamten Bereich z.B. auch bei 30 %, 60 % oder 90 % eignet sich eine Korrektur-Kennlinie als linearer Trend (lineare Regression) für die Interpolation von Zwischenwerten³. Die maximal mögliche Abweichung der Interpolation von den bekannten Stützwerten wird dabei in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt.

² vgl. DKD-R 5-6, Bestimmung von Thermometerkennlinien, Abs. 2.2.2

³ <http://dmsserver/technik/Tools/Interpolationsformeln-lin.Reg.-Vorlage.xlsx>

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	17 von 1

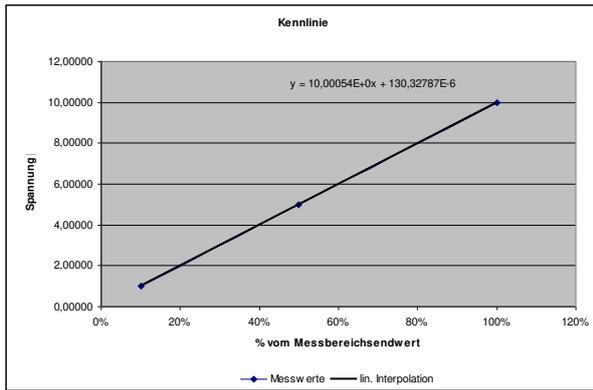


Abb. III.1.6.1 kalibrierte und interpolierte Kennlinie des Normals

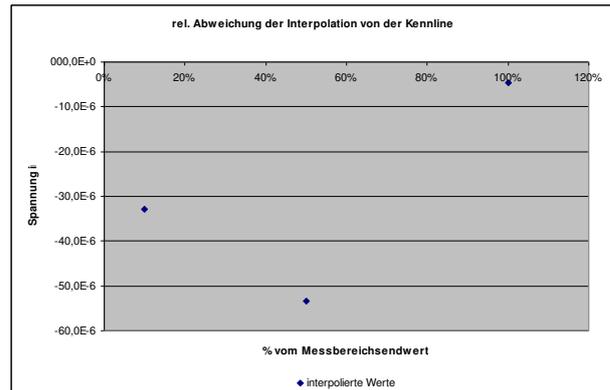


Abb. III.1.6.2 Differenz zwischen interpolierten Werten und den bekannten Stützpunkten

Die Differenz zwischen der Interpolation und den Stützpunkten stellt dabei zunächst eine systematische, bekannte Abweichung dar. In der Messunsicherheitsbilanz ist es jedoch zweckmäßig, die maximale Differenz als Halbbreite eine Rechteckverteilung anzunehmen. Sofern sich jedoch zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit für die Abweichung der Interpolation in eine bestimmte Richtung größer ist, kann auch die Näherung über eine U-Verteilung nötig sein.

Diese Methode kann jedoch immer nur Korrekturwerte über „einen“ Parameter liefern, d.h. im Gleichspannungs- oder Gleichstromstärkebereich kann über den vollständigen Wertebereich interpoliert werden, in den Wechselbereichen ist nur die Interpolation über den Parameter „Frequenz“ möglich, da sonst ein dichtes Raster an Kontrollwerten mit z.B. variabler Frequenz und Spannung über den gesamten Wertebereich gelegt werden müsste. Das Verfahren wird beispielsweise dann eingesetzt, um die Ausgangswerte der Kalibratoren der Serie Fluke 57xxA zu interpolieren, wobei die fast ideale Kennlinie dieser Geräte eine Berechnung anhand von Steigung und konstantem Glied fast überflüssig macht, da bereits aus einem einzigen Stützpunkt auf alle übrigen Ausgangswerte mit vernachlässigbarer Interpolationsunsicherheit geschlossen werden kann. In den Wechselbereichen sind die kleinsten Interpolationsunsicherheiten im flachen Frequenzband zwischen 40 Hz und 100 kHz zu beobachten. Auch hier wird anhand von mindestens drei Punkten im Frequenzbereich versucht, die Korrekturwerte an Zwischenfrequenzen des gleichen Ausgangswertes (z. B. des gleichen Spannungspegels) zu ermitteln. Dabei ist jedoch zu beachten, dass natürlich keine Aussage an unterschiedlichen Ausgangsspannungen abweichender Frequenz getroffen werden kann. Zur Validierung dieser Methode wurde der Vergleich der Interpolationsabweichung über vier Kalibrierungen von Kalibratoren der Serie Fluke 57xxA durchgeführt. Davon sind drei Kalibrierungen von einem Kalibrator um die Stabilität dieser Methode zu zeigen und eine Kalibrierung von einem weiteren Kalibrator, um die Gültigkeit über die Serie zu bestätigen. Alle Kalibrierungen haben jeweils dieselben Stützpunkte. Die folgenden Bereiche wurden dabei eingeteilt:

Gleichspannung und Gleichstromstärke

- Alle Bereiche des Kalibrators der Serie Fluke 57xxA; positive und negative Gleichspannungen und Gleichstromstärken werden getrennt behandelt.

Wechselspannung (Interpolation zwischen den Frequenzen für definierte Nominalwerte)

- Für die Nominalwerte 2 mV, 10 mV, 100 mV, 1 V, 10 V und 100 V:
 - 10 Hz – 40 Hz
 - 40 Hz – 20 kHz
 - 20 kHz – 100 kHz
 - 100 kHz – 1 MHz (nicht für 100 V)
- Für die Nominalwerte 700 V und 1000 V:
 - 55 Hz – 1 kHz

Wechselstromstärke (Interpolation zwischen den Frequenzen für definierte Nominalwerte)

- Für die Nominalwerte 100 µA, 200 µA, 0,5 mA, 1 mA, 2 mA, 5 mA, 10 mA, 20 mA, 50 mA, 100 mA, 200 mA, 0,5 A, 1 A, 2 A:
 - 10 Hz – 1 kHz (für 0,5 A, 1 A und 2 A ab 20 Hz)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	18 von 1

- 1 kHz – 10 kHz

Verglichen wurde die rechteckverteilte Interpolationsunsicherheit, die sich aus der größten relativen Abweichung zur Ausgleichsgeraden ergibt. Es hat sich gezeigt, dass in allen Bereichen die Streuung der Interpolationsunsicherheit maximal der Größenordnung der Interpolationsunsicherheit selbst entspricht oder die Streuung nicht größer als die Größenordnung der berechneten Messunsicherheiten ist.

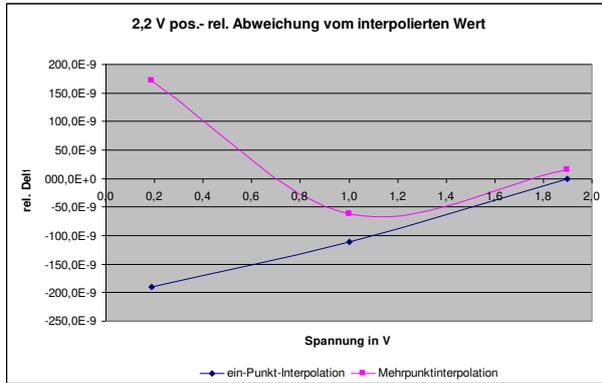


Abb. III.1.6.3 rel. Abweichungen (Linearitätsabweichung) im pos. 2,2 V Bereich. Aus drei Stützpunkten wurde eine lineare Kennlinie und deren Differenz zu den Kontrollpunkten ermittelt (rosa). Selbst die Ein-Punkt-Interpolation (blau) anhand des Messpunktes des Bereichsendwertes zeigt die exzellente Linearität der Ausgangsstufe. In beiden Fällen sind die Interpolationsunsicherheiten kleiner als 0,2 $\mu\text{V/V}$

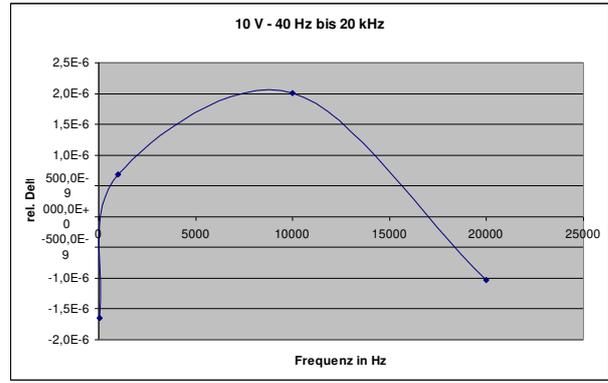


Abb. III.1.6.4 Beispiel für die Interpolation von Zwischenfrequenzen bis 20 kHz bei der Synthese von 10 V. Mit vier Stützwerten wurden die Zwischenfrequenzen linear genähert. Auch hier zeigt der flache Verlauf, dass eine Interpolation des Korrekturwertes von z.B. 10 V an Zwischenfrequenzen mit zusätzlichen Unsicherheiten von maximal 2 $\mu\text{V/V}$ verbunden ist. Im „steilen“ Frequenzgang >100 kHz können diese Werte zwar signifikant steigen, liegen i. d. R. jedoch weit unter den Größenordnungen der übrigen Einflüsse.

