

### III Kalibrieren von U-I-R-Messgeräten

- an Kalibratoren, Fluke 742, Hochohmdekade Sefelec KDH2/SP, Keithley 263 oder Datron 4910

#### III.1 Kalibrierverfahren – Direkte Messung an konstanten Quellen

##### III.1.1 Voltmeter

Die Kalibrierung von Voltmetern erfolgt durch direkte Messung an Kalibratoren wie Fluke 5700A/ 5720A, Fluke 5500A/5520A (siehe auch Kapitel XXII), 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 wie Datron 4910 oder Fluke 732 zur Verfügung, mit denen kleine Messunsicherheiten erreicht werden können.

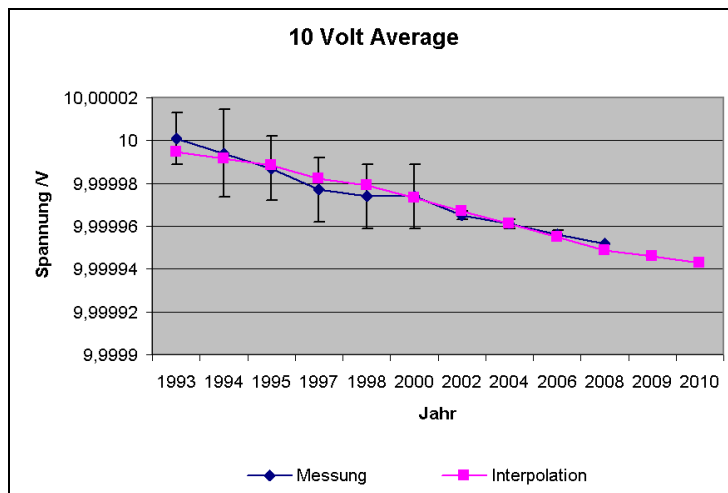


Bild III.1a Historie und Prognose der 10 V Zelle, Datron 4910

Um die Messunsicherheiten möglichst niedrig zu halten werden für den Anschluss des Kalibriergegenstandes im DC-Bereich Spezialleitungen 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.

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

*Tabelle III.1.1.1 - Abschätzung von thermoelektrischen Effekten verschiedener Anschlusstechniken*

Der Nullpunkt wird mit kurzgeschlossenem Eingang gemessen. Dazu werden Kurzschlussstecker wie vom Typ Prema 3016 verwendet, die durch vergoldete Kontakte geringe Thermospannungen

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	III - Kalibrieren von U-I-R Messgeräten	1 von 12

aufweisen. Nach dem Einstecken der Kurzschlussstecker 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 wird dieser Zustand in der Regel erreicht sein.

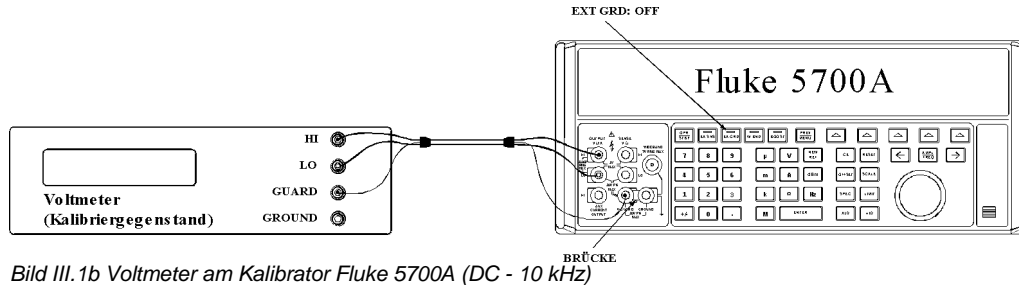


Bild III.1b Voltmeter am Kalibrator Fluke 5700A (DC - 10 kHz)

### III.1.2 Amperemeter

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

Die Kalibrierung von Amperemetern erfolgt durch direkte Messung an Kalibratoren wie Fluke 5700A/5720A, Fluke 5500A/5520A oder Wavetek 9000/9100.

Für den Anschluss des Kalibriergegenstandes (Bild III.2) werden Spezialleitungen 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).

