

IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter

(z. B. HP 3458A, Fluke 8508A, Keithley 617 etc.)

IV.1 Messung an einem direkt anzeigenden Multimeter

In direkter Messung können die von Geräten bzw. einem Kalibrator erzeugten Spannungen, Ströme und Widerstände direkt mit einem der Systemmultimeter wie Hewlett Packard / Agilent / Keysight 3458A, Fluke 8508A, Solartron 7071 o. ä. gemessen werden (Bild IV.1). Dabei ist zu beachten, dass die Multimeter immer so angeschlossen und betrieben werden, wie es im aktuellen Kalibrierschein vermerkt ist. Auf jeden Fall muss beim HP 3458 die Funktion ACAL und Nullung (Zero) durchgeführt worden sein. Gemessen wird in der Regel im hochauflösenden Modus mit hoher Integrationszeit.

	empfohlene Geräteeinstellung HP 3458A	empfohlene Anschluss technik
alle Messungen	ACAL ALL NPLC 200	GUARD TO LO (unguarded)
DC	NDIG 8 MATH NULL via Kurzschluss	siehe auch Tabelle III.1.1.1 Fluke 5440-7002, 40cm Stromstärke <10 mA, geschirmte, verdrehte Leitung (Pomona 1167), relativ zu Kupferkurzschluss (DC-Spannung) oder Leerlauf (DC-Stromstärke)
AC	SETACV SYNC RES .001 LFILTER ON bis 50 kHz	geschirmte, verdrehte Leitung (Pomona 1167) oder BNC RG58 Leitung, ca. 0,5m bis max. 1m
4-Draht Widerstand	OHMF OCOMP ON	Fluke 5440-7002, 40cm >1 MOhm 2x geschirmte BNC RG58 Leitung oder geschirmte, verdrehte Leitung, 2-Draht (Pomona 1167)

Die Multimeter HP 3458A verfügen darüber hinaus über umfangreiche Statistikfunktionen, die die Auswertung der Messunsicherheit weiter ergänzen können:

- MATH STAT
- RMATH MEAN (Mittelwert) oder RMATH SDEV (Standardabweichung)

Vor und während der Kalibrierung sollte immer wieder der Wert des internen Temperatursensors vom Multimeter ausgelesen werden (TEMP?). Bei zu geringer Aufwärmzeit oder einer Änderung der internen Temperatur um mehr als 1 K ist ein erneutes Aktivieren der ACAL Funktion nötig, da eine signifikante Beeinflussung der Messergebnisse besonders im AC-Bereich beobachtet werden konnten.

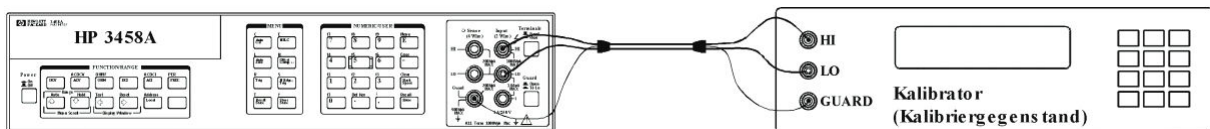


Bild IV.1 Direkte Messung am Kalibratorausgang

Widerstände werden in direkter Messung wenn möglich im Vierdrahtverfahren, sonst im Zweidrahtverfahren ermittelt. Dabei sind am HP 3458A die Einstellungen NPLC 200 und OCOMP ON zu verwenden (Bild IV.2).

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	1 von 1

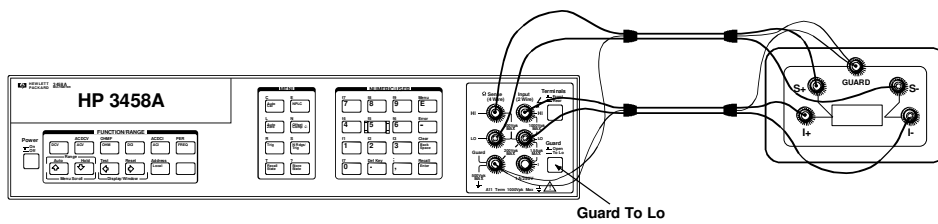


Bild IV.2 Widerstandsmessung im Vierdraht-Verfahren

Im Zweifelsfall sind die Bedienhinweise und Spezifikationen des Kalibriergegenstands bzw. des verwendeten Multimeters zu beachten. In jedem Fall wird im Kalibrierschein vermerkt, wie der Kalibriergegenstand am Normal angeschlossen wurde.

IV.1.1 Artefaktabgleich

Ähnlich Kapitel III.1.5 ist der Artefaktabgleich der Multimeter der Serie HP 3458A ein praktikables und äußerst zweckmäßiges Mittel um die Unsicherheiten und Nominalabweichungen dieser Geräte klein zu halten. Anders als die Kalibratoren der 57xxA-Reihe von Fluke müssen die Multimeter ohnehin vor jedem Gebrauch abhängig von der internen Gerätetemperatur auf ihre internen Referenzen abgeglichen werden (ACAL ALL). Abhängig von der individuellen Drift dieser Referenzen werden alle Bereiche bereits bei diesem Vorgang dann auf ihr Optimum eingestellt. Dies ist vor allem der exzellenten Linearität und dem „zeitstabilen“ Frequenzgang zu verdanken. Dabei zeigt sich, dass unterschiedliche (individuelle) Geräte der Serie auch unterschiedlich reagieren können, d.h. es lassen sich „gute“, stabile Geräte identifizieren und schlechtere. Gute Geräte arbeiten oft mit deutlich kleineren Ausnutzungen des vom Hersteller angegebenen Toleranzfeldes, während die übrigen „nur“ innerhalb dieser vom Hersteller für den ungünstigsten Fall spezifizierten Grenzen arbeiten. Dabei hat sich gezeigt, dass die Betriebsbedingungen die Performanz verbessern können, so dass zwischen den Rekalibrierungen nur mit sehr kleinen Veränderungen zu rechnen ist. So führen z.B. Dauerbetrieb, konstante Laborbedingungen, regelmäßige Lüfterreinigung und Monitoring der internen Temperatur zu einer wesentlich besseren Performanz gegenüber anderen Geräten, die z.B. häufig ein- und ausgeschaltet werden oder bei vor-Ort-Einsätzen eingesetzt werden. Weiter kann neben der Abhängigkeit vom internen Abgleich auch gezeigt werden, dass individuelle Geräte auch unterschiedlich gegenüber einer externen Justage reagieren. Ein Gerät mit kleinen Nominalabweichungen nach dem Abgleich stellt sich bei einem erneutem Abgleich im Regelfall auch wieder auf genau diese kleinen Abweichungen ein. Zusammen mit einer geringen Drift der internen Normale und Referenzen (10 V, 1 kΩ) kann somit eine kleinstmögliche Toleranzausnutzung über die gesamte Lebensdauer und im gesamten (eindimensionalen) Parameterbereich garantiert werden. Dabei reicht, wie bei den Geräten der Fluke 57xxA Serie, bereits eine externe Kalibrierung, um das Verhalten nach dem Abgleich zu charakterisieren. Eine weitere externe Kalibrierung ermöglicht Aussagen über die Verschiebung (Drift) der internen Normale und die Auswirkung auf die gesamten Geräteparameter.

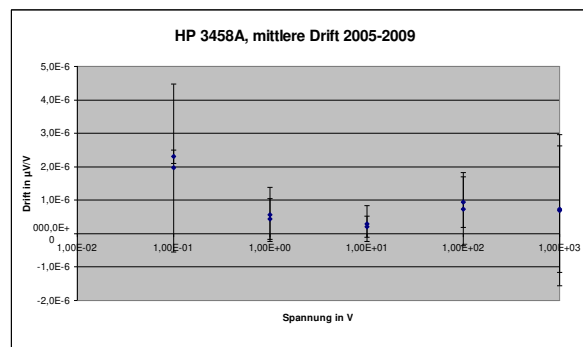
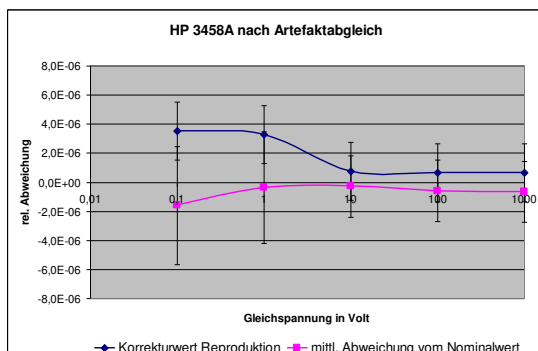


Bild IV.1.1.1 ausgewähltes DMM nach Artefaktabgleich. Die mittlere Abweichung vom Nominalwert nach dem Abgleich über 5 Jahre ($<2 \mu\text{V/V}$, $k=2$) liefert zusammen mit der Drift genau dieses Gerätes (ebenfalls etwa $2 \mu\text{V/V}$ maximal) eine verlässliche Auskunft über die zu erwartende Performanz. Die Nichtlinearität der Bereiche ist dabei so gut, dass diese keinen wesentlichen Beitrag zur Gesamtunsicherheit leistet und das Gerät damit über das eindimensionale Parameterfeld „Gleichspannung“ zwischen und nach dem Abgleich charakterisiert ist.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	2 von 1