Ähnlich wird vorgegangen, um die Ausgangswerte von Quellen wie z.B. Keithley 263 zu ermitteln. Liegen wie hier lediglich je zwei Stützpunkte für positive und negative Ausgangswerte vor empfiehlt sich die Interpolation über die komplette Dynamik, d.h. Positiv- und Negativwerte werden gemeinsam mit nur einer Interpolationsformel genähert, damit wieder genug Kontrollpunkte zur Verfügung stehen. Zusätzlich wird die Abweichung im Nulldurchgang als systematischer Anteil im Unsicherheitsbudget berücksichtigt.

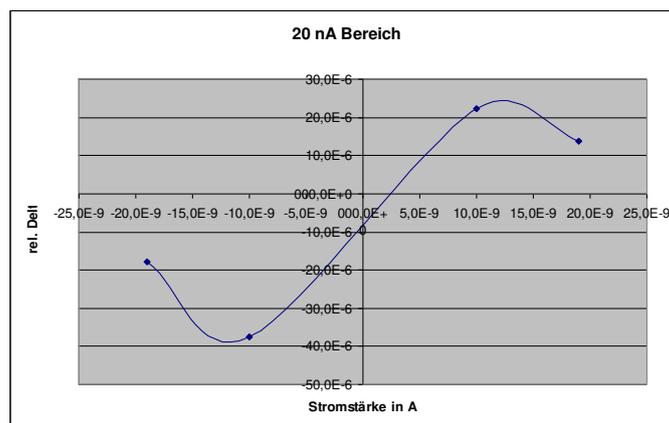


Abb. III.1.6.4 rel. Abweichungen (Linearitätsabweichung) im pos. und neg. 22 nA Bereich. Aus allen Stützpunkten wurde eine lineare Kennlinie und deren Differenz zu den Kontrollpunkten ermittelt. Am Nullpunkt wird die Interpolationsabweichung durch die Differenz des interpolierten Wertes mit einer Kennlinie der Steigung „eins“ ermittelt.

III.1.7 Potentiometrische Verfahren z.B. zur Erzeugung kleiner Spannungen

Für die Erzeugung kleiner Spannungen können auch potentiometrische Verfahren (Lindeck-Rothe-Potentiometer) eingesetzt werden. Diese Variante, z.B. zur indirekten Spannungserzeugung über

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	19 von 1

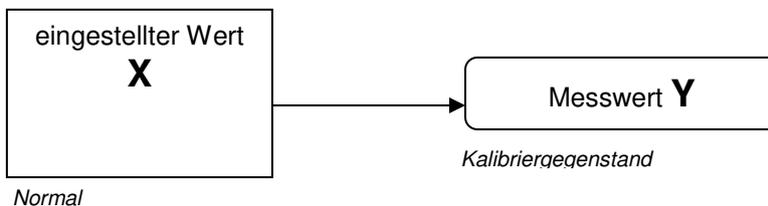
einem bekannten Festwiderstand ist in **Kapitel XV** beschrieben. Die dort genannte Messunsicherheitsbilanz ist an die Darstellung in III.2 angelehnt.

III.2 Messunsicherheitsbilanz

Grundsätzlich sind mehrere Vorgehensweisen Praxis (im Verwaltungsaufwand zunehmend, in der zu erwartenden Anwendungs-Messunsicherheit abnehmend), für die die dargestellte Messunsicherheitsbilanz angewendet werden kann:

1. Verwendung der Herstellerspezifikation bezogen auf die maximale Abweichung vom Nennwert eines Normals üblicherweise bereits inkl. weiterer Effekte wie Temperatur, Erwärmung, Anschlussstechnik etc. Die gesamte Anwendungsunsicherheit kann im einfachsten Falls als Spezifikation ggf. zzgl. der Kalibrierunsicherheit dargestellt werden, sofern „unsichere“ Konformitätsaussagen (ILAC G8:03/2009-Fig. 1-Case 2) als „bestanden“ (PASS) gewertet werden sollen. Eine zusätzliche Kalibrierwertkorrektur findet nicht statt.
2. Verwendung einer „eigenen Spezifikation“, bei Festwerten z. B. als max. zulässige bzw. bisher beobachtete Änderung (Drift) seit der letzten Kalibrierung bezogen auf **alle Geräte der Serie**. Als Korrekturwert wird dann der letzte bekannte Wert verwendet. Die Messunsicherheit für alle Geräte der Serie (Modell-Messunsicherheit) berechnet sich wieder im Wesentlichen aus dieser Spezifikation und ggf. der Kalibrierunsicherheit bei Überprüfung derselben.
3. Verwendung einer „eigenen Spezifikation“ (individuelle Spec.), bei Festwerten z. B. für die Drift aus der bisherigen Historie genau für **ein Gerät der Serie** (Korrekturwert = letzter bekannter Wert). Die Messunsicherheit für genau ein individuelles Gerät der Serie (Geräte-unsicherheit) berechnet sich wieder im Wesentlichen aus dieser Spezifikation und ggf. der Kalibrierunsicherheit bei Überprüfung derselben.
4. Verwendung keiner besonderen Spezifikation. Nach jeder Kalibrierung wird die tatsächliche max. oder mittlere Drift über die Historie erfasst und die Messunsicherheit neu berechnet. Die Anwendungsunsicherheit ergibt sich dann wesentlich aus den Anteilen Drift, Kalibrierunsicherheit, Verfahrenseinfluss (Temperatur, Erwärmung, Anschlussstechnik etc.). Als Korrekturwert wird der letzte bekannte Wert verwendet.
5. Regression der zeitlichen Drift, Bestimmung der max. oder durchschnittlichen Abweichung der Prognosewerte von den gemessenen Werten z. B. als Maximalabweichung oder RMSE (Root Mean Squared Error) für die Bestimmung des Unsicherheitsbeitrags der Prognose (Qualität/Verlässlichkeit der Prognose). Regelmäßige Neuberechnung der Messunsicherheit im Wesentlichen aus Kalibrierunsicherheit, Prognoseabweichung, und Verfahrensanteil. Als Korrekturwert wird der zeitliche Vorhersagewert (Prognosewert) zum Verwendungszeitpunkt gesetzt.

Skizze des Messverfahrens:



Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

- X Kalibrierwert am Normal
- Y Anzeige am Kalibriergegenstand

Gesuchte Größe:

- ΔY Abweichung der Anzeige des Kalibriergegenstandes vom richtigen Wert

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	20 von 1

Einflussgrößen:

ΔX_K Sofern vorhanden: Abweichung des Normals vom eingestellten Wert (Kalibrierwert) (entnehmbar aus dem Kalibrierschein)

x_t zeitliche Drift des Normals als Funktion der Zeit seit der letzten Kalibrierung. Dieser Wert gilt nur für quasi linear oder vorhersagbar driftende Normale wie z.B. die Festwiderstände Fluke 742A oder das Gleichspannungsnormal Datron 4910, ansonsten wird dieser Anteil in δX_t gesondert berücksichtigt. Als Unsicherheit der Hochrechnung kann z.B. der 1σ -Wert aus der Historie, die mittlere Betragsabweichung (normalverteilt) oder die maximale Abweichung vom hochgerechneten (extrapolierten) Wert gewonnen werden (rechteckverteilt).

δX_{WDH} Es kann zweckmäßig sein anstelle der empirischen Standardunsicherheit je Messpunkt eine typische Wiederholbarkeit zur Ermittlung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit zu verwenden. Der Anteil wird normalverteilt angenommen. Werden mehrere Messbereiche zusammengefasst, so kann auch eine „Worst Case“-Betrachtung (als Rechteckverteilung) durchgeführt werden.

δX_t Ist die Drift des Normals zwischen den Rekalibrierungen nicht bekannt, da keine Trendanalyse über vorhergehende Kalibrierungen vorliegt, werden die Abweichungen zu Null mit der aus den Herstellerangaben zu entnehmenden maximal angegebenen Grenze (Drift und Nominalwertabweichung) abgeschätzt. In diesem Fall fasst dieser Anteil die maximale Abweichung vom Nominalwert und die mögliche zeitliche Verschiebung innerhalb der zulässigen Akzeptanzkriterien zusammen. Ebenfalls ist an dieser Stelle die Verwendung von einem eigendefinierten Spezifikationsintervall denkbar⁴, sofern dieses unter Berücksichtigung der Messunsicherheit dauerhaft eingehalten wird (Konformitätsnachweis). Wird die Konformitätsaussage von solchen Spezifikationen bereits „sicher in Toleranz“ getroffen kann genau genommen auf den Unsicherheitsanteil $u(\Delta X_K)$ verzichtet werden und die Messunsicherheitsbilanz stark vereinfacht auf die Beiträge der Toleranzgrenzen und ggf. einen verfahrensbedingten Teil reduziert werden. Ansonsten wird vor allem bei Festwertkalibrierungen, sofern keine zeitliche „Prognose“ erfolgt (s.o.), der ermittelte Wert der maximalen Drift rechteckverteilt oder der Mittelwert der Driftbeträge (vorzeichenlos) normalverteilt als Grenze zwischen den Rekalibrierungen angenommen. Liegt die Drift signifikant unter der Kalibrierunsicherheit, so kann diese sogar ganz vernachlässigt werden.