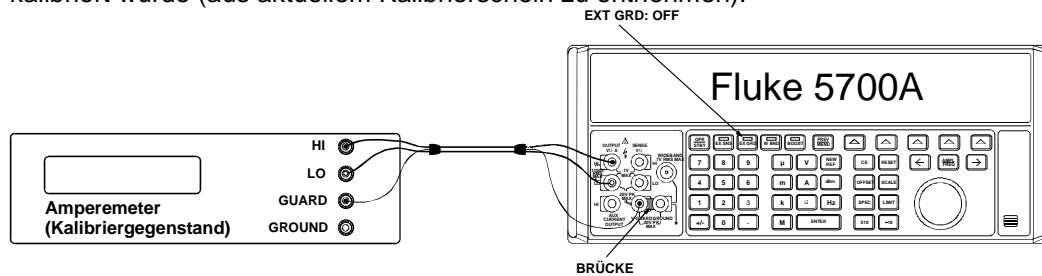


Bild III.2 - Amperemeter am Kalibrator Fluke 5700A

### Keithley 263

Zum Kalibrieren von Elektrometern, Strom-, Spannungs-, Ladungs- und Widerstandsmessgeräten steht die Multifunktionsquelle, Keithley 263, im Labor zur Verfügung. Das Gerät ergänzt neben Fluke 5700A die rückgeführten DC-Messbereiche von 0 pA bis 20 µA und 0 V bis 22 mV. In überschneidenden Bereichen können darüber hinaus Kontroll- und Vergleichsmessungen des eigenen Equipments durchgeführt werden.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	III - Kalibrieren von U-I-R Messgeräten	2 von 12

Der Anschluss erfolgt über eine Triax-Buchse auf der Geräterückseite mittels geschirmter Messleitung (Keithley 6011). Kleinst mögliche Messunsicherheiten werden mit vollständig geschirmtem Anschluss ohne weitere Adapter erzielt. So lässt sich beispielsweise das Elektrometer Keithley 617 über eine einzige Triax-Leitung mit der Quelle verbinden. Im Modus AMPS kann somit die aktive Stromquelle mit

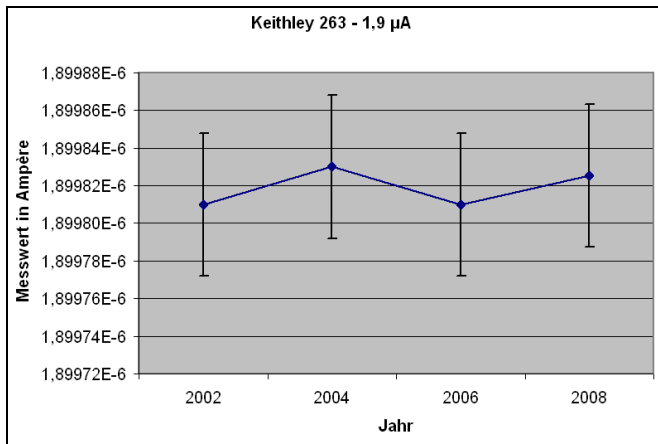


Bild III.4a Keithley 263: Historie des 2 µA Bereichs. Die maximale Änderung im Kalibrierintervall (2 Jahre) beträgt  $1,1 \cdot 10^{-5}$ . Diese Grenzen werden als Unsicherheitsintervall einer möglichen Rechteckverteilung angenommen. Daneben ergibt sich die maximale Abweichung vom Einstellwert als  $6,3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

DC-Compliance-Spannungen bis 12 V genutzt werden und sorgt für konstanten Stromfluss am Messobjekt oder Messgerät. Der Betrieb empfiehlt sich im variablen Messbereich relativ gegenüber Gerätenullpunkt ZERO, an Festwerten ist das Instrument absolut ohne ZERO Korrektur kalibriert.

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

Mit Vergleichsmessungen am Elektrometer Keithley 617 wurden darüber hinaus Ergebnisse zu Kurzzeitstabilität und Reproduzierbarkeit von Messwerten gewonnen und die Abschätzung für den Unsicherheitsbeitrag  $\delta X_A$  getroffen.