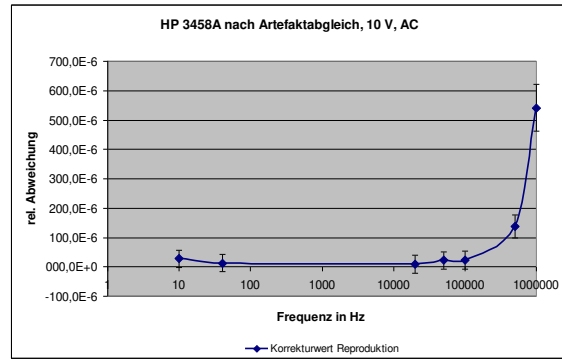
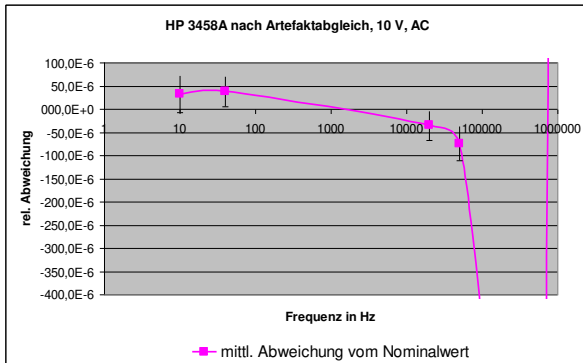


Bild IV.1.1.2 Im Wechselbereich verhält sich die Reproduktion der Abweichung nach einem Abgleich ähnlich wie bei der Kalibratorserie Fluke 57xxA: Während bis 100 kHz mit kleinen Abweichungen, einem flachen Frequenzverlauf und hoher Abgleich-Reproduzierbarkeit zu rechnen ist, muss für Frequenzen darüber ein erhöhter Unsicherheitsbeitrag für die Abgleichunsicherheit berücksichtigt werden, der jedoch z. T. durch die Gesamtunsicherheit in diesen Bereichen maskiert (übersteuert) wird. Da aber im multidimensionalen Parameterraum (z. B. beliebige Spannung UND beliebige Frequenz) nur schwer auf ein „individuelles“ eigendefiniertes Spezifikationsintervall zu schließen ist, ist es zweckmäßig die vom Hersteller gemachten Angaben zu nutzen, solange bei der Kalibrierung kein „Raster“ über den Werteraum gelegt wird, um die Einflüsse Linearität und Frequenzgang in jedem Bereich genau zu erfassen und zu quantifizieren.

IV.1.2 Interpolation von Messwerten

Analog zu Kapitel III.1.6 kann mit den Informationen eines Korrekturwertes von Digitalmultimetern (DMM) an Stützpunkten entweder ein sog. eigendefiniertes Spezifikationsintervall gesetzt werden oder der Messwert im gesamten Bereich korrigiert werden. Dies ist wie beschrieben nur im eindimensionalen Parameterraum möglich und macht bei DMMs somit v. a. in den DC-Bereichen Sinn. Bei sorgfältigen metrologischen Messaufbauten kann somit die gute Linearität der A/D-Wandler ausgenutzt werden, um mit einer solchen Bereichscharakterisierung des Normals optimale Messergebnisse fast unabhängig vom Eingangswert zu erzielen. Sofern jeweils nur ein Stützpunkt (z. B. am Bereichsende) bei der Kalibrierung bekannt ist, wird dabei zunächst nur die lineare Interpolation ohne konstantes Glied möglich. Die Validierung dieser Annahme ist durch eine „Nullmessung“ (vgl. z.B. III.1.1), den Vergleich der Messwerte am Bereichsende mit dem des Bereichsanfangs des nächst höheren Bereichs, die Auswertung der Linearitätskalibrierung, eine „Step-Up“-Kalibrierung mit zwei Spannungsquellen parallel gegen eine Zener-Referenz oder andere metrologische Verfahren möglich.

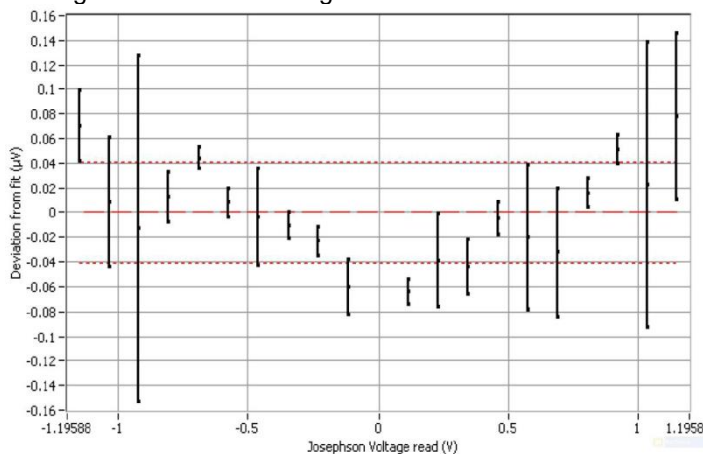


Fig.2: Linearity Fluke 8508 2V range

Bild IV.1.2.1 Ermittelte Linearität des Fluke 8508A gegen ein Josephson-AC/DC-Spannungssystem

IV.1.3 Variante als Direktmessung mit AC/DC-Transfornormal Fluke 5790A

IV.1.3.1 Wechselspannung

Ähnlich wie in Kapitel III.1.1.1 genannt kann ein AC/DC-Transfornormal wie Fluke 5790A in Direktmessung zur Kalibrierung von Quellen genutzt werden. Da bereits der Betrieb im Modus „Direct“ sehr stabil ist, ist eine externe Referenzierung gegen eine Gleichspannungsquelle nicht zwingend

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC- Direktmessverfahren an einem Multimeter	3 von 1

erforderlich. Die Betriebsparameter sind ebenfalls in III.1.1.1 beschrieben, wichtig sind möglichst kurze Messleitungen, die genaue Definition der Referenzebene, „Range Lock“ und der Bezug auf ausschließlich einen Punkt als Messerde.

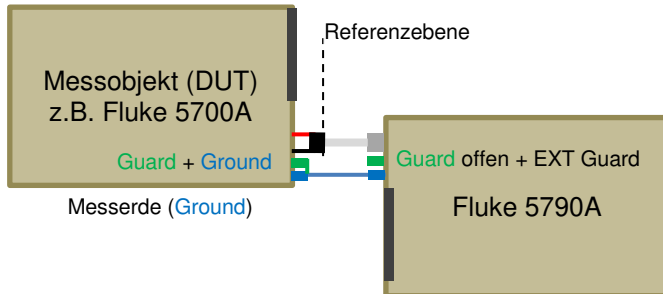


Bild IV.1.3.1 Anordnung (Draufsicht) von Normal und Messobjekt (DUT)



Bild IV.1.3.2 schematische Einstellung von Normal und DUT am Beispiel von Fluke 5700A als Messobjekt

IV.1.3.1 Wechselstromstärke

Zusammen mit einem stabilen AC-Shunt wie Fluke A40 kann das AC/DC-TransfERNormal (Fluke 5790A) in einer Variante zum Substitutionsverfahren für Wechselstromstärkekalibrierungen mit sehr kleinen Messunsicherheiten genutzt werden. Dabei sind besonders bei höheren Frequenzen >1 kHz genau definierte Belastungszustände des Kalibriergegenstandes (Kalibrator) erforderlich, um dessen Lastabhängigkeit vergleichbar zu halten. Die ermittelten Messwerte beziehen sich damit auf diese Referenzbedingungen, z. B. "Belastung mit A40 Shunt" oder „rein ohmsche Last; 500 mV“. Zusätzliche Induktivitäten oder Impedanzen zu dieser Referenzbedingung können abweichende Messergebnisse des DUT bewirken und sind zu vermeiden. Die Lastbedingung muss daher im Kalibrierschein dokumentiert werden.

Um den traditionellen AC/DC Transfer zu vereinfachen wird anstatt DC-Stromstärke ein Wechselfignal bei kleiner (lastunabhängiger) Frequenz wie z.B. 40 Hz als Referenzstromstärke herangezogen. Da der Frequenzgang der Fluke A40-Widerstände üblicherweise sehr klein ist, können auch Shunts dieser Serie eingesetzt werden, deren genaue AC/DC-Transferdifferenzen nicht regelmäßig kalibriert werden. Diese Annahme wird anhand durchgeführter Vergleichsmessungen gut bestätigt (z. B. Vergleichsmessung mit Fluke Service Center, Köln).

Die Referenzebene des TransfERNormals wird über eine passende Adaption (Eigenbau Kalibrieradapter KL30254 mit Typ-N-Buchse am Ausgang) mit dem A40-Widerstand verbunden. Der Shunt selber wird über eine induktionsarme Anpassung (ebenfalls Eigenbau, A40-Adapter-Shuntanschluss auf Kalibratoranschluss) direkt mit der zu vermessenden Stromquelle verbunden.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	4 von 1