δX_A Einfluss des "Messaufbaus", abhängig von der gemessenen Größe, z.B.:

- Verfahrensbedingte Einflüsse der Thermospannungen, die sich durch die Anschlussleitungen ergeben (diese Korrektur ist nur bei Gleichspannung zu berücksichtigen), Erwärmung (bei Gleichstromstärke), Kabellängeneinfluss (bei Wechselstromstärke und Wechselspannung) oder Wiederholbarkeit (z.B. bei Gleichstromwiderstand).
- Bei Kalibrierung von Gleichstromwiderstand kann die durch den Messstrom des Kalibriergegenstandes verursachte Unsicherheit erst im Einzelfall berechnet werden.
- Im Wechselstrombereich handelt es sich um kapazitive Einflüsse der Messleitungen, die Leckströme verursachen und die Lastabhängigkeit des Ausgangs des Kalibrators bei unterschiedlicher (induktiver) Last.
- Leckströme, Offsetfehler, elektromagnetische Einstrahlungen, Übergangswiderstände durch die Umgebungsfeuchte können bei Hochohm- /

⁴ Vgl. Leitfaden [„Praxismessgerechte Ermittlung der Messunsicherheit, DKD Fachausschuss Messunsicherheit 2005-2011“](#)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	21 von 1

Picoamperemessungen das Messergebnis beeinflussen

- Im 220 mV Wechselspannungsbereich am Kalibrator Fluke 5700A ist unter Umständen mit erhöhten Abweichungen aufgrund der Impedanzunterschiede von Quelle und Last zu rechnen, da der Kalibrator in diesem Bereich die Signale an 50 Ohm Generatorinnenwiderstand erzeugt. Dieser Anteil ist abhängig vom Kalibriergegenstand und kann erst im konkreten Fall berücksichtigt werden. Die Herstellerspezifikation anhand des Artefaktabgleichs enthält diesen Anteil bereits.
- Bei der Ladungssynthese handelt es sich um zusammengefasste Einflüsse durch Rauschen, Anstiegs- und Abfallzeit, Über- und Unterschwingen, Reproduktion und Abweichung der Zeitkonstante

δX_{Tp} Abweichungen aufgrund variabler Umgebungstemperatur (z.B. Festwiderstände wie Fluke 742)

δY_R Rundungsfehler aufgrund der Auflösung des Messgerätes (abhängig vom Kalibriergegenstand). Für die kleinste angebbare Messunsicherheit muss dieser Term nur dann berücksichtigt werden, wenn die Auflösung des besten verfügbaren Messobjektes in der Größenordnung der erzielbaren Messunsicherheiten liegt.

δX_{Int} Abweichungen der bereichsweisen Interpolation bei der Bestimmung von Referenzwerten des Normals zwischen Stützpunkten aus dem Kalibrierschein. Interpoliert werden kann z. B. in den DC-Bereichen zwischen den Bereichsgrenzen und in den AC-Bereichen zwischen den Frequenzgrenzen der bekannten Stützpunkte.

Bei Hochohmwiderstandsmessungen bei abweichenden Spannungen als der Kalibrierspannung wird dieser Anteil als Spannungsabhängigkeit als $\delta X_{Spannung}$ formuliert.

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich aus

$$Y - \Delta Y + \delta Y_R = X - \Delta X_K - t \cdot x_t + \delta X_t + \delta X_A + \delta X_{Tp} + \delta X_{Int}$$

die für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit maßgebliche Modellgleichung (mit $\delta Y_R = 0$):

$$\Delta Y = Y - (X - \Delta X_K - t \cdot x_t + \delta X_{WDH} + \delta X_t + \delta X_A + \delta X_{Tp} + \delta X_{Int})$$

Messunsicherheitsbilanz:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta Y) = c_K^2 u^2(\Delta X_K) + c_t^2 u^2(\delta X_t) + c_{WDH}^2 u^2(\delta X_{WDH}) + c_A^2 u^2(\delta X_A) + c_{Tp}^2 u^2(\delta X_{Tp}) + c_{Int}^2 u^2(\delta X_{Int})$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	22 von 1

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Standard- messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitäts- koeffizient	Unsicherheits- beitrag
X_i	x_i	$u(x_i)$		$ c_i $	$u_i(y)$
X	x				
ΔX_K	x_K	$U(\Delta X_K) / 2$	Normal	1	$u(\Delta X_K)$
$t \cdot x_t$	x_T	$U(X_t)$	Normal ⁵	1	$u(X_t)$
δX_{WDH}	0	$\Delta(\delta X_{WDH})$	Normal ⁵	1	$u(\delta X_{WDH})$
δX_t	0	$\Delta(\delta X_t) / \sqrt{3}$	Rechteck ⁶	1	$u(\delta X_t)$
δX_A	0	$\Delta(\delta X_A) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta X_A)$
δX_{Tp}	0	$\Delta(\delta X_{Tp}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta X_{Tp})$
δX_{Int}	0	$\Delta(\delta X_{Int}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta X_{Int})$
Y	y				
ΔY	$y - X + X_K + X_T$				$u(\Delta Y)$

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis ΔY beizuordnende erweiterte Messunsicherheit (k=2) die

relative erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$W_{rel}(\Delta Y) = 2 \frac{u(\Delta Y)}{Y}$$

⁵ ggf. rechteckverteilt mit $\sqrt{3}$ -Gewichtung bei Verwendung maximaler Intervallgrenzen

⁶ ggf. ohne $\sqrt{3}$ -Gewichtung bei Verwendung des durchschnittlichen Driftbetrags (Normalverteilung)

Berechnungsgrundlagen:

$u(\Delta X_K)$ Dieser Wert ist dem aktuellen Kalibrierschein des verwendeten Normals zu entnehmen

$u(X_t)$ Für einige Festwertnormale wie Widerstandsnormale (z.B. Fluke 742) oder das Gleichspannungsnormale (z.B. Datron 4910), kann aus der Historie ein linearer Trend über die Zeit errechnet werden und die mittlere oder maximale Abweichung vom erwarteten Wert der Extrapolationsformel (Trend) ermittelt werden.

$u(\delta X_{WDH})$ Eine typische Wiederholbarkeit kann durch Messreihen z. B. an einem bestmöglichen oder typischen Messobjekt bestimmt werden. Bei Verwendung einer Normalverteilung errechnet sich die empirische Standardabweichung des Mittelwertes (Standardmessunsicherheit) einer Stichprobe der Länge n aus der Standardabweichung s zu

$$\Delta(\delta X_{WDH}) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Bei Verwendung einer Rechteckverteilung kann die Halbreite des Intervalls aus dem maximalen Abweichungsbetrag der Wiederholungen ermittelt werden

$$\Delta(\delta X_{WDH}) = \max(|x_1|, \dots, |x_n|) \text{ oder } \Delta(\delta X_{WDH}) = \frac{\max(x_1, \dots, x_n) - \min(x_1, \dots, x_n)}{2}$$

Die Verwendung eines typischen Wertes ersetzt die tatsächlich beobachtete Streuung solange diese unterhalb oder gleich des durch die Messreihen ermittelten Wertes liegt.

$u(\delta X_t)$ Wenn an den kalibrierten Einsatzpunkten des Normals mit den Korrektionswerten ΔX_K ohne zeitliche Prognose gearbeitet wird, wird auf Basis der Driftanalyse der Rekalibrierungen und der Auswertung von Vergleichsmessungen eine maximal mögliche Drift im Kalibrierungsintervall bestimmt. Für die Verwendung außerhalb der kalibrierten Betriebspunkte (Bereiche) ohne Korrekturwertinterpolation (siehe III.1.6) können weitere Erkenntnisse verwendet werden. Zum Beispiel für Fluke 5700A/5720A die der Artefaktkalibrierung basierend auf einer Studie des Van Swinden Laboratoriums (NMI-VSL, Niederlande), der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB, Deutschland) und des Swedish National Testing and Research Institute (SP, Schweden). Die Resultate sind im Bericht "Artifact Calibration: An Evaluation of the Fluke 5700A Series II Calibrator" zusammen gefasst.

. Das Kapitel 9, "Recommendations for the user", enthält die meisten in für die erfolgreiche Anwendung der Bereichsunsicherheit festgesetzten Regeln und wurden u.a. auch in Dokument Nr. 212.dw der Schweizer Akkreditierungsstelle SAS „Richtlinien für die Anwendung der Artefakt- Kalibrierung beim Multifunktionskalibrator Fluke 5700 in den akkreditierten Kalibrierlaboratorien“ zusammengefasst. Dabei hat sich gezeigt, dass bei Durchführung des sog. „Calibration Check“ im Intervall von 90 Tagen auf die Notwendigkeit eines erneuten Artefaktabgleichs verzichtet werden kann sofern die Ergebnisse <75% der Spezifikation ausweisen, da die Gerätedrift dann keinen signifikanten Einfluss zeigt.

Für die Referenzwiderstände 742, das Spannungsstandard Datron 4910 und die Quelle Keithley 263 ist diese Unsicherheit als maximale Differenz oder Drift zwischen den Rekalibrierungen in einer Trendanalyse bestimmt worden.

$u(X_{int})$ Für relative Gleichspannungskalibrierungen kann dieser Anteil zu null gesetzt werden. Es wird üblicherweise eine lineare Interpolation vorgenommen. Die Ausgleichsgerade ist eine Regressionsgerade („Fit“) optimiert auf die kleinste quadratische Abweichung der Stützpunkte von der Interpolationsgeraden (siehe III.1.6). Die Abweichung der Stützpunkte von der Ausgleichsgeraden ist ein Maß für die Unsicherheit der Interpolation. Die rechteckverteilte Interpolationsunsicherheit $u(X_{int})$ wird mit der

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	24 von 1

größten relativen Abweichung von der Ausgleichsgeraden bestimmt.