Die Ladungssynthese erfolgt auf Basis

konstanten Stromflusses 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 an einem Oszilloskop hoher zeitlicher Auflösung verifiziert werden:

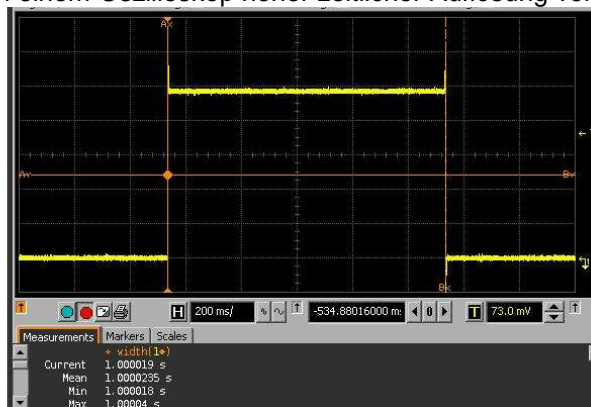


Bild III.4b Stromimpuls (Ladungsabgabe) der Quelle Keithley 263 (Mittelwert einer Stichprobe N=16) am Oszilloskop

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

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	III - Kalibrieren von U-I-R Messgeräten	3 von 12

**III.1.3 Ohmmeter**  
**Fluke 5700A**

Die Kalibrierung von Ohmmetern (Widerstandsmessgeräte) erfolgt durch direkte Messung am Kalibrator Fluke 5700A. Der Kalibrierschein enthält Messwerte für jeden Bereichsendwert und den Nullpunkt des Kalibriergegenstandes. Soweit sinnvoll kann auch die Linearität des Ohmmeters bestimmt werden, jedoch enthält der Kalibrator nur dekadisch abgestufte Festwiderstände, so dass hier Einschränkungen zu beachten sind.

Für den Anschluss des Kalibriergegenstandes werden Spezialleitungen 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 werden 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.

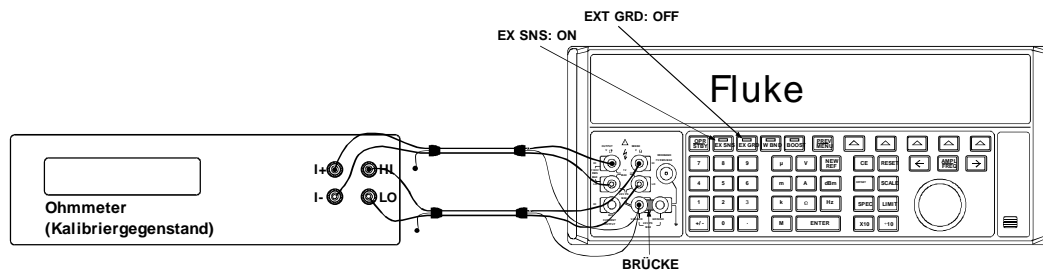


Bild III.3a Kalibrierung von Widerstandsmessgeräten

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	III - Kalibrieren von U-I-R Messgeräten	4 von 12

**Fluke 724A**

Bei der Kalibrierung von Ohmmetern oder Kalibratoren mittels den Fluke 724A 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.

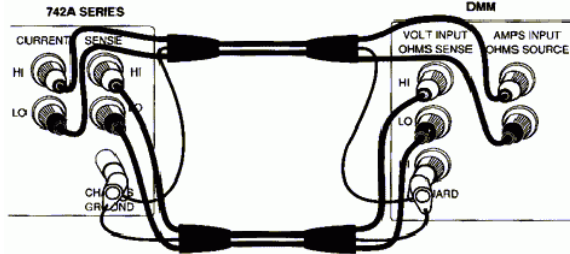


Bild III.3b Ohmmeter an Fluke-Referenzwiderstand (Vierdrahtmessung)

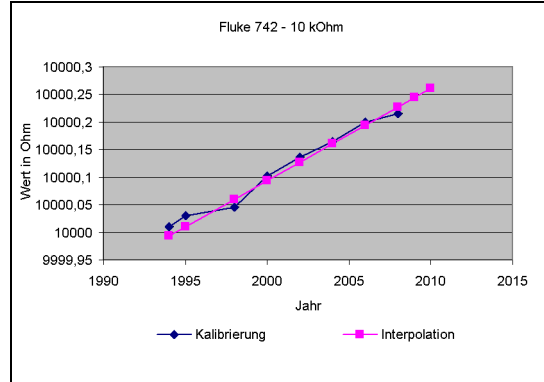


Bild III.3c Historie des 10 kOhm-Widerstandes. Die Messunsicherheitsbetrachtung berücksichtigt die maximale Differenz zwischen Interpolation Messung