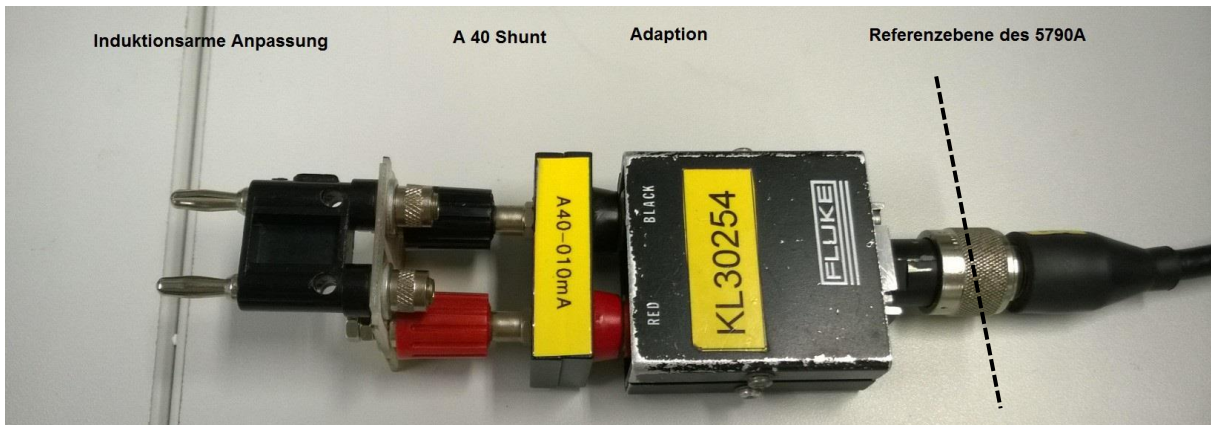


Bild IV.1.3.1.1 Eigenbau-Adapter für AC-I-Messungen am Fluke 5790A

Im „Ratio-Modus“ des 5790A wird zuerst der 40 Hz Wert als Referenzwert für alle nachfolgenden Messungen eingestellt (Folgefrequenzen z. B. 400 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz). Durch die Ratiofunktion des 5790A kann nun direkt die Stromstärke relativ zum 40 Hz Stützpunkt bestimmt werden. Zur Stabilitätskontrolle wird nach erfolgter Messung noch einmal der 40 Hz Messpunkt überprüft. Der Anfangswert muss dabei besser als 5 $\mu\text{V/V}$ wiederholbar sein. Der Absolutbezug des Ergebnisses wird durch eine Anfangs- und Endmessung gegen eine bekannte Stromquelle (z.B. Bezugsnormal Fluke 5700A) hergestellt. Dieser Bezugspunkt kann auch durch das DUT selbst dargestellt werden, wenn in einem vorangegangenen Schritt die Abweichung bei Niederfrequenzbetrieb (40 Hz) z. B. durch Substitutionsmessung bestimmt wurde.

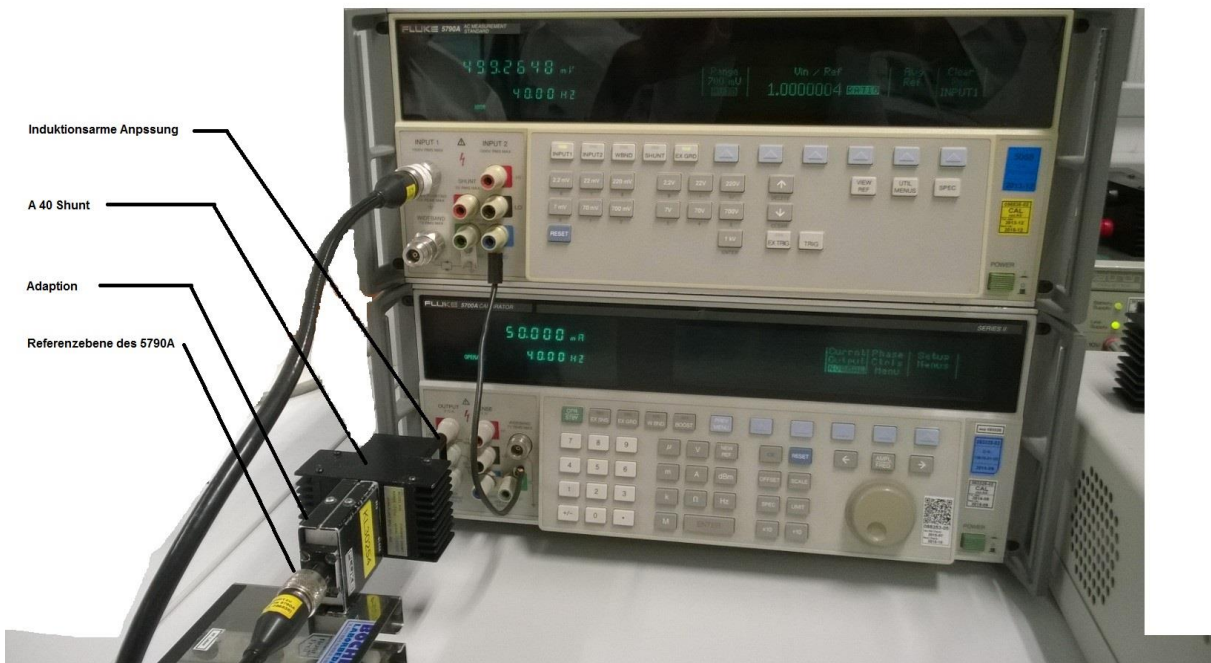


Bild IV.1.3.1.2 Anschluss einer Wechselstromquelle an Shunt und 5790A

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 AC/AC-Vergleich bereits sehr gute Messergebnisse erzielt und kürzere Messzyklen hat. Zusammen mit der Historie des Normals und der Abschätzung der Wiederholbarkeit lassen sich also auch im Direktbetrieb („Direct“) kleine Messunsicherheiten an den kalibrierten und rückgeführten festen Stützpunkten über den Frequenzbereich bis 10 kHz erzielen.

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

- „Input 1“ im 700 mV Bereich am 5790A einstellen. Der Nennstrom der Widerstände wird in

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	5 von 1

etwa 450 mV Spannungsabfall erzeugen.

- Ext.Guard ist „EIN“.
- Die Brücke von ERDE zu GUARD am 5790A ist offen.
- Die Stromquelle (z.B. 5700A/5720A) ist der Erdpotentialpunkt aller Messgeräte – Es darf nur eine Messerde im Aufbau geben!
- Den 40 Hz Stromwert an der Quelle setzen.
- Set Ref auf „EIN“

Ablauf der Messung

- Anschließen des Bezugsnormals an Kombination aus Shunt und 5790A (A40/5790A)
- bekannte Stromstärke I_{Ref} bei niedriger Frequenz wie 40 Hz (Referenzfrequenz) einstellen
- „Set Ref“ → Anzeige V_{in} / V_{ref} zeigt 1.0000000
- Anschließen des DUT an Shunt A40/5790A
- Stromstärke bei erster Testfrequenz (z. B ebenfalls 40 Hz) einstellen
- aus dem relativen Verhältnis V_{in} / V_{ref} zu 40 Hz absolute Stromstärke des DUT bestimmen:

$$I_{DUT} = I_{Ref} \cdot \frac{V_{in}}{V_{Ref}}$$

- nächste Testfrequenz am DUT einstellen (z.B. 100 Hz)
- ...
- Abschlussmessung: Anschließen des Bezugsnormals an Kombination aus Shunt und 5790A (A40/5790A) und Reproduktion des Anfangswertes (V_{in} / V_{ref}) auf 1.0000000 ± 0.000005

Modellgleichung

$$I_{DUT} = I_{Ref} \cdot \frac{V_{in}}{V_{Ref}} \cdot K_{I,Ref} \cdot K_{\delta f,Shunt} \cdot K_{\delta f,5790} \cdot K_{Lin} \cdot K_{rep} \cdot K_{RV}$$

mit

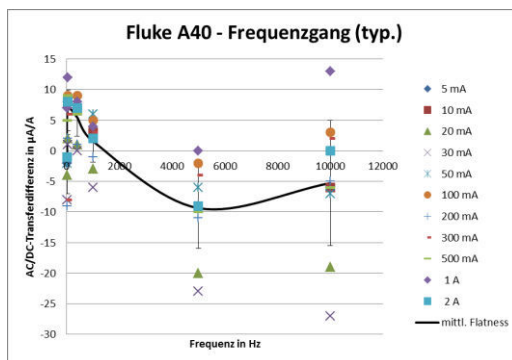
I_{DUT} gesuchte Quellstromstärke des Messobjekts (DUT)

I_{Ref} Referenzstromstärke des Bezugsnormals bei kleiner Frequenz (40 Hz)

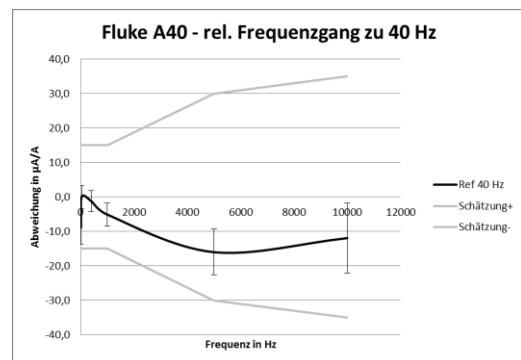
V_{in}/V_{Ref} abgelesenes Verhältnis am 5790A

$K_{I,Ref}$ Einfluss durch die Unsicherheit der Referenzstromstärke (entnehmbar aus den MU-Bilanzen des Bezugsnormals, Normalverteilung mit k=2)

$K_{\delta f,Shunt}$ Einfluss durch den Frequenzgang des Shunts. Der genaue Frequenzgang der eingesetzten Shunts ist nicht bekannt, jedoch sind aus ehemaligen Charakterisierungen derselben Serie die zu erwartenden AC/DC-Transferdifferenzen abschätzbar. Daraus lässt sich das Intervall der Frequenzgangabweichung bezogen auf Referenzfrequenz ermitteln (Grenzen einer Rechteckverteilung).



Fluke A40 – typ. Frequenzgang bis 2 A



Abschätzung des Frequenzgangs relativ zu 40 Hz

$K_{\delta f,5790A}$ Einfluss durch den Frequenzgang der Wechselspannungsmessung am Ausgang des

Ausgabe: DMS.47	erstellt von: PF am: s. DMS	geprüft/genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC- Direktmessverfahren an einem Multimeter	Seite 6 von 1
---------------------------	--	---	--	-------------------------

Shunts. Der genaue Frequenzgang ist dem Kalibrierschein des Geräts im relevanten Messbereich bis 10 kHz zu maximal $\pm 10 \mu V/V$ zu entnehmen (Rechteckverteilung).