Beispiel für Fluke 5700A (berechnet über Tabellenkalkulationsblatt zur Interpolation unter <http://dmserver/technik/Tools/Interpolationsformeln-lin.Reg.-Vorlage.xlsx>):

Ermittelte Interpolationsformel und Interpolationsunsicherheit für die Interpolation zwischen Frequenzen von 40 Hz bis 20 kHz bei einer Wechselspannung von 2 mV:

Folgende Tabelle zeigt die Stützpunkte aus dem Kalibrierschein und die über die Interpolation errechneten Referenzwerte. Die relative Abweichung vom Stützpunkt gibt die Unsicherheit der Interpolation an.

Bedingung	Mess-/Kalibrierwert	interpolierte Werte	relative Abweichung vom Stützpunkt
40,00E+0 Hz	1,9993143000E-3 V	1,9989820714E-3 V	-166,1712941392E-6
1,00E+3 Hz	1,9988583000E-3 V	1,9990094760E-3 V	75,6311508787E-6
10,00E+3 Hz	1,9988905000E-3 V	1,9992663941E-3 V	188,0513528324E-6
20,00E+3 Hz	1,9997467000E-3 V	1,9995518586E-3 V	-97,4330257620E-6

Für das gezeigte Beispiel ist unsere Standardmessunsicherheit der Absolutbetrag der maximalen relativen Abweichung (188 $\mu\text{V/V}$) vom Stützpunkt geteilt durch $\sqrt{3}$, also 109 $\mu\text{V/V}$ beziehungsweise 0,217 μV .

$u(\delta X_A)$

Mit den verwendeten Spezialleitungen von Fluke ergibt sich eine maximale Thermospannung von $\Delta(\delta X_A) = 0,1 \mu\text{V}$, die durch Beobachtung des Nullpunktes am Anfang und am Ende einer Messreihe bestimmt wurde. Zusätzlich ist die Stabilität der Ausgangsspannung des Kalibrators über den Zeitraum der Messwertaufnahme zu berücksichtigen. Aus zeitabhängigen Messungen der Ausgangsspannung mit Hilfe eines Digitalmultimeters wurde der folgende Beitrag abgeschätzt:

$$\Delta(\delta X_A) = 4,2 \cdot 10^{-7} \cdot U^{1,1} + 0,1 \mu\text{V}$$

Im Wechselspannungsbereich wurde der Kabellängeneinfluss durch Messungen mit einfacher und doppelter Kabellänge bestimmt. Aus diesen Beobachtungen kann z.B. ein kabelabhängiger Einfluss von etwa

$$\Delta(\delta X_A) = 5 \cdot 10^{-7} \cdot (f / \text{MHz})^2 \cdot U$$

abgeleitet werden.

In den Bereichen $\leq 220 \text{ mV}$ ist zusätzlich durch die 50Ω -Quellimpedanz R_Q des Fluke 5700A abhängig von der Eingangsimpedanz des Messgerätes $Z_{DMM} = \frac{R_{DMM}}{1 - i\omega C R_{DMM}}$ (z.B. $Z_{DMM} = 1 \text{ M}\Omega \parallel 150 \text{ pF}$, typ.) mit einem systematischen Abweichungsintervall

$$\Delta(\delta X_A) = \left| \frac{R_Q}{R_Q + Z_{DMM}} \right| = \frac{R_Q \cdot \sqrt{1 + (\omega C R_{DMM})^2}}{\sqrt{(R_Q + R_{DMM})^2 + (\omega C R_{DMM} R_Q)^2}} \cdot U$$

zu rechnen.

Im Wechselstrombereich wird eine maximale Kabelkapazität $C_K = 50 \text{ pF}$ angenommen. Daraus ergibt sich die Leitungsimpedanz

$$Z_L = \frac{1}{i\omega C_K}$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	25 von 1

und somit der Leckstrom I_L sowie die Unsicherheit $\Delta(\delta X_A)$:

$$I_L = \frac{Z_M}{Z_M + Z_L} \cdot I$$

$$\Delta(\delta X_A) = \left| \frac{Z_M}{Z_M + Z_L} \right| = \sqrt{\frac{R_M^2 + \omega^2 L_M^2}{R_M^2 + \left(\omega L_M - \frac{1}{\omega C_K} \right)^2}}$$

mit $Z_M = R_M$ als Impedanz des zu kalibrierenden Messkreises und I als eingestellter Strom am Kalibrator. Z_M ist niederohmig und bewegt sich in der Praxis im Bereich von $0,1 \Omega$ und $1 \text{ k}\Omega$, für Messungen zwischen $2,2 \text{ A}$ und $22 \mu\text{A}$. Für Stromstärken im $>220 \text{ mA}$ am Kalibrator 5700A wurde das Unsicherheitsintervall durch eine Vergleichsmessung mit einfacher und doppelter Kabellänge analysiert. Abhängig von der Stromstärke wurden aufgrund der unterschiedlichen resistiven und induktiven Last am Kalibrator die Intervalle $\Delta(\delta X_A)$ ermittelt und können abhängig von Frequenz und Stromstärke genähert werden. Aus diesen Beobachtungen kann ein kabelabhängiger Einfluss von

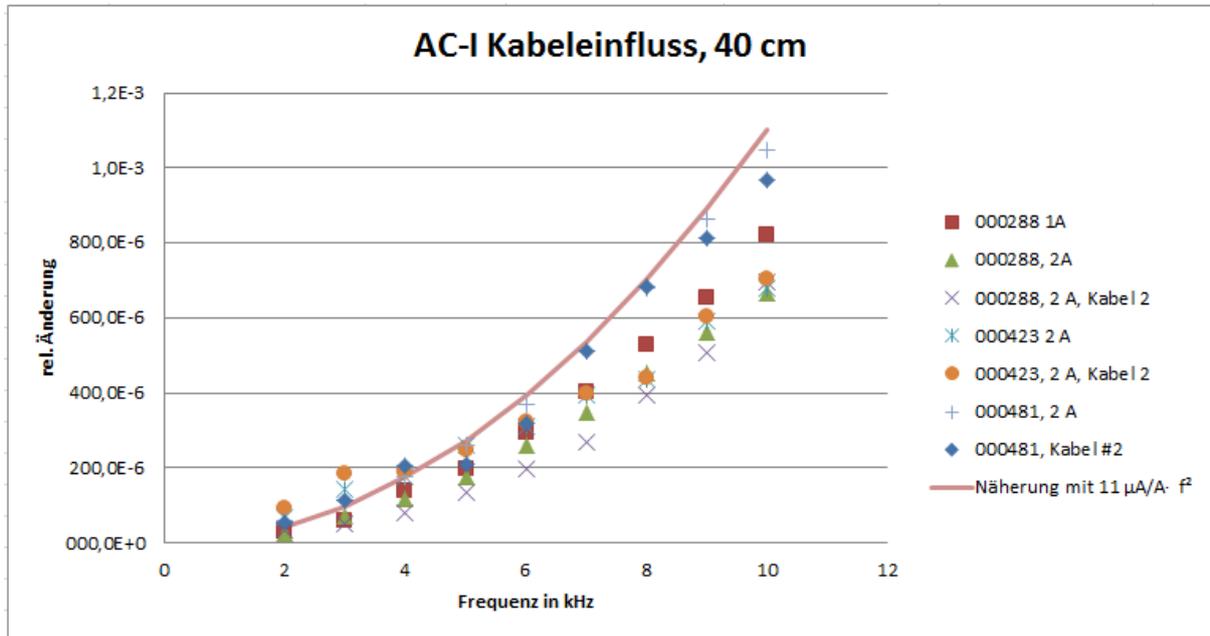
$$\Delta(\delta X_A) = 11 \cdot 10^{-6} \cdot (f / \text{kHz})^2 \cdot I$$

abgeleitet werden.

Bei Hochohmmessungen enthält dieser Anteil die gemessene Wiederholbarkeit der Widerstandsmessung z.B. beim Vergleich mit sich selbst oder am Elektrometer. Diese Werte werden als Intervallgrenzen einer möglichen Rechteckverteilung angenommen und verwendet.

Picoamperekalibrierungen sind bis zu $0,2 \text{ fA}$ im kleinen Zeitintervall reproduzierbar (Kontrollmessung an Keithley 6517). Die in den Bereichen gemessene Wiederholbarkeit wird als Grenze der Unsicherheitsintervallbreite verwendet.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	26 von 1



Bestimmung des relativen Einflusses des Anschlusskabels (ca. 40 cm) auf die generierte Wechselstromstärke an verschiedenen Kalibratoren der Serie Fluke 5700A oberhalb von 220 mA. Das Ergebnis konnte durch eine Wiederholungsmessung an verschiedenen DMMs mit einfacher und doppelter Kabellänge bestätigt werden, bzw. lag sogar unterhalb der Bestimmungsgrenzen.

$u(\delta X_{T_p})$ Die Umgebungstemperatur ist mit $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ spezifiziert. Für Kalibrierungen mit Fluke 5700A und Datron 4910 muss keine zusätzliche Unsicherheit verbucht werden, da die Spezifikationen für $u(\delta X_t)$ bereits ein Temperaturintervall von $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ angeben.