**Hochohmdekade Sefelec KDH2**

Die Hochohmdekade Sefelec KDH2/ SP bietet durch 7 Festwiderstände die Kalibrierung von (Tera-) Ohmmetern im Bereich von 100 MΩ bis 100 TΩ. Die Anschlüsse liegen dabei auf den Innenleitern von je 2 BNC-Buchsen, so dass eine geschirmte Leitungsführung möglich ist. Darüber hinaus 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 seit 1996 kann des Weiteren eine genäherte Hochrechnung über den Kalibrierwert zum aktuellen Zeitpunkt getroffen werden (s. Bild III.5).

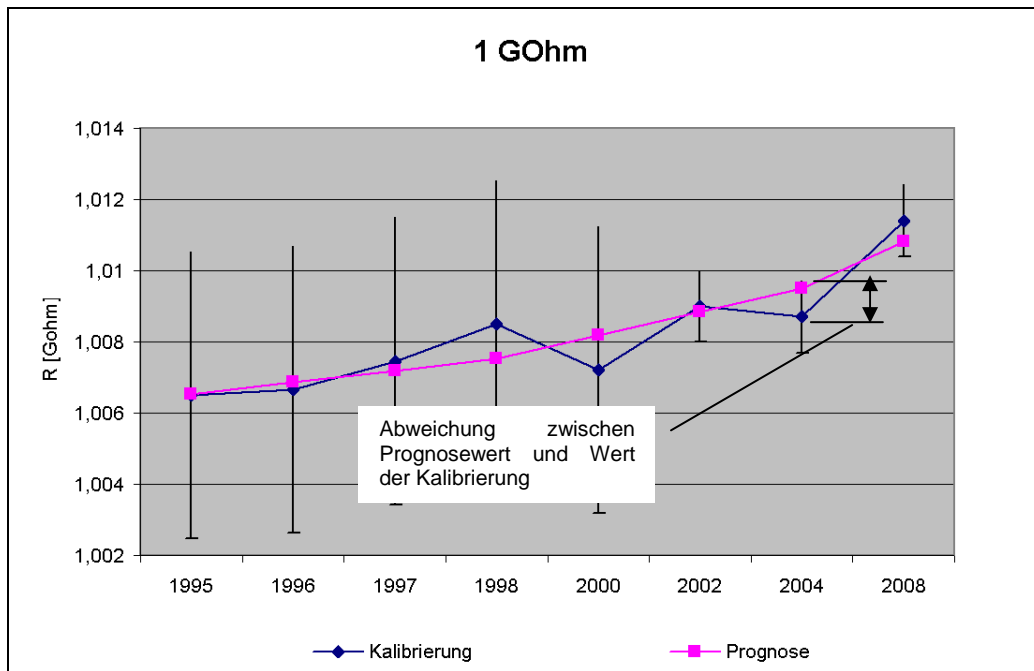


Bild III.5 Historie des 1GOhm Abgriffs.

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> III - Kalibrieren von U-I-R Messgeräten	<b>Seite</b> 5 von 12
---------------------------	--	--	---	--------------------------

Die Messergebnisse sind bezogen auf die Kalibrierung mit konstanter Spannung  $U_{\text{mess}}=100\text{ V}$  über dem 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. Die mittlere Abweichung der langjährigen Betrachtung liefert  $7,3 \cdot 10^{-4}$  und wird als  $1\sigma$ -Intervall (Normalverteilung) angenommen (s. Tabelle III.1) und im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt.

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 eigenem Equipment (Keithley 617 Electrometer) und ungeschirmten Konnektoren ergaben stabile, ablesbare Messergebnisse bis  $100\text{ T}\Omega$ . 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 festgestellt IV.4), d.h. die Messung erfolgt in halb-geschirmten Alukammern (ca.  $0,7 \times 1 \times 2\text{ m}$ , Kammerwand geerdet). Durch 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.