K_{Lin} Werden abweichende Stromstärken als die kalibrierten Stützpunkte des Bezugsnormals kalibriert, muss innerhalb des 700 mV-Messbereichs des 5790A mit frequenzabhängigen Nichtlinearitäten gerechnet werden. Diese Nichtlinearitäten werden innerhalb eines Intervalls von $\pm 10 \mu V/V$ (Rechteckverteilung) abgeschätzt.

K_{rep} Als typische Wiederholbarkeiten werden Werte innerhalb von $\pm 5 \mu V/V$ akzeptiert

K_{RV} Zusätzlicher frequenzabhängiger Einfluss, der zu $\pm \sqrt{\frac{f}{1 \text{ kHz}}} \cdot 20 \mu V/V$ (Rechteckverteilung) bestimmt wurde. Basis dieser Abschätzung ist ein Ringvergleich aus dem Jahr 2015 mit dem Fluke-Servicecenter, Köln.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	7 von 1

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz
am Messbeispiel von 50 mA, 1 kHz

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivität $ c_i ^1$	Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	a		$u(x_i)$		$u_i(y)$
I_{Ref}	50,0016 mA					
V_{in}/V_{Re} f	0,9999800					
$K_{I,Ref}$	1	40 μ A/A	Normal, k=2	$\frac{40 \mu A/A}{2}$	1	20,0 μ A/A
$K_{\delta f, Shunt}$	1	15 μ A/A	Rechteck	$\frac{15 \mu A/A}{\sqrt{3}}$	1	8,66 μ A/A
$K_{\delta f, 5790}$	1	10 μ V/V	Rechteck	$\frac{10 \mu V/V}{\sqrt{3}}$	$1 \frac{\mu A/A}{\mu V/V}$	5,77 μ A/A
K_{Lin}	1	10 μ V/V	Rechteck	$\frac{10 \mu V/V}{\sqrt{3}}$	$1 \frac{\mu A/A}{\mu V/V}$	5,77 μ A/A
K_{rep}	1	5 μ V/V	Rechteck	$\frac{5 \mu V/V}{\sqrt{3}}$	$1 \frac{\mu A/A}{\mu V/V}$	2,89 μ A/A
K_{RV}	1	20 μ V/V	Rechteck	$\frac{20 \mu V/V}{\sqrt{3}}$	$1 \frac{\mu A/A}{\mu V/V}$	11,55 μ A/A
I_{DUT}	rel. Standardunsicherheit			$w(I_{DUT}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u_i^2(I_{DUT})}$		26,1 μ A/A
	erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(I_{DUT}) = k \cdot u(I_{DUT})$		52 μ A/A

Berechnungen siehe <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-TabelleIV-an-Fluke-5790.xlsx> (Reiter AC-I im AC-AC-Transfer)

IV.2 Kalibrierung von Messgeräten mit zuvor eingemessenen Normalen (Quellen)

Neben der direkten Messung können die Multimeter dazu eingesetzt werden die im Labor vorhandenen Kalibriergeräte (Quellen) vor einer Kalibrierung „einzumessen“ und die Folgemessung am Kalibriergegenstand durchzuführen oder gleichzeitig zu überwachen („monitoren“, Gleichspannung beispielsweise parallel zur Quelle, Gleichstromstärken in Reihe). Sinnvoll und nötig kann dies im Widerstandsbereich werden: Da die Präzisionskalibratoren Fluke 5700A lediglich mit dekadischen Festwiderständen ausgerüstet sind, werden abweichende Zwischenwerte durch zuvor eingemessene Widerstände kalibriert. Dazu stehen diverse Widerstandsdekaden, Festwiderstände oder weitere Kalibratoren zur Verfügung (z.B. Wavetek 9000, Fluke 55XXA²).

Prinzipiell ist es jedoch möglich jede beliebige Quelle über eine gleichzeitige oder vorhergehende Kontrollmessung als Hilfsmittel zu verwenden, um mit einem DMM als Normal Messgeräte kalibrieren zu können. Hinreichende Stabilität und Wiederholbarkeit ist dafür jedoch zwingend vorauszusetzen.

¹ $c_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}$

² Die Messung an Festwiderständen ist i.d.R. vorzuziehen bzw. Ergebnisse sind zu vergleichen. Besonders bei zu niederohmigen Messelektroniken von Multimetern / Widerstandsmessgeräten versagt z.T. die Widerstandssimulation der Multifunktionskalibratoren 55XXA.

IV.2.1 Messunsicherheit (s. IV.3)

Die Messunsicherheitsbilanz dieser Methode erweitert sich ggf. durch die Verdopplung der Verfahrensunsicherheit $u(\delta X_A)$ und einen Anteil δX_w (s. IV.3) der Modellgleichung, der die Kurzzeitstabilität und Wiederholbarkeit der eingesetzten Kalibriergeräte einschließt. Darüber hinaus muss der Rundungsfehler der Anzeige $\delta Y_{R,K}$ auf den Kalibriergegenstand und die dokumentierte bzw. abgelesene Stellenzahl bezogen werden. Zur Abschätzung der Wiederholbarkeit und Kurzzeitstabilität wurden im Abstand von einer Stunde Kontrollmessungen an eigenen dekadischen Widerständen durchgeführt. Die dabei aufgetretenen Abweichungen der zweiten Messung werden als Unsicherheitsintervall mit Rechteckverteilung berücksichtigt (für Abstand Einmessen - Kalibrierung kleiner 1h):

Dekadenwert	Messung1(T)	Messung2(T+1h)	abs. Änderung
0 Ω	0,000007 Ω	0,000001 Ω	6,0 μΩ
1 Ω	0,9998637 Ω	0,9998666 Ω	2,9 μΩ
1,9 Ω	1,8998104 Ω	1,8998097 Ω	0,7 μΩ
10 Ω	9,9999537 Ω	9,9999879 Ω	34 μΩ
19 Ω	18,9997809 Ω	18,9998389 Ω	58 μΩ
100 Ω	99,99975 Ω	99,99964 Ω	110 μΩ
190 Ω	189,99554 Ω	189,99549 Ω	50 μΩ
1 kΩ	1,0000649 kΩ	1,0000647 kΩ	200 μΩ
1,9 kΩ	1,9000901 kΩ	1,900091 kΩ	0,9 mΩ
10 kΩ	9,999069 kΩ	9,99907 kΩ	1 mΩ
19 kΩ	19,001636 kΩ	19,001644 kΩ	8 mΩ
100 kΩ	99,99343 kΩ	99,99341 kΩ	20 mΩ
190 kΩ	190,02211 kΩ	190,02214 kΩ	30 mΩ
1,0 MΩ	1,0000077 MΩ	1,0000081 MΩ	4 Ω
1,9 MΩ	1,9002157 MΩ	1,900271 MΩ	55 Ω
10 MΩ	9,998718 MΩ	9,99869 MΩ	28 Ω
2-Draht			
19 MΩ	19,000835 MΩ	19,000863 MΩ	28 Ω
100 MΩ	100,0385 MΩ	100,0387 MΩ	200 Ω

Tabelle IV.1 - Kontrollmessung zur weiteren Abschätzung von Verfahreneinflüssen³

IV.3 Kalibrierung von Rechteckspannung an HP 3458A im DC-Modus

Um Rechteckspannungen zu messen kann das Digitalmultimeter (Samplingmultimeter) als Digitizer programmiert werden⁴. Im DC-Spannungsmodus ist durch dieses Verfahren die Messung der „Ober“- und „Unterlinie“ (Topline und Baseline) möglich. Daraus errechnet sich der Wert der Spitze-Spitze-Spannung (V_{ss}) des zu untersuchenden Signals. Der häufigste Einsatz stellt hierbei die Kalibrierung von Oszilloskopkalibratoren oder Funktionsgeneratoren dar.

Das Multimeter wird im Bereich DCV im manuell eingestellten Messbereich betrieben. Durch Triggern der Messung über einen pegelabhängigen oder externen Trigger (TRIGGER EXT oder TRIGGER LEVEL) wird ein definierter Bezugszeitpunkt (5%-Pegel, ansteigende Flanke) dieser Signale definiert. In Abhängigkeit dieses Zeitpunktes kann bei bekannter Signalfrequenz (f mit $T=1/f$) die Bestimmung der Ober- und Unterlinie über eine programmierte DELAY-Zeit erfolgen. Um Über- und Unterschwinger beteiligter Signale (Gibbsches Phänomen) nicht fälschlicherweise zu messen, soll dieser Startpunkt (t_{start}) bei mindestens $0,1T$ (20% Abstand zur Anstiegsflanke, siehe Bild IV.3) gesetzt werden. Unter Berücksichtigung des Triggerzeitpunktes $t_{Trigger}$ ergeben sich

³ 4-Draht-Messung, Temperatur(Labor) 23°C, Temperatur(HP) 42,5°C, Ergebnisse über Schnittstelle und Mittelwertbildung mit Stichprobenlänge $n=10$, <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-IV-U-I-R-HP3458A-Keithley617-6517.xls>

⁴ In Anlehnung an das Kalibrierverfahren der Oszilloskopfunktion des 5500A Multiproduktkalibrators aus 5500A Multi-Product-Calibrator, Service Manual, Rev. 5, Fluke Corporation, 1995

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	9 von 1

$$t_{Start,Top} = t_{trigger} + 0,1 \cdot T \text{ (DELAY 0,1} \cdot T \text{) und}$$

$$t_{Start,Base} = t_{trigger} + 0,6 \cdot T \text{ (DELAY 0,6} \cdot T \text{)}$$