Für die Kalibrierung mittels Referenzwiderständen ändert sich jedoch der tatsächliche Wert bereits für kleinere Temperaturabweichungen und berechnet sich gemäß

$$\frac{R_t}{\Omega} = \frac{R_{23}}{\Omega} \cdot \left(1 + \alpha \cdot (t/^\circ\text{C} - 23) + \beta \cdot (t/^\circ\text{C} - 23)^2 \right)$$

mit
 R_t Widerstand bei $t^\circ\text{C}$
 R_{23} kalibrierter Widerstand bei 23°C

α, β Temperaturkoeffizienten des verwendeten Referenzwiderstandes. Diese Werte sind auf der Rückseite des Widerstands angegeben und sind zeitstabil.

t Umgebungstemperatur bei der Messung

Da die genaue Temperatur bei der Messung nicht bekannt ist wird die maximale Abweichung bei $\pm 2^\circ\text{C}$ berechnet und dieser Wert als Unsicherheitsbeitrag verwendet.

Beispiel für 1 k Ω Referenzwiderstand:

$$R_{23} = 1,0000014 \text{ k}\Omega; \alpha = -0,010 \cdot 10^{-6}; \beta = -0,018 \cdot 10^{-6}$$

$$R_{25} = 1,0000014 \cdot 10^3 \cdot (1 - 2 \cdot 10^{-8} - 7,2 \cdot 10^{-8}) \Omega = 1,0000013 \text{ k}\Omega$$

$$R_{21} = 1,0000014 \cdot 10^3 \cdot (1 + 2 \cdot 10^{-8} - 7,2 \cdot 10^{-8}) \Omega = 1,0000013 \text{ k}\Omega$$

maximale Abweichung und Unsicherheitsintervall im Temperaturbereich 21°C bis 25°C :

$$\Delta(\delta X_{T_p}) = 9,2 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Andere Temperatureinflüsse können aus den Angaben der Hersteller der verwendeten

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	27 von 1

Festwertnormale abgeschätzt werden.

Zahlenwerte und Berechnungen der Messunsicherheiten für die einzelnen Messgrößen sind in Microsoft Excel erstellt und für die Bezugsnormale den unten genannten Tabellen zu entnehmen. Akkreditierte Unsicherheiten werden im Leistungsverzeichnis geführt.

- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/DC-NF-High-End/Vergleich-Kurzschlussbuegel-Fluke8508A-HP3458A.xlsx>
- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-IIIb-und-Vb-U-an-Datron-4910.xls>
- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-TabelleIV-an-Fluke-5790.xlsx>
- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-IIIe-I-an-Keithley-263.xls>
- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/DC-NF-High-End/000483-Fluke-5725A.xlsx>
- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/DC-NF-High-End/108286-Fluke52120A.xlsx>
- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/DC-NF-High-End/000288-Fluke5700A.xlsx>
- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-IIIc-und-Vc-U-an-Fluke-742.xls>
- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-IIIf-R-an-IET-VRS-100.xls>
- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-III.1-und-IV.4-Stromstaerke-mit-Hochohmdekade-Keithley6517A-und-Spannungsquelle.xlsx>
- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/DC-NF-High-End/Messunsicherheiten-Tabelle-AA0341-DC-U-Step-Up-mit-Digitalmultimeter.xlsx>

Berechnungs-Tool zur Interpolation von Zwischenwerten:

- <http://dmsserver/technik/Tools/Interpolationsformeln-lin.Reg.-Vorlage.xlsx>

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	28 von 1

III.3 AC/DC-Differenz- oder Samplingverfahren am Josephsonvoltmeter mit Nulldetektor

Das auf Basis eines 10 V-programmierbaren Josephson-Arrays einfach zu verwendende Quantenvoltmeter der esz AG (AC-QVM), das in Zusammenarbeit mit der PTB und supracon entstanden ist (siehe Metrologia 50-2013 612–622 und CPEM 2014), bietet Gleichspannungs- und Wechselspannungs-Kalibrierungen bis in den kHz-Bereich und gewährleistet die direkte Rückführung auf ein quantenbasiertes Gerät. Das Voltmeter ist in der Lage Kalibrierungen bis zu 12 V DC und 7 V (RMS) im Frequenzbereich von DC bis 2 kHz vollständig unter Software-Steuerung durchzuführen. Ein direkter Vergleich bei DC zeigte Unsicherheiten besser als $2 \cdot 10^{-10}$ ($k=2$), die Unsicherheit bei 1 KHz kann besser als $2 \mu\text{V/V}$ bestimmt werden. Das Voltmeter ist ein robustes und praktisches System, das für die Kalibrierung von Zener-Referenzen und Kalibratoren eingesetzt und als Plattform für weitere quantenbasierte Messaufgaben eingesetzt werden kann.

III.3.1 Systemsetup

Das AC-QVM benutzt kommerzielle BIAS-Quellen (LeCroy Arbstudio 1104) mit jeweils vier Ausgangskanälen um das programmierbare Josephson-Array zu steuern.

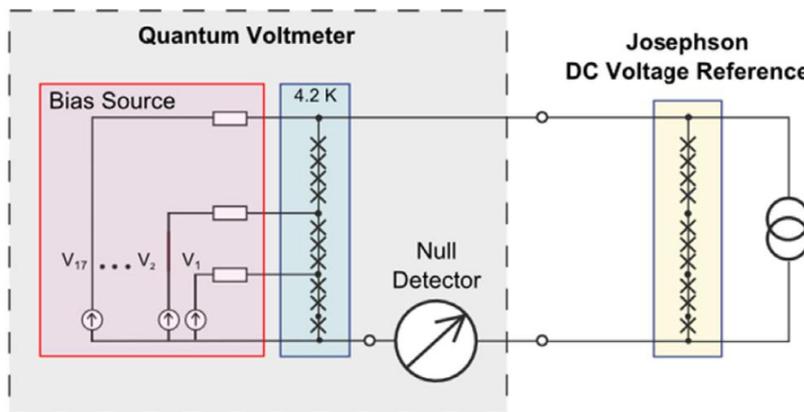


Bild III.3.1.1 Schematischer Aufbau des AC-QVM

Die Quellen werden elektrisch isoliert betrieben und über eine optoelektrische Verbindung gesteuert. Das System hat für den Fehlerfreien Betrieb bereits Selbsttestroutinen und ermöglicht die Kompensation von magnetischem Fluss in der Josephsonschaltung. Sowohl die ideale 70 GHz Mikrowelle als auch die BIAS-Parameter für die das Auffinden der Stufenbreite und der Stufenmitte der Josephsonkontakte sind in der Software automatisiert. Mit dem Betrieb in flüssigem Helium sind so Messungen über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen möglich, ohne das Setup in dieser Zeit verändern zu müssen. Über einen integrierten Multiplexer können die Anschlüsse der jeweiligen Messaufgabe entsprechend umgeschaltet werden.

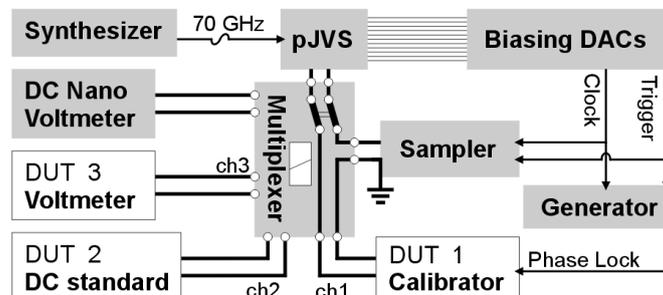


Bild III.3.1.1 Schematisches Setup des AC-QVM: Der Multiplexer zeigt die Einstellung für den AC-Betrieb bei Kalibrierung einer Quelle (Kalibrator)

III.3.2 DC-Betrieb

Die DC-Unsicherheit (mit einem Josephson Array bis 12 V) wurde durch ein baugleiches System der PTB gegen ein herkömmliches Josephsonnormal validiert. Im DC-Betrieb arbeitet das System mit

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	29 von 1

einem Nanovoltmeter als Nulldetektor (Differenz-/ Nullmethode) und Polwender zur Ausschaltung von thermoelektrischen Effekten. Als externer Vergleich wurde eine Fluke 732A Zenerreferenz als Transfornormal im esz Labor und am nächsten Tag bei der PTB kalibriert. Die Übereinstimmungen der gemessenen Spannungen der PTB U_{PTB} und esz U_{esz} lagen dabei sehr gut innerhalb der erweiterten Typ-A-Streuung eines der Normale mit $U_{esz} - U_{PTB} = -42 \text{ nV} \pm 94 \text{ nV}$ bei 1,018 V und $U_{esz} - U_{PTB} = -65 \text{ nV} \pm 80 \text{ nV}$ (Typ-A, $k=2$) bei 10 V.