Abgriff	1996	1997	1998	2000	2002	2004	2008	mittlere Abweichung vom berechneten Wert
<b>100M<math>\Omega</math></b>	1,2E-04	7,3E-05	8,2E-05	3,4E-04	1,3E-04	1,4E-04	2,6E-04	1,6E-04
<b>1G<math>\Omega</math></b>	1,9E-04	2,7E-04	9,7E-04	9,7E-04	1,6E-04	7,9E-04	5,8E-04	5,6E-04
<b>10G<math>\Omega</math></b>	2,1E-04	1,3E-04	1,1E-03	1,3E-03	3,2E-05	1,8E-03	1,4E-03	8,5E-04
<b>100G<math>\Omega</math></b>	1,5E-04	3,3E-04	9,1E-04	1,6E-03	7,7E-04	1,2E-03	7,8E-04	8,1E-04
<b>1T<math>\Omega</math></b>	5,2E-04	5,5E-05	5,1E-04	8,0E-04	4,3E-04	3,7E-04	2,6E-04	4,2E-04
<b>10T<math>\Omega</math></b>	2,6E-04	9,8E-04	1,6E-03	1,2E-04	2,2E-03	3,2E-04	7,1E-04	8,9E-04
<b>100T<math>\Omega</math></b>	7,9E-04	1,8E-03	1,0E-03	3,4E-03	1,0E-02	3,1E-03	2,0E-03	3,2E-03

Tabelle III.1 - relative Abweichungen des Messwertes bei Rekalibrierung vom hochgerechneten Wert nach Trendanalyse

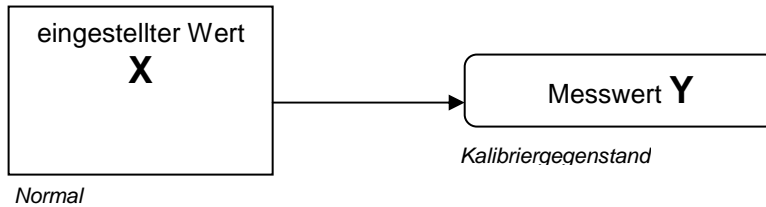
### III.1.4 Multimeter

Multimeter werden entsprechend ihrer Messfunktionen nach den Anweisungen für Voltmeter, Amperemeter und Ohmmeter in Anlehnung an die Richtlinie **VDI/ VDE DGQ DKD 2622-Blatt 3** kalibriert. Der Kalibrierschein enthält Messwerte für Bereichsendwert, Linearität, Symmetrie und Nullpunkt des Kalibriergegenstandes. Die Werte für Nullpunkt, Symmetrie und Linearität werden jedoch in der Regel nur in einem Gleichspannungsbereich (vorzugsweise  $190\text{ mV}$  bzw.  $19\text{ V}$  für die Linearität) gemessen, soweit der interne Aufbau des Kalibriergegenstandes dieses rechtfertigt. Wenn das Multimeter auch über eine Funktion zur Frequenzmessung verfügt, wird für jeden Bereich ein Messwert am Frequenzsynthesizer gemessen oder bei entsprechend leistungsfähiger Messfunktion nach der Vorschrift für Frequenzzähler vorgegangen.

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> III - Kalibrieren von U-I-R Messgeräten	<b>Seite</b> 6 von 12
---------------------------	--	--	---	--------------------------

## III.2 Messunsicherheitsbudget

Skizze des Messverfahrens:



**Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:**

X Kalibrierwert am Normal  
Y Anzeige am Kalibriergegenstand

**Gesuchte Größe:**

$\Delta Y$  Abweichung der Anzeige des Kalibriergegenstandes vom richtigen Wert

**Einflussgrößen:**

$\Delta X_K$  Sofern vorhanden: Abweichung des Normals vom eingestellten Wert (Kalibrierwert) (entnehmbar aus dem Kalibrierschein)

$\delta X_K$  In Bereichen des Normals, die an nur diskreten Punkten kalibriert sind, ist ein weiterer Einfluss bei von diesen Punkten abweichenden Werten im Bereich anzunehmen (Interpolationsunsicherheit). Für den Kalibrator Fluke 5700A ist dieser Anteil in  $\delta X_t$  enthalten, die Kalibrierung an Keithley 263 erfordert die Betrachtung der maximalen relativen Abweichung vom Einstellwert als Rechteckverteilung.