Die maximal mögliche Integrationszeit der Messung ist durch das Intervall zwischen t_{Start} und t_{End} (ebenfalls $0,1T$ Abstand zur abfallenden Flanke) auf $0,3T$ begrenzt. Diese Integrationszeit lässt sich durch die Programmierung des NPLC-Wertes (Net Power Line Cycles) des HP 3458A unter Berücksichtigung der Netzfrequenz (i.d.R. 50 Hz) setzen.

$$NPLC = 0,3T \cdot f_{Netz} = 0,3T \cdot 50Hz$$

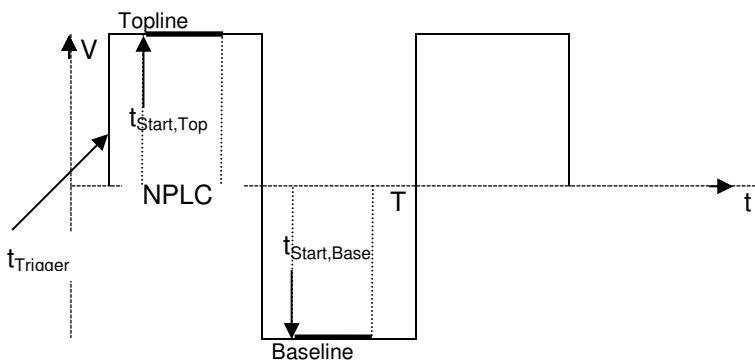


Bild IV.3 Rechteckmessung als DC-Digitizer

Die Programmierung und Messdatenerfassung erfolgt bei dieser Messmethode über die GBIP-Schnittstelle des Multimeters. Des Weiteren werden der Mittelwert und die Standardabweichung über eine Stichprobenlänge von $n=250$ gewonnen. Über die Wiederholung der Messung kann die Typ A Unsicherheit des Verfahrens gewonnen werden.

IV.3.1 50 Ω - Systeme (oder Anpassung an andere Impedanzen)⁵

Zum Beispiel in 50 Ω - Systemen wird ebenfalls mit o.g. Verfahren am hochohmigen Eingang des Multimeters (FIXEDZ ON) gemessen. Die vom Generator erzeugte komplexe Spannung a in Abhängigkeit der am Abschlusswiderstand Z_L anliegenden Spannung v_l wird ausgedrückt durch

$$a = v_l \left(\frac{1}{1 + \Gamma} \right) = v_l \left(\frac{Z_L + Z_0}{2Z_L} \right) \text{ mit } \Gamma \text{ als komplexen Reflexionsfaktor und } Z_0 \text{ als Nennimpedanz des}$$

Leitungssystems. Nimmt man rein reelle (ohmsche) Anteile der beteiligten Impedanzen im niedrigen Frequenzbereich <10 kHz an, so wird daraus

$$V_G = V_{SS} \left(\frac{R_L + R_0}{2R_L} \right) \text{ und für } R_L \rightarrow \infty \text{ (DMM Eingangswiderstand } 10 \text{ M}\Omega \text{) } V_G = \frac{V_{SS}}{2} \text{ als}$$

Berechnungsformel für die Generatorspannung an 50 Ω . Die systematische Abweichung durch verschiedene Quell- und Eingangsimpedanz bei Anwendung dieser Näherung ergibt sich zu

$$\Delta V_G = 1 - \left(\frac{10M\Omega}{10M\Omega + 50\Omega} \right) = 5 \cdot 10^{-6}.$$

Diese ist im Rahmen der übrigen beteiligten Messunsicherheitsanteile sehr klein und kann daher vernachlässigt werden. Alternativ kann an einem 50 Ω - Abschlusswiderstand über die Bananen-Buchse am Eingang des Multimeters gemessen werden. Der DC-Widerstandswert wird vor der Kalibrierung bestimmt und als Korrekturfaktor entsprechend berücksichtigt. Vergleichsmessungen

⁵ Siehe auch Arbeitsanweisung AA0239: <http://dmserver/technik/Arbeitsanweisungen/AA0239-Kalibrierung-von-Leistungen-und-Spannungen-in-angepassten-Leitungssystemen.doc>

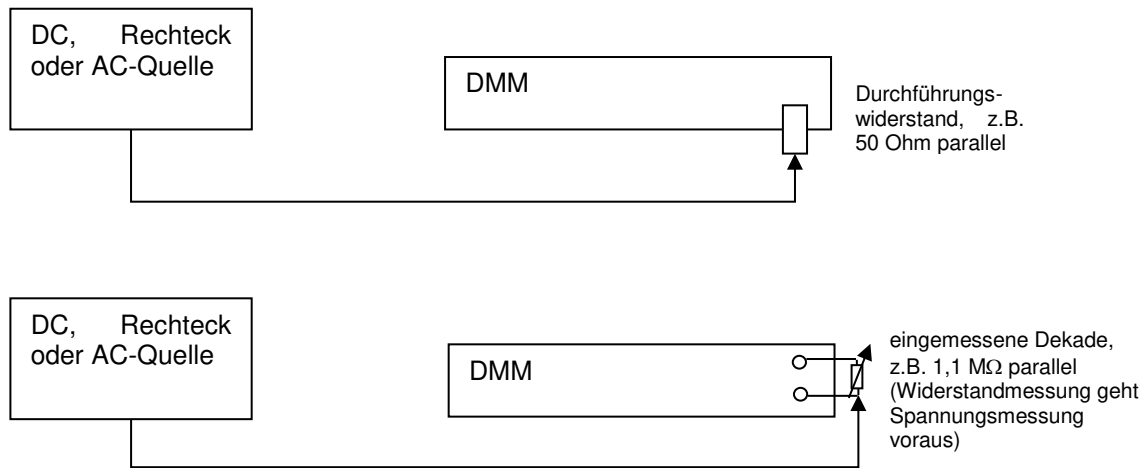
Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	10 von 1

ergaben keine signifikanten Abweichungen der beiden Messmethoden innerhalb der angestrebten Messunsicherheit.

Da sich der Ausgang der meisten Generatoren unter Last aber oft anders verhält als im Leerlauf ist eine Kalibrierung mit Lastabschluss sinnvoll. Durch die unterschiedlichen Reflexionsfaktoren ergeben sich mit einem „guten“ Abschluss über dem Multimetereingang (Reflexionsfaktor $r_L=0,0025$ bei Generatorimpedanzen mit r_G ebenfalls besser als 0,005 bis 20 kHz) Abweichungen von maximal

$$\Delta_{mismatch} \approx 100 \cdot r_L r_G \% = 0,00125\%$$

durch Fehlanpassungen. Dabei kann es genauso notwendig sein für unterschiedliche Arten von Generatoren eine unterschiedliche Lastanpassung durchzuführen. Dies kann über übliche Durchführungswiderstände oder im NF-Bereich bis 10 kHz durch Parallelschaltung (z. B. mit einer induktionsarmen Widerstandsdekade) mit dem nötigen Lastabschluss erfolgen. Bei „langen“ Wellenlängen bis 1 MHz kann darüber hinaus gezeigt werden, dass selbst bei höheren Fehlanpassungen dieser Einfluss eine geringere Rolle spielt als im Hochfrequenzbereich (vgl. IX.2.7).



IV.3.2 Messunsicherheit

Die Spitze-Spitze-Spannung V_{SS} des Rechtecks ergibt sich als Differenz der DC-Messwerte zwischen Topline-Spannung V_{Top} und Baseline-Spannung V_{Base}

$$V_{SS} = V_{Top} - V_{Base}$$

Die der Messung beizuordnende Messunsicherheit wird dabei dargestellt als:

$$u^2(V_{SS}) = u^2(V_{DC}) + u^2(V_{sq-DC}) \text{ mit}$$

$$u^2(V_{sq-DC}) = \frac{\Delta(V_{sq-DC})}{\sqrt{3}}$$

als Quadratesumme der Unsicherheitsbeiträge der Gleichspannungsmessmethode und eines zusätzlichen Anteils bei Betrieb des DMMs mit verkürzter Integrationszeit. Dieser „Rechteck-Beitrag“ wurde durch den Unterschied zwischen DC-Messung an einem Kalibrator, mit höchster Auflösung am DMM (NPLC \geq 100), und „Quasi-AC-Messung“ mit den verhältnismäßig kleinen Integrationszeiten (z. B. NPLC=0,0015 bei 10 kHz = 30 μ s) abgeschätzt. Der frequenzabhängige Zusammenhang lässt sich durch ein Polynom 2. Grades nähern (siehe <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-IV-U-I-R-HP3458A-Keithley617-6517.xls>). Im gezeigten Diagramm ergibt sich dadurch mit der Frequenz f in Hz ein Unsicherheitsintervall (rechteckverteilt) von

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	11 von 1

$$\Delta(V_{sq-DC}) = \left(1,2 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{V_{SS}^2}{V} + 1,8 \cdot 10^{-9} \cdot V_{SS} + 5,5 \text{ nV} \right) \cdot \frac{f}{\text{Hz}}$$