III.3.2.1 DC-Unsicherheit Quellen

Das Modell für die Messung von DC-Spannungen z.B. von Zenerreferenzen oder DC-Quellen (Kalibratoren) wird formuliert zu:

$$U_{DUT} = (U_{JVS} - \delta U_{\text{Detector}} - \delta U_{\text{EMF}}) \cdot K_{\text{leakage}} \cdot K_f$$

mit

U_{DUT} gesuchte Spannung des Kalibriergegenstandes

U_{JVS} vom Josephsonsystem (JVS) gemessene Spannung. Die Messung wird über ein Zeitintervall von mehreren Minuten durchgeführt und aus etwa 8 bis 10 Messwerten gemittelt. Die Messwerte selbst stellen ihrerseits wieder den Mittelwert aus Einzelnen Josephsonmessreihen dar, so dass das weiße Rauschen des Messobjektes bereits geglättet wird. Die Standardunsicherheit des Mittelwertes der 8 bis 10 Einzelmessungen wird dann als Typ-A Beitrag (Mehrfachmesswert) in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt. Für die kleinsten angebbaren Unsicherheiten sind die Beiträge der Messobjekte entscheidend. Testmessungen einer guten Quelle (Fluke 5700A) zeigten Beiträge $\leq 6 \text{ nV}$ bis 200 mV, $\leq 50 \text{ nV}$ bis 2 V und $\leq 80 \text{ nV}$ bis 10 V.

$\delta U_{\text{Detector}}$ Der Nulldetektor hat eine Auflösung von bestens 1 nV, d.h. ein Rundungsintervall von $\pm 0,5 \text{ nV}$ ist rechteckverteilt für jede Messung als Unsicherheitsintervall zu berücksichtigen.

δU_{EMF} Im direkten Vergleichsmodus wird die Messunsicherheit des thermospannungsarmen Umschalters und des Kabels zur Spannungsreferenz durch Umpolen kompensiert. Ein maximaler Unsicherheitsbeitrag für die Thermospannung (6 nV, ermittelt durch den Vergleich einer Spannung „mit sich selbst“) ist in der Unsicherheitsbilanz aufgenommen.

K_{leakage} Der parasitäre Widerstand zwischen den Leitungen und z.B. Schirmung oder Erde wirkt wie ein Spannungsteiler, der die Josephson-Ausgangsspannung verringert. Der Leitungswiderstand R_{lead} liegt unter 5Ω bei einem parasitären Widerstand R_{leakage} von über 100 G Ω , so dass mit einer relativen Abweichung von maximal $R_{\text{lead}}/R_{\text{leakage}}$ 0,05 nV/V zu rechnen ist

K_f Korrektur aufgrund der Frequenzunsicherheit, kleiner $8,5 \cdot 10^{-12} \cdot f$ ($k=2$, normalverteilt), bei direkter Abbildung auf die Spannungsunsicherheit ergibt sich somit ein Beitrag kleiner 0,0085 nV/V.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	30 von 1

III.3.2.2 Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz

Größe x_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität $ c_i $	relativer Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)^7$
U_{JVS}	$\overline{U_{JVS,n=10}}$	σ_{JVS}	Normal (Typ A)	$\frac{\sigma_{JVS}}{\sqrt{n}}$	$1/U_{JVS}$	w_{JVS}
$\delta U_{Detector}$	0	$a_{Detector}$	Rechteck	$\frac{a_{Detector}}{\sqrt{3}}$	$1/U_{JVS}$	$w_{Detector}$
δU_{EMF}	0	a_{EMF}	Rechteck	$\frac{a_{EMF}}{\sqrt{3}}$	$1/U_{JVS}$	w_{EMF}
$K_{leakage}$	1	$a_{Leakage}$	Rechteck	$\frac{a_{Leakage}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{Leakage}$
K_f	1	a_f	Normal (k=2)	$\frac{a_f}{2}$	1	w_f
U_{DUT}	Standardunsicherheit			$w(U_{DUT}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 w_i^2(y)}$		$w(U_{DUT})$
	rel. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(U_{DUT}) = k \cdot w(U_{DUT})$		$W(U_{DUT})$

am Messbeispiel von 10 V ergibt sich mit den eingesetzten Zahlenwerten

Berechnungen mit Zahlenwerten sind in Microsoft Excel erstellt und folgender Tabelle zu entnehmen:

<http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-III.3.2-AC-DC-JVS.xls>

III.3.2.3 DC-Unsicherheit Messgeräte

Für die Unsicherheitsberechnung kann das Modell für Quellen verwendet werden. Der Anteil für den Nulldetektor entfällt sofern direkt gegen das Josephsonnormal kalibriert wird.

$$U_{DMM} - \Delta U_{DMM} - \delta U_{resolution} - \delta U_{zero} = U_{JVS} \cdot K_{leakage} \cdot K_f$$

$$\Delta U_{DMM} = (U_{JVS} \cdot K_{leakage} \cdot K_f) - (U_{Anzeige,DMM} - \delta U_{resolution})$$

mit

U_{DMM} angezeigte Spannung am Messobjekt (DMM)

ΔU_{DMM} gesuchte Abweichung (Ablage) des Kalibriergegenstandes (z.B. Digitalmultimeter). Die Standardunsicherheit des Mittelwertes aus 8 bis 10 Einzelmessungen gegen die Josephsonspannung wird als Typ-A Beitrag (Mehrfachmesswert) in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt. Für die kleinsten angebbaren Unsicherheiten sind die Beiträge der Messobjekte entscheidend. Testmessungen eines guten Messobjektes zeigten Beiträge ≤ 6 nV bis 200 mV, 20 nV bis 2 V und 120 nV bis 10 V.

U_{JVS} vom Josephsonsystem (JVS) erzeugte Spannung.

⁷ relative Beiträge werden mit w referenziert; absolute Beiträge mit u

$K_{leakage}$ siehe III.3.2.1

K_f siehe III.3.2.1

$\delta U_{resolution}$ Beste Auflösung des Messobjektes: Kommerziell sind Auflösungen bis 1 nV bis 200 mV (bzw. 10 nV bis 2 V und 100 nV bis 10 V) realisiert, d.h. ein Rundungsintervall von mindestens $\pm 0,5$ nV ist rechteckverteilt für jede Messung als Unsicherheitsintervall zu berücksichtigen.

δU_{zero} Für die Bestimmung der absoluten Abweichung ist die Verwendung eines Nullnormals zur Offset-Kompensation erforderlich. Dieser Beitrag kann entfallen, sofern nur die relative Nichtlinearität des DMM bestimmt werden soll. Bei Verwendung eines guten Offsets ist die Unterdrückung von thermoelektrischen Effekten bis unter 100 nV möglich.

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz

Größe x_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität $ c_i $	relativer Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)^8$
U_{JVS}						
U_{DMM}	$\overline{U_{DMM, n=10}}$	σ_{DMM}	Normal (Typ A)	$\frac{\sigma_{DMM}}{\sqrt{n}}$	$1/U_{JVS}$	w_{JVS}
$\delta U_{resolution}$	0	$a_{Detector}$	Rechteck	$\frac{a_{Detector}}{\sqrt{3}}$	$1/U_{JVS}$	$w_{Detector}$
δU_{zero}	0	a_{zero}	Rechteck	$\frac{a_{zero}}{\sqrt{3}}$	$1/U_{JVS}$	w_{zero}
$K_{leakage}$	1	$a_{Leakage}$	Rechteck	$\frac{a_{Leakage}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{Leakage}$
K_f	1	a_f	Normal (k=2)	$\frac{a_f}{2}$	1	w_f
ΔU_{DMM}	Standardunsicherheit			$w(\Delta U_{DMM}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 w_i^2(y)}$		$w(\Delta U_{DMM})$
	rel. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(\Delta U_{DMM}) = k \cdot w(U_{DUT})$		$W(\Delta U_{DMM})$

Berechnungen mit Zahlenwerten sind in Microsoft Excel erstellt und folgender Tabelle zu entnehmen:

<http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-III.3.2-AC-DC-JVS.xls>

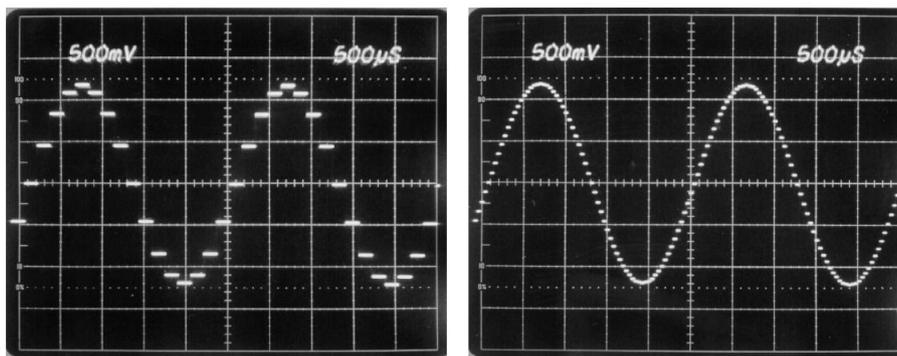
⁸ relative Beiträge werden mit w referenziert; absolute Beiträge mit u

III.3.2.4 Ergebnisse DC

Messgröße / Kalibriergegenstand	Messbereich / Messspanne	Messbedingungen / Verfahren	kleinste angebbare Messunsicherheit	Bemerkungen
Gleichspannung	0 V bis 200 mV	Kalibrierung mit dem Josephson-Spannungsnormal	14 nV	Kalibrierung von Spannungsquellen
	>200 mV bis 2 V		0,10 µV	
	>2 V bis 10 V		0,16 µV	
	0 mV bis <200 mV		12 nV	Kalibrierung der Nichtlinearität von Voltmetern
	200 mV bis <2 V		40 nV	
	2 V bis 10 V		0,25 µV	
	0 mV bis <2 V		0,12 µV	Kalibrierung der Abweichung von Voltmetern
	2 V bis 10 V		0,27 µV	

III.3.3 AC-Betrieb

Im AC-Betrieb wird das programmierbare Josephson-Array zur stufenweisen Synthese einer quasi-sinusförmigen Approximation der Kurvenform verwendet. Die Messung am Sampler erfolgt aufgrund der begrenzten Eingangsdynamik differentiell zur Josephson-Wellenform derselben Amplitude und Phase, wobei bei kleinen Amplituden auch direkt gemessen werden kann. Typischerweise werden 20 Stufen pro Periode für die Näherung der Sinusform angesteuert.