$x_t$  zeitliche Drift des Normals als Funktion der Zeit seit der letzten Kalibrierung. Dieser Wert gilt nur für die Hochohmkalibrierung an der Dekade Sefelec KDH2 und wurde in  $\Omega/\text{Jahr}$  berechnet, ansonsten wird dieser Anteil in  $\delta X_t$  gesondert berücksichtigt. Als Unsicherheit der Hochrechnung wird der  $1\sigma$ -Wert aus der Historie als mittlere Abweichung vom hochgerechneten Wert gewonnen und geht Normalverteilt in das Messunsicherheitsbudget ein.

$\delta X_t$  Ist die Drift des Normals zwischen den Rekalibrierungen nicht bekannt, da keine Trendanalyse über vorhergehende Kalibrierungen vorliegen, werden diese zu Null mit der aus den Herstellerangaben zu entnehmenden maximalen Abweichung abgeschätzt. Ansonsten wird der tatsächliche Wert rechteckverteilt zwischen den Grenzen der maximalen Drift zwischen den Rekalibrierungen angenommen.

$\delta X_A$

- Verfahrensbedingte Einflüsse der Thermospannungen, die sich durch die Anschlussleitungen ergeben. Diese Korrektur ist nur bei Gleichspannung zu berücksichtigen.
- 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.
- Leckströme, Offsetfehler, elektromagnetische Einstrahlungen, Übergangswiderstände durch die Umgebungsfeuchte können bei Hochohm- / 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

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	III - Kalibrieren von U-I-R Messgeräten	7 von 12

50 Ohm Generatorinnenwiderstand erzeugt. Dieser Anteil ist abhängig vom Kalibriergegenstand und kann erst im konkreten Fall berücksichtigt werden.

- Bei der Ladungssynthese handelt es sich um zusammengefasste Einflüsse durch Rauschen, Anstiegs- und Abfallzeit, Über- und Unterschwingen, Reproduktion und Abweichung der Zeitkonstante

$\delta X_{Tp}$  Abweichungen aufgrund variabler Umgebungstemperatur (Fluke 742.)

$\delta Y_R$  Rundungsfehler aufgrund der Auflösung des Messgerätes (abhängig vom Kalibriergegenstand). Für die kleinste angebbare Messunsicherheit muss dieser Term nicht berücksichtigt werden, da von einem idealen Fall ausgegangen wird.

**Modellgleichung:**

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich aus

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

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

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

**Messunsicherheitsbudget:**

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

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

**Tabellarische Darstellung des Messunsicherheitsbudget:**

Größe	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
$X_i$	$x_i$	$u(x_i)$		$ c_i $	$u_i(y)$
X	x				
$\Delta X_K$	$x_K$	$U(\Delta X_K) / 2$	Normal	1	$u(\Delta X_K)$
$t \cdot x_t$	$x_T$	$U(X_t)$	Normal	1	$u(X_t)$
$\delta X_K$	0	$\Delta(\delta X_K) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta X_K)$
$\delta X_t$	0	$\Delta(\delta X_t) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta X_t)$
$\delta X_A$	0	$\Delta(\delta X_A) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta X_A)$
$\delta X_{Tp}$	0	$\Delta(\delta X_{Tp}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta X_{Tp})$
Y	y				
$\Delta Y$	$y - X + X_K + X_T$				$u(\Delta Y)$

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

**relative erweiterte Messunsicherheit (k=2):**

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

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> III - Kalibrieren von U-I-R Messgeräten	<b>Seite</b> 8 von 12
---------------------------	--	--	---	--------------------------

**Berechnungsgrundlagen:**

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

$u(\delta X_K)$  Wird für Keithley 263 mit der Historie als maximale relative Abweichung vom Einstellwert errechnet (Interpolationseinfluss), s. Bild III.4.

$u(X_t)$  Für die Hochohmdekade liefert die Historie die mittlere Abweichung vom erwarteten Wert der Hochrechnungsformel (s. Tabelle III.1).