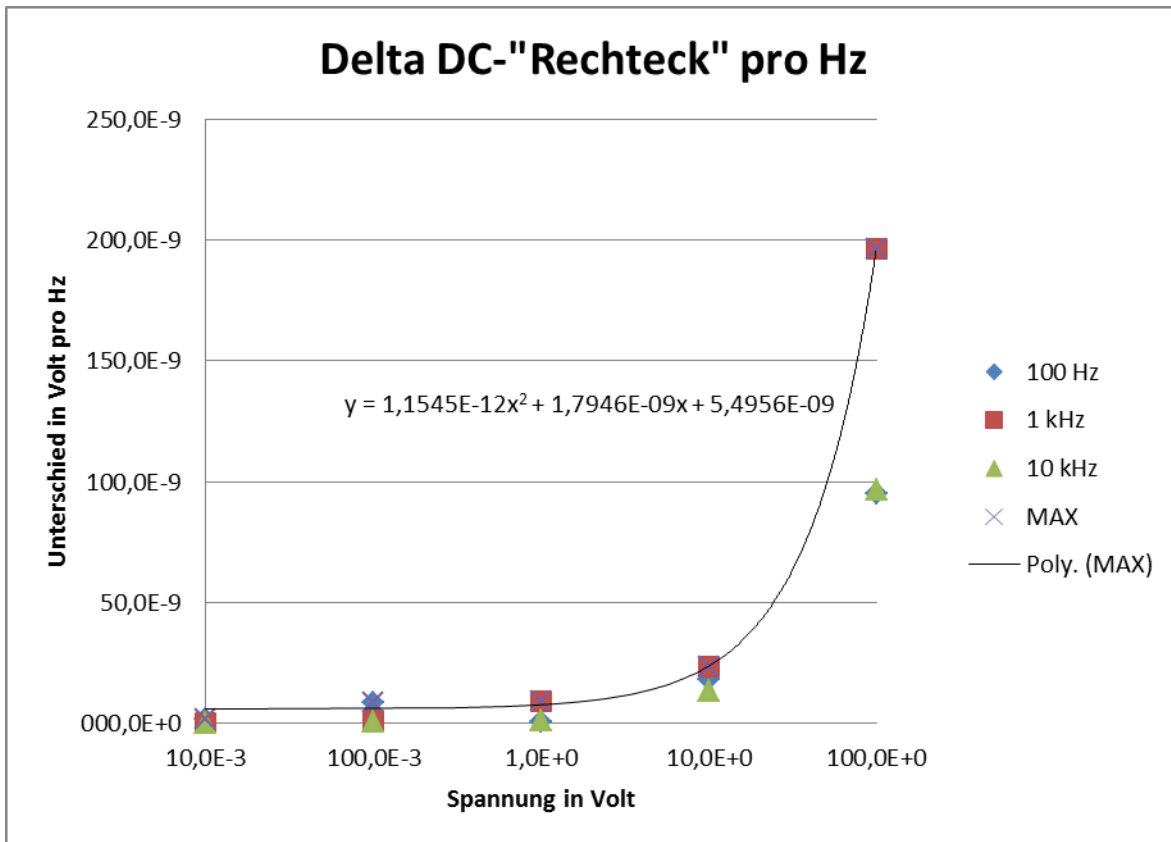


Bild IV.3.2 – Einfluss der AC-Rechteckmethode. Als Kontrollmessung wurden DC-Spannungen im Gleichspannungsbetrieb des DMMs gemessen und im Anschluss mit der Parametereinstellung der AC-Rechteckmethode mit verkürzter Integrationszeit

IV.4 Kalibrierung an Keithley 617, 6517 oder ULCA

IV.4.1 Gleichstromstärke

direkte Messung mit Elektrometer

Für präzise Strommessungen im Low-Current-Bereich steht z. B. das Elektrometer Keithley 617 oder 6517 zur Verfügung. Prinzipiell ist eine direkte Messung ähnlich IV.1 nach Aufwärmzeiten >2 Stunden möglich. Durchführung der Messung und Bedienung wird entsprechend den Hinweisen des Herstellers durchgeführt:

- Im verwendeten Messbereich wird das Gerät mit Aufbau im Leerlauf inklusive Anschlusstechnik und Kalibriergegenstand (DUT) durch Nullmessung korrigiert. Dabei wird, ebenso wie für alle folgenden Messungen, eine ausreichende Beruhigungszeit empfohlen. Diese kann abh. vom Messbereich bis zu 30 min betragen.
- Über die Triax-Anschlussbuchse auf der Geräterückseite und dem Messkabel Keithley 6011 wird der Kalibriergegenstand (Stromquelle, z.B. Source Keithley 263) angeschlossen. Für Präzisionsmessungen ist ein geschirmter Messaufbau zu wählen (Bild IV.4), d.h. der Schirm wird mit LO des Messeingangs verbunden.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	12 von 1

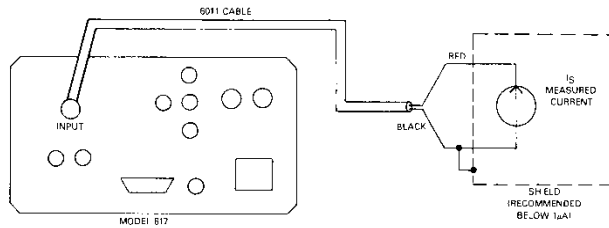


Bild IV.4 Anschlussbeispiel Keithley 617 (AMPS Modus und V-Guard OFF, s. User Manual)

An Hochohmdekade (indirekte Erzeugung) eingemessenes Elektrometer

Als Alternative zu dem in IV.1 beschriebenen Verfahren besteht zudem die Möglichkeit, den Gainfaktor im für die Messungen benötigten Messbereich des Keithley 6517A direkt vor Beginn der Messungen zu bestimmen. Der Gainfaktor G kann dann aus dem Anzeigewert I_{Anz} des Keithley 6517 bei Anliegen einer Referenzstromstärke (z.B. wie in Abs III.1.2 beschreiben) I_{Ref} bestimmt werden: $G = \frac{I_{Anz}}{I_{Ref}}$. Stehen mehrere Referenzstromstärken für den Messbereich zur Verfügung, so kann der Gainfaktor durch einen linearen Fit der Beziehung $I_{Anz} = G \cdot I_{Ref}$ bestimmt werden. Bei den folgenden Messungen können dann die Anzeigewerte des Keithley 6517 mit dem Korrekturfaktor $K = G^{-1}$ korrigiert werden. Als Referenzstromquelle kann z. B. ein Keithley 263 oder ein Verbund aus Hochohmwiderstand und Spannungsquelle benutzt werden. Bei diesem Verfahren muss aber unbedingt beachtet werden, dass sich der einmal bestimmte Gainfaktor durch Umschalten des Messbereichs oder Ausschalten des Geräts ändert und in diesem Fall für weitere Messungen nicht mehr verwendet werden darf.

direkte Messung mit ULCA

Neben den oben beschriebenen Messmethoden bietet der sog. ULCA (engl. Ultrastable Low-noise Current Amplifier) eine komfortable und präzise Möglichkeit sowohl Stromstärken zu erzeugen (vgl. QMH Abs. III.1.2) als auch zu messen. Die Verwendung des Gerätes ist in Arbeitsanweisung „[AA0360-Kleinststromkalibrierung mit ULCA](#)“ beschrieben.

IV.4.2 DC-Widerstand bis 120 TΩ

Das Elektrometer Keithley 6517A bietet die Möglichkeit, Widerstände direkt als Quotient aus konstanter Gleichspannung und gemessener Stromstärke zu messen. Die Spannung wird von der im Elektrometer eingebauten Gleichspannungsquelle geliefert. Um elektromagnetische Einflüsse zu verringern und somit bestmögliche Messergebnisse zu erzielen muss die Messung für Widerstände $R_{DUT} > 100 M\Omega$ in der Eigenbau-Schirmbox in der EMV-Kammer durchgeführt werden (siehe Bild IV.7). Ebenso wird empfohlen das Elektrometer außerhalb der Schirmbox zu platzieren um eine Temperaturerhöhung in der Box zu vermeiden. Die Messkabel können durch eine kleine Öffnung in der Wand der Box vom Elektrometer zum Widerstand geführt werden. Die Messung kann erst nach durchgeführter ZERO CHECK-Prozedur erfolgen (siehe Handbuch für Keithley 6517A).

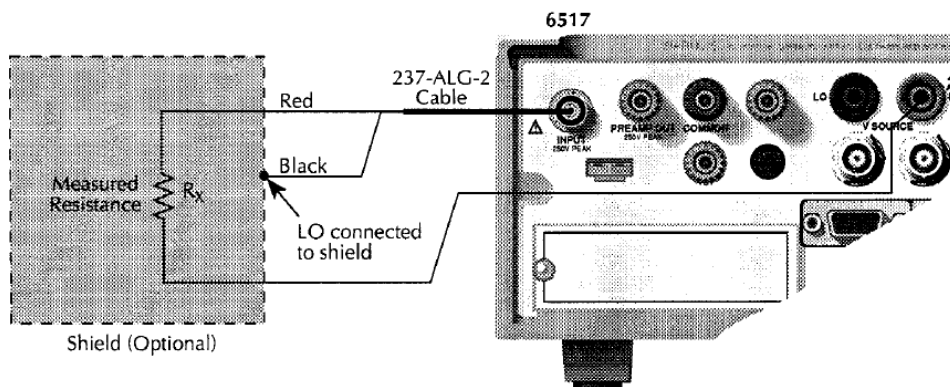


Bild IV.5 Anschluss Widerstandsmessung Keithley 6517A (s. User Manual)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	13 von 1

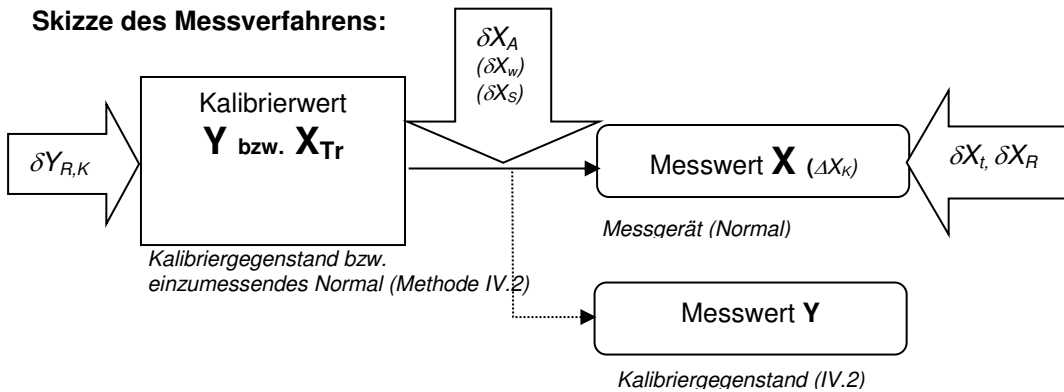
Die Anschlusskizze für die Widerstandsmessung mit dem Keithley 6517A ist in Bild IV.5 gezeigt. Als Quellspannung wird i.d.R. ein Wert zwischen 100 V und 1000 V für Widerstände > 100 MΩ eingestellt, wobei die Grenzparameter des Kalibriergegenstandes nicht überschritten werden dürfen (U_{\max} , I_{\max}).