16 Stufen/Periode

64 Stufen/Periode

Bild III.3.3.1 Synthetisierte Josephson-Sinuswellen

Die Differenzwerte der Zyklen werden gemittelt wobei die parasitären Transienten an den Stufenflanken der Samples durch die digitale Signalverarbeitung entfernt werden. Der RMS-Wert wird direkt aus der digitalisierten Kurvenform berechnet, wobei Verstärkungsfaktor und Offset des Samplers bereits korrigiert werden. Defaultmäßig wird der Durchschnitt über 10 Sekunden Messzeit errechnet und dieser Zyklus mehrfach (z.B. 10 Mal) wiederholt.

Die AC-Unsicherheit wurde bei der PTB gegen traditionelle Thermokonverter validiert. Daneben fanden Vergleichsmessungen mit einem Kalibrator als TransfERNormal statt, die eine Übereinstimmung der gemessenen Spannungen (Bereich 0,5 V bis 7,2 V, Frequenzen 40 Hz bis 1 kHz) von $U_{esz} \cdot U_{PTB} = 1,02 \mu V/V \pm 1,96 \mu V/V$ (Typ-A, $k=2$) zeigten.

III.3.3.1 AC-Unsicherheit Quellen

Das Modell für die Messung von AC-Spannungen von Quellen (Kalibratoren) wird formuliert zu:

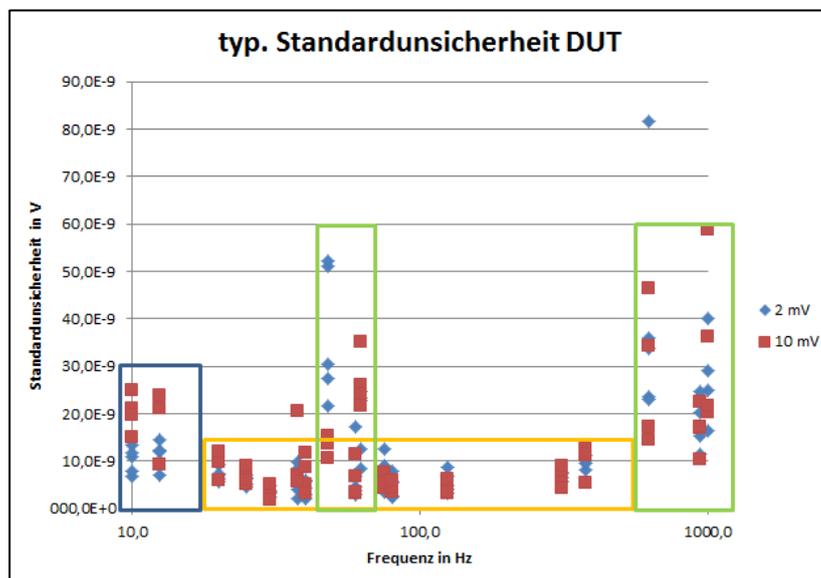
$$U_{DUT} = U_{JVS} \cdot K_{transfer} \cdot K_{gain} \cdot K_{bandwidth} \cdot K_{phase} \cdot K_{leakage} \cdot K_f \cdot K_{CMC,PTB}$$

mit

U_{DUT} gesuchte Spannung des Kalibriergegenstandes

U_{JVS} vom Josephsonsystem (JVS) gemessene Spannung. Die Messung wird über ein

Zeitintervall von mehreren Minuten durchgeführt und aus etwa 8 bis 10 Messwerten gemittelt. Die Messwerte selbst stellen ihrerseits wieder den Mittelwert aus Einzelnen Josephsonmessreihen dar, so dass das weiße Rauschen des Messobjektes bereits geglättet wird. Die Messzeit und die Abtastratemuss dabei etwa an das Minimum der Allan-Abweichung, die technischen Gegebenheiten und die praktische Erfahrung angepasst werden. Das optimale Setup wurde dazu durch Messreihen⁹ v. a. bei 2 mV und 10 mV untersucht, da diese Spannungen erwartungsgemäß am empfindlichsten auf Einstellungsänderungen der Parameter reagieren. Die Standardunsicherheit des Mittelwertes der 8 bis 10 Einzelmessungen wird dann als Typ-A Beitrag (Mehrfachmesswert) in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt. Für die kleinsten angebbaren Unsicherheiten sind die Beiträge der Messobjekte entscheidend. Testmessungen einer guten Quelle (Fluke 5700A) zeigten Beiträge z. B. von etwa 5 $\mu\text{V/V} + 30 \text{ nV}$ (Bereich $<20 \text{ Hz}$), 0,4 $\mu\text{V/V} + 15 \text{ nV}$ (Bereich 20 Hz bis 375 Hz) ausgenommen 48 Hz und 62,5 Hz), 2 $\mu\text{V/V} + 60 \text{ nV}$ (Bereich 48 Hz bis 62,5 Hz), 0,4 $\mu\text{V/V} + 60 \text{ nV}$ (Bereich $>375 \text{ Hz}$ bis 1 kHz).



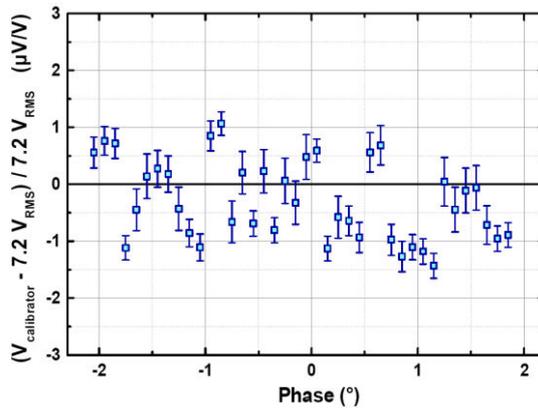
Auswertung des Absolutanteils der typischen Standardunsicherheit (Fluke 5700A)

$\delta K_{\text{transfer}}$

Die Kurzzeitstabilität (Wiederholbarkeit) des Kalibrators und des Setups wirkt sich auf die Messung selbst (Typ-A, siehe oben) und bei der Verwendung des Kalibrators als Quelle zur Kalibrierung von Messgeräten oder beim direkten Vergleich zu einem baugleichen System aus (Validierung). Dieser Anteil der sog. Transferunsicherheit wurde aus verschiedenen Messreihen bestimmt und liegt bei 2 $\mu\text{V/V} + 100 \text{ nV}$ (Bereich $<20 \text{ Hz}$), 0,5 $\mu\text{V/V} + 30 \text{ nV}$ (Bereich 20 Hz bis 375 Hz) und 0,5 $\mu\text{V/V} + 70 \text{ nV}$ (Bereich $>375 \text{ Hz}$ bis 1000 Hz).

⁹ siehe <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/DC-NF-High-End/Tabelle-III.3-Analyse-AC-Einstellparameter-JVS-Fluk-5700A.xlsx>

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	34 von 1



$K_{leakage}$

Vor allem bei höheren Frequenzen können Leckströme durch parasitäre Kapazitäten der Kabel und Stromversorgungen das Messergebnis signifikant beeinflussen, wobei jeder Leckstrom zu einem Spannungsabfall über den Verbindungsleitungen führt und sich die gemessene Spannung damit verringert. Die Größenordnung des Einflusses wurde untersucht, in dem zusätzliche Widerstände in die Anschlussleitungen des Systems eingefügt wurden. Die Intervallgrenze $a_{leakage}$ des Effekts konnte dabei etwa mit

$$a_{leakage} \approx 0,01 \mu V/V + 0,1 \cdot \frac{f}{kHz} \mu V/V$$

genähert werden. Da es sich um einen „wahrscheinlichen“ Einfluss handeln wird diese Werte als Grenzen einer u-Verteilung angenommen.

K_f

Korrektur aufgrund der Frequenzunsicherheit, kleiner $8,5 \cdot 10^{-12} \cdot f$ ($k=2$, normalverteilt), bei direkter Abbildung auf die Spannungsunsicherheit ergibt sich somit ein Beitrag kleiner $0,0085 \text{ nV/V}$.