$u(\delta X_t)$  Da an den kalibrierten Einsatzpunkten des Normals mit den Korrektionswerten  $\Delta X_K$  gearbeitet werden kann, wurde auf Basis der Driftanalyse der Rekalibrierungen<sup>1</sup> und der Auswertung von Vergleichsmessungen<sup>2</sup> eine maximal mögliche Drift im Kalibrierungsintervall bestimmt. Für die Verwendung außerhalb der kalibrierten Betriebspunkte (Bereiche) ist bekannt, dass das Bezugnormal innerhalb der Grenzen

$$\Delta(\delta X_t) = \pm \sqrt{a_{Drift}^2 + a_{\Delta nom}^2}$$

aus Drift  $a_{Drift}$  und maximaler nomineller Abweichung vom Einstellwert  $a_{\Delta nom}$  arbeitet. Dieses Intervall wurde gemäß den von Fluke für die Klasse „5720A-24h“ spezifizierten Verhältnissen in einen Anteil vom Messwert und konstanten Offset aufgeteilt (XX% der Spezifikation) und somit als geräteigenes Spezifikationsintervall bestimmt.

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

Fluke 5700A: ermittelte Driften an den kalibrierten Betriebspunkten (Gleichspannung):

Bereich	Kalibrierwert	Bedingung	max. Drift (rel.)	max. Abweichung (rel.)	5720A 24 h-Spez. %TOL	Bereichsspez.
220mV DC Range	100 mV		4,0E-06	3,0E-06	83%	5,0E-06
	-100 mV		4,1E-06	-5,5E-06	138%	8,3E-06
2.2V DC Range	1 V		2,5E-06	1,9E-06	112%	3,1E-06
	-1 V		1,2E-06	-1,1E-06	58%	1,6E-06
11V DC Range	4 V		1,2E-06	1,2E-06	101%	1,8E-06
	6 V		8,3E-07	8,3E-07	79%	1,2E-06
	8 V		7,5E-07	8,8E-07	84%	1,2E-06
	10 V		8,0E-07	8,0E-07	87%	1,1E-06
	-10 V		9,0E-07	-9,0E-07	98%	1,3E-06
22V DC Range	13 V		9,2E-07	1,2E-06	107%	1,5E-06
	15 V		6,7E-07	8,7E-07	82%	1,1E-06
	18 V		6,7E-07	9,4E-07	90%	1,2E-06
220V DC Range	100 V		2,6E-06	3,0E-06	119%	4,0E-06
	-100 V		2,4E-06	-3,2E-06	104%	4,0E-06
1100V DC Range	1000 V		1,9E-06	2,0E-06	95%	2,8E-06
	-1000 V		2,0E-06	-2,1E-06	100%	2,9E-06

<sup>1</sup> 2005, 2006 und 2007

<sup>2</sup> im Jahr 2007 gegen diverse Fluke 5720A, Stichprobenlänge n=7

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	III - Kalibrieren von U-I-R Messgeräten	9 von 12

$u(\delta X_A)$  Die verwendeten Spezialleitungen von Fluke werden mit einer maximalen Thermospannung von  $1,3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  spezifiziert. Nach ausreichender Stabilisierung wird der Temperaturunterschied zwischen den Anschlüssen auf weniger als  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  geschätzt. Damit ergibt sich eine maximale Thermospannung von  $u(\delta X_A) = 0,26 \mu\text{V}$  (siehe auch Vergleichsmessung aus Tabelle III.1.1.1)

Im Wechselspannungsbereich  $\leq 220 \text{ mV}$  ist durch die  $50 \text{ } \Omega$  Quellimpedanz des Fluke 5700A abhängig vom Eingangswiderstand des Messgerätes  $Z_{\text{Ein}}$  (z.B.  $1 \text{ M}\Omega$ , typ.) mit einem systematischen Abweichungsintervall

$$\Delta(\delta X_A) = 1 - \left( \frac{1 \text{ M}\Omega}{1 \text{ M}\Omega + 50 \text{ } \Omega} \right) = 50 \cdot 10^{-6}$$

zu rechnen.