Bei der Messung hoher Widerstände ist grundsätzlich die Stabilisierungszeit nach Anlegen der Messspannung zu berücksichtigen. Der zeitliche Verlauf des Widerstandswerts sollte dabei einer Exponentialfunktion mit Zeitkonstante $\tau = R_{DUT}C_{parallel}$ folgen, mit R_{DUT} als zu messenden Widerstandswert und $C_{parallel}$ als parallel zum Elektrometereingang liegender Kapazität. Es empfiehlt sich daher, Messkabel mit möglichst kleiner Kapazität zu verwenden. Mit einer Kapazität $C_{parallel} = 10 \text{ pF}$ ergibt sich z. B. für $R_{DUT} = 1 \text{ T}\Omega$ eine Stabilisierungszeit von 10 s. Messungen an der Hochohmdekade IET Labs VRS-100-10-1-BK haben jedoch gezeigt, dass die Zeit bis zum Erreichen eines stabilen Messwerts durchaus im Bereich von 10 bis 30 Minuten liegen kann. Daher erfolgt das Auslesen der Widerstandswerte mit Hilfe eines Lab VIEW-Programms, das die Widerstandswerte in Abhängigkeit von der Messzeit graphisch visualisiert.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC- Direktmessverfahren an einem Multimeter	14 von 1

IV.5 Messunsicherheitsbilanz

Skizze des Messverfahrens:



Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

- X abgelesener Messwert am Messgerät (DMM wie z. B. HP 3458A)
- Y eingestellter Wert am Kalibriergegenstand
- X_{Tr} Wert des einzumessenden Normals (Methode IV.2)

Gesuchte Größe:

- ΔY Abweichung des am Kalibriergegenstand eingestellten bzw. gemessenen Wertes vom richtigen Wert

Einflussgrößen:

ΔX_K Abweichung des Messgeräts vom abgelesenen Wert (dem Kalibrierschein zu entnehmen). Diese systematische Korrektur kann an den festen Kontrollpunkten sehr genau berücksichtigt werden. Ohne Korrektur ist es möglich das max. Abweichungsintervall als Unsicherheitsbeitrag zu berücksichtigen (z.B. Rechteckverteilung oder ggf. u-förmig). Dies ist vor allem dann zweckmäßig, wenn die Korrekturen klein oder wenig praktikabel sind oder anhand der Nominalabweichung eine Abschätzung außerhalb der Kontrollpunkte (Bereichsinterpolation) gemacht werden soll.

δX_t Sofern die Drift des Messgeräts zwischen den Rekalibrierungen und über den gesamten Messbereich nicht bekannt ist, da keine Trendanalyse über vorhergehende Kalibrierungen vorliegt, wird diese zu Null mit der aus den Herstellerangaben zu entnehmenden maximalen Abweichung abgeschätzt (diese Angabe kann die Kombination aus möglicher Drift, Kalibrier- und Nominalabweichung als z.B. „absolute Accuracy“ oder auch Relativangaben zur letzten Kalibrierung z.B. als „accuracy relative to calibration standards“ enthalten). Wird die Herstellerspezifikation regelmäßig unterschritten, kann sie verkleinert werden (eigendefiniertes Spezifikationsintervall). Ansonsten werden die Ergebnisse der Drift- und Historienanalysen des Messgerätes zur Berechnung des maximalen Driftintervalls und der maximalen Nominalabweichung im Bereich herangezogen. Das Multimeter HP 3458A unterstützt zudem die Artefaktkalibrierung: Um die Messunsicherheiten klein zu halten können daher durch einen 90-tägigen externen Abgleich gegen die 10 V und 10 kΩ Normale des Labors die 90-Tages- oder Jahres-Spezifikationen zzgl. der Unsicherheiten der Artefakte verwendet werden. Im AC-Betrieb ist mindestens die 2-jährliche Verifikation gegen die AC-Normale Voraussetzung für diese Vorgehensweise.

δX_{int} Gute Multimeter wie z.B. Fluke 8508A oder HP 3458A arbeiten erfahrungsgemäß

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC- Direktmessverfahren an einem Multimeter	15 von 1

äußerst linear (Messungen ausgewählter Geräte dieser Serie gegen ein Josephson System⁶ zeigten z.B. Linearitätsabweichungen kleiner 0,1 µV/V). Die bekannten Festwertabweichungen können dann dazu genutzt werden eine Unsicherheitsaussage über den gesamten Bereich (z.B. der Spannung, der Stromstärke oder des Widerstands) zu treffen. Bei Anwendung der Herstellerspezifikation ist dieser Anteil in dieser Angabe bereits enthalten. Sollen aber genauere Aussagen getroffen werden, muss man die Daten der nominellen Abweichung zusammen mit einem Linearitäts- oder Interpolationsintervall berücksichtigen. Dieses Intervall ist auch aus den Kalibrierscheinen der Instrumente besser als 1 ppm im DC-Betrieb und 20 ppm im AC Betrieb bekannt. Die Vorgehensweise ähnelt der Korrekptionsinterpolation aus Kapitel III.1.6, jedoch wird lediglich mit einer relativen „Nominalwertkorrektion“ (bzw. –abweichung) und einem konstanten Glied gleich Null gerechnet.

δX_A

Siehe auch Kapitel III.2. Verfahrensbedingte Einflüsse der Thermospannungen, die sich durch die Anschlussleitungen ergeben. Diese Korrektur ist nur bei Gleichspannung und Gleichstromwiderstand ohne „OCOMP“ zu berücksichtigen. Bei Kalibrierung von Gleichstromwiderstand wird die Unsicherheit an den Anschlüssen durch den Messstrom des Multimeters berechnet.

Im Wechselstrombereich handelt es sich um kapazitive Einflüsse der Messleitungen, die Leckströme verursachen. Da induktive Belastungen an der Quelle ebenfalls oft zu Abweichungen führen müssen die Lastbedingungen angegeben werden oder nachvollziehbar sein.

Weitere verfahrensbedingte Einflüsse können Offset-Fehler, Quellimpedanz und –kapazität und elektromagnetische Strahlung darstellen

Bei Messung nach IV.2 tritt dieser Anteil im „worst case“ zweimal auf, der Unsicherheitsanteil wird daher verdoppelt.

Im DC-Stromstärkebereich kann die Erwärmung des internen Shunts eine Rolle spielen. Diese ist zwar bereits bei der Kalibrierung berücksichtigt, kann aber über den ganzen Messbereich unterschiedlich sein.

Bei Verwendung des AC-Normals 5790A wurde der Kabellängeneinfluss durch Vergleich von Kabeln doppelter Länge untersucht, der Impedanzeinfluss selbst bei Quellen mit 50 Ω Quellimpedanz spielt durch den Eingangswiderstand des Normals von 10 MΩ im Verhältnis zur Gesamtunsicherheit eine untergeordnete Rolle

δX_w

Methode IV.2 erfordert die Berücksichtigung von Kurzzeitstabilität und Wiederholbarkeit

Dieser Einfluss wird auch bei Einsatz des Wechselspannungsstandards Fluke 5790A berücksichtigt und wurde aus einer Wiederholmessung unter denselben Bedingungen bestimmt.

δX_S

Methode IV.3 enthält Anteile aus DC-Vergleichsmessung mit identischen Abtastparametern wie im „chopped“ Betrieb.

$\delta X_R, \delta Y_{R,K}$

Rundungsfehler aufgrund der Auflösung / Ablesung der verwendeten Geräte. Ausschlaggebend ist die niederwertigste Stelle der Anzeige (Δ -Spanne zwischen $\pm 0,5$ Digit). Für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit kann $\delta Y_{R,K}$ erst im konkreten Fall miteinbezogen werden, da dieser Wert abhängig vom

⁶ JoSy iMERA+ Project: *On-site calibration with the METAS Josephson-locked synthesizer at esz AG Calibration & Metrology*, Eichenau, Germany 18 – 22 October 2010, Blaise Jeanneret, METAS

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC- Direktmessverfahren an einem Multimeter	16 von 1

Kalibriergegenstand ist.