$K_{mismatch}$

Durch die Quellimpedanz des Messobjektes bei Betrieb an der Last R_L kommt es zu einer systematischen Abweichung, da diese Anschlusstechnik einen Spannungsteiler darstellt. Dieser Einfluss hat nur bei Verwendung des Systems im Modus „Direct“ einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis. Durch die Differenzmessung im für alle Spannungsmessungen empfohlenen Modus „Differential“ werden Impedanzunterschiede vernachlässigbar klein. Der Quellwiderstand R_Q kann abgeschätzt werden, indem mit einer bekannten Belastung die gemessene Spannungsänderung der Quelle beobachtet wird. Die Korrektur des Einflusses kann somit angegeben werden als

$$K_{mismatch} = 1 + \left(\frac{R_L}{R_Q} \right)$$

Selbst bei einer Unsicherheit der Bestimmung des Quellwiderstandes von $\pm 1 \%$ wirkt sich dies lediglich mit maximal $0,5 \mu V/V$ auf das korrigierte Ergebnis aus (Annahme 50Ω Quellwiderstand, z.B. Fluke 5700A in Bereichen $\leq 220 \text{ mV}$). Wird der Effekt nicht korrigiert so ist abhängig von der Quelle mit einem Unsicherheitsintervall von bis zu $\pm 50 \mu V/V$ zu rechnen. Im Betrieb mit kleinem Quellwiderstand von z.B. $0,1 \Omega$ bis 1Ω (z.B. Fluke 5700A $> 220 \text{ mV}$) verringert sich das Einflussintervall auf maximal $0,01 \mu V/V$.

$K_{CMC,PTB}$

unbekannte Korrektur aufgrund der „endlich genauen“ Möglichkeit der Validierung des Systems mit traditioneller Messtechnik. Dadurch kann das System nicht besser werden, als ein Vergleich innerhalb der Unsicherheiten der nationalen Rückführung (PTB) möglich ist (siehe PTB Bericht vom 2015-10-27 Geschäftszeichen PTB-Arbeitsgruppe 2.63).

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	36 von 1

III.3.3.2 Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz

Größe x_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität $ c_i $	relativer Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)^{10}$
U_{JVS}	$\overline{U_{JVS,n=10}}$	σ_{JVS}	Normal (Typ A)	σ_{JVS}	$1/U_{JVS}$	w_{JVS}
$K_{transfer}$	1	$a_{transfer}$	Normal	$\frac{a_{transfer}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{transfer}$
K_{gain}	1	a_{gain}	Rechteck	$\frac{a_{gain}}{\sqrt{3}}$	1	w_{gain}
K_{drift}	1	a_{drift}	Rechteck	$\frac{a_{drift}}{\sqrt{3}}$	1	w_{drift}
$K_{bandwidth}$	1	$a_{bandwidth}$	Rechteck	$\frac{a_{bandwidth}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{bandwidth}$
K_{phase}	1	a_{phase}	Rechteck	$\frac{a_{phase}}{\sqrt{3}}$	1	w_{phase}
$K_{leakage}$	1	$a_{leakage}$	u-verteilt	$\frac{a_{leakage}}{\sqrt{2}}$	1	$w_{leakage}$
K_f	1	a_f	Normal (k=2)	$\frac{a_f}{2}$	1	w_f
$K_{CMC,PTB}$	1	a_{CMC}	Normal (k=2)	$\frac{a_{CMC,PTB}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{CMC,PTB}$
U_{DUT}	Standardunsicherheit			$w(U_{DUT}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 w_i^2(y)}$		$w(U_{DUT})$
	rel. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(U_{DUT}) = k \cdot w(U_{DUT})$		$W(U_{DUT})$

III.3.3.3 AC-Unsicherheit Messgeräte

Messgeräte können nur im Transfer mit einer zuvor eingemessenen Quelle der Spannung $U_{Transfer}$ kalibriert werden. Eine Direktmessung gegen das AC-JVS ist nicht möglich. Daher sind zusätzlich die Leckströme doppelt zu berücksichtigen, bzw. <220 mV tritt die Unsicherheit der Impedanzkorrektur mindestens am Messobjekt (z.B. DMM) auf. Die Gesamtunsicherheit wird ggf. durch einen zusätzlichen Beitrag des Messobjektes überlagert, der ebenfalls in der Größenordnung der Typ-A-Unsicherheit der Quelle geschätzt wird.

$$U_{Transfer} = (U_{JVS} + \delta U_{line}) \cdot K_{transfer} \cdot K_{gain} \cdot K_{bandwidth} \cdot K_{phase} \cdot K_{leakage} \cdot K_f \cdot K_{CMC,PTB}$$

$$U_{DMM} - \Delta U_{DMM} - \delta U_{resolution} = U_{Transfer} \cdot K_{leakage,DMM} \cdot K_{mismatch,DMM}$$

$$\Delta U_{DMM} = U_{DMM} - \delta U_{resolution} - U_{Transfer} \cdot K_{leakage,DMM} \cdot K_{mismatch,DMM}$$

¹⁰ relative Beiträge werden mit w referenziert; absolute Beiträge mit u

III.3.3.4 Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz

Größe x_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität $ c_i $	relativer Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)$ ¹¹
U_{Transfer}	$\overline{U}_{\text{JVS},n=10}$	\perp_{Transfer}	Normal	u_{Transfer}	$1/U_{\text{Transfer}}$	w_{Transfer}
U_{DMM}	$\overline{U}_{\text{DMM},n=10}$	σ_{DMM}	Normal (Typ A) ¹²	σ_{DMM}	$1/U_{\text{DMM}}$	w_{DMM}
$\delta U_{\text{resolution}}$	0	$a_{\text{resolution}}$	Rechteck	$\frac{a_{\text{resolution}}}{\sqrt{3}}$	$1/U_{\text{resolution}}$	$w_{\text{resolution}}$
$K_{\text{leakage, DMM}}$	1	$a_{\text{leakage, DMM}}$	u-verteilt	$\frac{a_{\text{leakage, DMM}}}{\sqrt{2}}$	1	$w_{\text{leakage, DMM}}$
$K_{\text{mismatch, DMM}}$	$1 + \left(\frac{R_{\text{DMM}}}{R_Q}\right)$	$a_{\text{mismatch, DMM}}$	Rechteck	$\frac{a_{\text{mismatch, DMM}}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{\text{mismatch, DMM}}$
ΔU_{DMM}	Standardunsicherheit			$w(\Delta U_{\text{DMM}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 w_i^2(y)}$		$w(\Delta U_{\text{DMM}})$
	rel. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(\Delta U_{\text{DMM}}) = k \cdot w(\Delta U_{\text{DMM}})$		$W(\Delta U_{\text{DMM}})$

III.3.3.5 Ergebnisse AC

Die Zahlenwerte und Berechnungen sind in Microsoft Excel erstellt und folgender Tabelle zu entnehmen:

<http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-III.3.2-AC-DC-JVS.xls>

Messgröße / Kalibriergegenstand	Messbereich / Messspanne	Messbedingungen / Verfahren	kleinste angebbare Messunsicherheit	Bemerkungen
Wechselspannung	2 mV bis 10 mV	10 Hz; 12,5 Hz	$26 \cdot 10^{-6} \cdot U + 0,11 \mu\text{V}$	U ist die gemessene Spannung Kalibrierung von Spannungsquellen am Josephson- Voltmeter
		20 Hz; 25 Hz; 30 Hz; 37,5 Hz; 40 Hz; 75 Hz; 80 Hz; 125 Hz; 312,5 Hz; 375 Hz	$28 \cdot 10^{-6} \cdot U + 23 \text{ nV}$	
		48 Hz; 60 Hz; 62,5 Hz	$19 \cdot 10^{-6} \cdot U + 0,11 \mu\text{V}$	
		625 Hz; 937,5 Hz; 1 kHz	$17 \cdot 10^{-6} \cdot U + 0,13 \mu\text{V}$	
	>10 mV bis 60 mV	10 Hz; 12,5 Hz	$13 \cdot 10^{-6} \cdot U + 0,19 \mu\text{V}$	
		20 Hz; 25 Hz; 30 Hz; 37,5 Hz; 40 Hz; 75 Hz; 80 Hz; 125 Hz; 312,5 Hz; 375 Hz	$8,6 \cdot 10^{-6} \cdot U + 0,16 \mu\text{V}$	
		48 Hz; 60 Hz; 62,5 Hz	$10 \cdot 10^{-6} \cdot U + 0,16 \mu\text{V}$	
		625 Hz; 937,5 Hz; 1 kHz	$9,1 \cdot 10^{-6} \cdot U + 0,16 \mu\text{V}$	
	>60 mV bis 7,2 V	10 Hz; 12,5 Hz	$10 \cdot 10^{-6} \cdot U + 0,14 \mu\text{V}$	
		20 Hz; 25 Hz; 30 Hz; 37,5 Hz; 40 Hz; 75 Hz; 80 Hz; 125 Hz; 312,5 Hz; 375 Hz	$2,2 \cdot 10^{-6} \cdot U + 0,16 \mu\text{V}$	
		48 Hz; 60 Hz; 62,5 Hz	$4,2 \cdot 10^{-6} \cdot U + 0,14 \mu\text{V}$	
		625 Hz; 937,5 Hz; 1 kHz	$1,4 \cdot 10^{-6} \cdot U + 0,16 \mu\text{V}$	

¹¹ relative Beiträge werden mit w referenziert; absolute Beiträge mit u

¹² Für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit steht hier ein „worst case“ Beitrag mit Rechteckverteilung



© esz AG, 2018

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.11	von: PF am: 06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - III Direktmessverfahren an festen Normalen oder einer variablen AC/DC-Quelle	39 von 1