Im Wechselstrombereich wird eine maximale Kabelkapazität  $C_k = 1 \text{ nF}$  angenommen. Daraus ergibt sich die Leitungsimpedanz

$$Z_L = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_k}$$

und somit der Leckstrom

$$I_L = \frac{Z_M}{Z_M + Z_L} \cdot I = u(\delta X_A)$$

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  $0,01 \Omega$  und  $1 \Omega$ , wird für die Berechnung maximal zu  $1 \Omega$  gesetzt. Für Frequenzen  $> 1 \text{ kHz}$  wurde das Unsicherheitsintervall zusätzlich durch eine Vergleichsmessung mit verschiedenen Anschlusstechniken analysiert. Abhängig von der Stromstärke wurden aufgrund der unterschiedlichen resistiven und induktiven Last am Kalibrator folgende Intervalle  $\Delta(\delta X_A)$  ermittelt (Frequenz  $f = 10 \text{ kHz}$ ):

Strom $I$	10 $\mu\text{A}$	100 $\mu\text{A}$	1 mA	10 mA	100 mA	1 A
$\Delta(\delta X_A)$	6,3 nA	35 nA	300 nA	4 $\mu\text{A}$	30 $\mu\text{A}$	3 mA

Bei Hochohmmessungen wurde festgestellt, dass stabile und reproduzierbare Messwerte im Bereich von 0,3% ( $100 \text{ M}\Omega$  bis  $10 \text{ G}\Omega$ ), 0,5% ( $> 10 \text{ G}\Omega$  bis  $10 \text{ T}\Omega$ ) und 1% ( $> 10 \text{ T}\Omega$  bis  $100 \text{ T}\Omega$ ) möglich sind. Diese Werte werden als Intervallgrenzen einer möglichen Rechteckverteilung angenommen und verwendet.

Picoamperekalibrierungen sind bis zu  $0,020 \text{ pA}$  im kleinen Zeitintervall reproduzierbar (Kontrollmessung an Keithley 617). Dieser Wert wird als Grenze der Unsicherheitsintervallbreite verwendet.

Zusätzliche Einflüsse durch Rauschen, Anstiegs- und Abfallzeit, Über- und Unterschwingen, Reproduktion und Abweichung der Zeitkonstante bei der Ladungssynthese werden aus Vergleichsmessungen am Elektrometer, der Signalform am Oszilloskop und den Herstellerangaben zusammengefasst zu maximal  $0,5 \text{ pC}$  für Ladungen von  $10 \text{ pC}$  bis  $200 \text{ pC}$   
 $0,1 \%$  für Ladungen von  $> 200 \text{ pC}$  bis  $20 \text{ nC}$  und  
 $0,5 \%$  für Ladungen von  $> 20 \text{ nC}$  bis  $20 \text{ } \mu\text{C}$  angenommen.

$u(\delta X_{T_p})$  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.

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> III - Kalibrieren von U-I-R Messgeräten	<b>Seite</b> 10 von 12
---------------------------	--	--	---	---------------------------

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

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

mit

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

$\alpha, \beta$  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 $\Omega$  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  $21^\circ\text{C}$  bis  $25^\circ\text{C}$ :

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

**Alle Zahlenwerte und Berechnungen für die einzelnen Messgrößen sind in Microsoft Excel erstellt und den Tabellen**

- „Messunsicherheiten Tabelle III U-I-R an Fluke 5700.XLS“
  - „Messunsicherheiten Tabelle IIIb und Vb U an Datron 4910.XLS“ und
  - „Messunsicherheiten Tabelle IIIc und Vc U an Fluke 742.XLS“
  - „Messunsicherheiten Tabelle III d - R an Sefelec KDH2.XLS“
  - „Messunsicherheiten Tabelle III e - U-I an Keithley 263.XLS“
- zu entnehmen die Ergebnisse sind im Leistungsnachweis aufgeführt.

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> III - Kalibrieren von U-I-R Messgeräten	<b>Seite</b> 11 von 12
---------------------------	--	---	---	---------------------------

<b>Ausgabe:</b>	<b>erstellt</b>	<b>geprüft/genehmigt</b>	<b>Kapitel</b>	<b>Seite</b>
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	III - Kalibrieren von U-I-R Messgeräten	12 von 12