$\delta X_{mismatch}$

Bei Kalibrierung von Quellen in angepassten Leitungssystemen (z.B. Funktionsgeneratoren, 50 Ohm) unter Last ergeben sich Abweichungen durch Fehlanpassungen. Die Berechnung des Intervalls erfolgt bei Berücksichtigung der Beträge der Last- und Generatorreflexionsfaktoren zu

$$\Delta_{mismatch} \approx 100 \cdot r_L r_G \%$$

Bei (niederfrequenter) Lastanpassung z.B. mit einer induktionsarmen Widerstandsdekade ist die Unsicherheit der Widerstandmessung zu berücksichtigen

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich aus

$$Y - \Delta Y + \delta Y_{R,K} = X - \Delta X_K + \delta X_R + \delta X_t + \delta X_{int} + \delta X_A + \delta X_w + \delta X_S + \delta X_{mismatch}$$

die für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit maßgebliche Modellgleichung:

$$\Delta Y = Y + \delta Y_{R,K} - (X - \Delta X_K + \delta X_R + \delta X_t + \delta X_{int} + \delta X_A + \delta X_w + \delta X_S + \delta X_{mismatch})$$

Messunsicherheitsbilanz:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta Y) = u^2(X) + c_K^2 u^2(\Delta X_K) + c_R^2 u^2(\delta X_R) + c_t^2 u^2(\delta X_t) + c_{int}^2 u^2(\delta X_{int}) + c_A^2 u^2(\delta X_A) + c_{R,k}^2 u^2(\delta X_{R,k}) + c_w^2 u^2(\delta X_w) + c_S^2 u^2(\delta X_S) + c_{mismatch}^2 u^2(\delta X_{mismatch})$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	17 von 1

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_j	x_j	$u(x_j)$		c_i	$u_i(y)$
X	x	$U(X)$	Typ A		$u(X)$
ΔX_K	x_K	$U(\Delta X_K)/2$	Normal ⁷	1	$u(\Delta X_K)$
δX_R	0	$\Delta(\delta X_R)/\sqrt{3}$	Rechteck	-1	$u(\delta X_R)$
$\delta X_{R,K}$	0	$\Delta(\delta X_{R,K})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta X_{R,K})$
δX_t	0	$\Delta(\delta X_t)/\sqrt{3}$	Rechteck	-1	$u(\delta X_t)$
δX_{int}	0	$\Delta(\delta X_{int})/\sqrt{3}$	Rechteck	-1	$u(\delta X_{int})$
δX_A	0	$\Delta(\delta X_A)/\sqrt{3}$	Rechteck	-1	$u(\delta X_A)$
δX_w	0	$\Delta(\delta X_w)/\sqrt{3}$	Rechteck	-1	$u(\delta X_w)$
δX_S	0	$U(\delta X_S)$	Normal	-1	$u(\delta X_S)$
$\delta X_{mismatch}$	0	$\Delta(\delta X_{mismatch})$	u-verteilt	-1	$u(\delta X_{mismatch})$
Y	y				
ΔY	$y-x+x_K$				$u(\Delta Y)$

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 ($k=2$):

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

Berechnungsgrundlagen:

$u(\Delta X_K)$ Dieser Wert ist dem aktuellen Kalibrierschein des Normals zu entnehmen. An abweichend von den diskret kalibrierten Punkten innerhalb des Bereiches wird entweder eine Linearitäts- und Interpolationsunsicherheit berücksichtigt oder es kann der Kalibrierschein als Konformitätsnachweis zum Nachweis der Herstellereigenschaften und -spezifikationen gewertet werden.

$u(\delta X_t)$ Die Intervallgrenzen werden üblicherweise den Hersteller-Spezifikationen für die unterschiedlichen Messbereiche entnommen oder aus mindestens zwei Folgekalibrierungen errechnet. Diese Unsicherheit wird z. B. von HP mit einem vom Messwert und einem vom Messbereich abhängigen Anteil spezifiziert, $\pm(\text{ppm of Reading} + \text{ppm of Range})$ und enthält dann sowohl die nominelle Abweichung als auch die mögliche Drift innerhalb des Kalibrierintervalls. Genauso kann auch in Bereichen eine „eigene“ Gerätespezifikation auf Basis von Drift, maximaler nomineller Abweichung und Vergleichsmessungen ähnlich Kapitel III.2 bestimmt werden.

$u(\delta X_{int})$ Für die Multimeter der Familien HP 3458A und Fluke 8508A besser als 1 ppm im DC-Betrieb und 20 ppm im AC-Modus bekannt.

$u(\delta X_A)$ • Für die Bestimmung der Unsicherheit der Nullpunkte gelten die Betrachtungen

⁷ Wird die bekannte Nominalabweichung nicht korrigiert erfolgt hier eine Berücksichtigung als rechteckverteilt, oder je nach Wahrscheinlichkeit der Abweichung ggf. auch als u-verteilt, Intervall innerhalb der maximalen bzw. wahrscheinlichen nominellen Abweichungsgrenzen

aus Kapitel III, da mit unmittelbar vor der Messung abgeglichenen Nullpunkten dieselben Messunsicherheiten erzielbar sind, wie für die Erzeugung mittels Kurzschlussbrücke. Abhängig vom verwendeten Nullnormal, zusammen mit thermospannungsarmen Anschlussleitungen (z. B. Spezialleitungen von Fluke), können die Thermospannungen bis auf ca. 35 nV am Nullpunkt unterdrückt werden. Wiederholungen des Nullpunktes am Ende von DC-Spannungs-Messreihen (Spannungskalibrierungen ungleich 0 V) zeigen Wiederholbarkeiten kleiner 100 nV. Damit ergibt sich die Intervallbreite

$$\Delta(\delta X_A) = 100 \text{ nV}$$

Für die Widerstandsmessung berechnet sich

$$\Delta(\delta X_A) = \frac{100 \text{ nV}}{I_{\text{mess}}}$$

mit I_{mess} als der in den Spezifikationen angegebene Messstrom.

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

$$Z_L = \frac{i}{2\pi \cdot f \cdot C_k}$$

und somit der Leckstrom

$$I_L = \left| \frac{Z_M}{Z_M + Z_L} \right| \cdot I = U(\delta X_A)$$

mit Z_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 1 Ω und 1 k Ω , für Messungen zwischen 2,2 A und 22 μ A. Für Stromstärken im >220 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.

- Um den Einfluss des Quellenwiderstandes bei Low-Current-Messungen am Keithley 617 / 6517 vernachlässigen zu können, sollte dieser

größer 100 G Ω in allen pA-Bereichen
größer 100 M Ω in allen nA-Bereichen
größer 100 k Ω in allen μ A-Bereichen

liegen, da der Quellwiderstand das Messrauschen beeinflusst. Die Einflüsse werden durch Wiederholungsmessungen z. B. an der Quelle Keithley 263 abgeschätzt.

- Am AC-Standard Fluke 5790A erfolgten Messungen mit einfacher und verdoppelter Kabellänge. Zur Bestimmung des Unsicherheitsintervalls werden die „kleinen“ Frequenzen (üblicherweise im kHz-Bereich) zu Bändern zusammengefasst, bei höheren Frequenzen werden die tatsächlichen Abweichungen mit entsprechenden Obergrenzen abgeschätzt.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	19 von 1

$u(\delta X_w)$

siehe Tabelle IV.1

Am AC-Normal Fluke 5790A erfolgten Messungen unter identischen Bedingungen und Rahmenparametern, deren maximale Differenz Bereichsweise als Intervallgrenze verwendet wird.

$u(\delta X_S)$

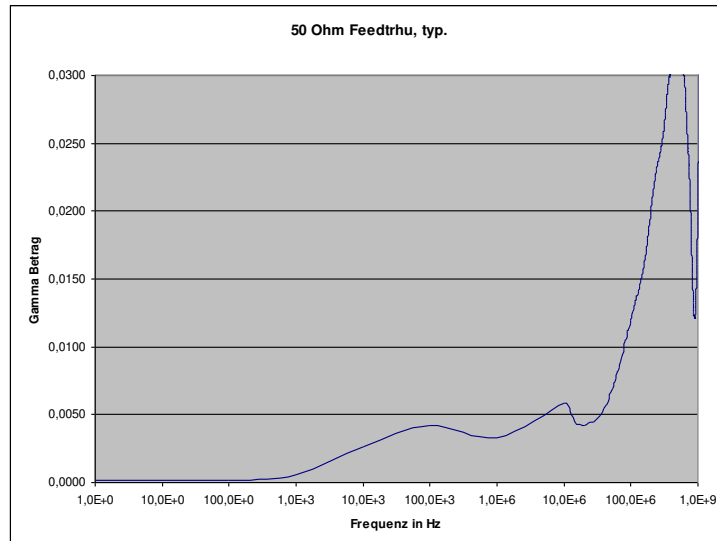
siehe Tabelle IV.2

$u(\delta X_R)$

Bestimmt durch die höchste Auflösung des jeweiligen Messbereichs, z.B. 10nV im 1V Bereich.

$u(\delta X_{mismatch})$

Der Lastreflexionsfaktor kann gemessen werden. Für einen „guten“ Durchführungswiderstand sind Anpassungswerte von $r_L < 0,0025$; $r_G < 0,005$ bis 20 kHz und $r_L < 0,004$; $r_G < 0,010$ bis 1 MHz angegebbar.



Reflexionsfaktor eines typ. Durchführungswiderstand, gemessen gegen LCR-Messgerät HP 4284A bis 1MHz, bzw. vektoriellen Netzwerkanalysator Agilent E8361A >1 MHz

Wird eine eingemessene (induktionsarme) Widerstanddekade als Lastanpassung bis 10 kHz verwendet so ist die Unsicherheit dieser Widerstandsmessung mit ihrer Unsicherheit zu berücksichtigen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	20 von 1

Die Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen den Tabellen

- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-TabelleIV-an-Fluke-5790.xlsx>
- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-IV-Keithley-6517-korrigierte-Direktmessung-an-Festwerten.xlsx>
- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-IV-U-I-R-Fluke-8508A.xls>
- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-IV-U-I-R-HP3458A-Keithley617-6517.xls>
- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-III.1-und-IV.4-Stromstaerke-mit-Hochohmdekade-Keithley6517A-und-Spannungsquelle.xlsx>

„zu entnehmen, die Ergebnisse sind im Leistungsnachweis aufgeführt.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC-Direktmessverfahren an einem Multimeter	21 von 1



© 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.47	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - IV AC/DC- Direktmessverfahren an einem Multimeter	22 von 1