

# IV Kalibrierung an einem Multimeter

(z.B. HP 3458A und Keithley 617)

## IV.1 Messung an einem direkt anzeigenden Multimeter

In direkter Messung können Geräte bzw. die vom Kalibrator erzeugten Spannungen, Ströme und Widerstände direkt mit einem der Systemmultimeter wie HP 3458A, Fluke 8508A, Solartron 7071 gemessen (Bild IV.1). Dabei ist zu beachten, dass die Multimeter immer so angeschlossen und betrieben wird, 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 maximaler Integrationszeit.

	Geräteeinstellung HP 3458A	beste Anschluss technik
<b>alle Messungen</b>	ACAL ALL NPLC 200	GUARD TO LO (unguarded)
<b>DC</b>	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)
<b>AC</b>	SETACV SYNC RES .001 LFILTER ON bis 50 kHz	geschirmte, verdrehte Leitung (Pomona 1167) oder BNC RG58 Leitung, ca. 0,5m bis max. 1m
<b>4-Draht</b>	OHEM	Fluke 5440-7002, 40cm
<b>Widerstand</b>	OCOMP ON	>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:

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

Vor und während der Kalibrierung sollte immer wieder die Kerntemperatur des Multimeters (TEMP?) beachtet werden. Bei zu geringer Aufwärmzeit oder Änderung der inneren Temperatur um mehr als 1 °C ist ein erneutes Aktivieren der ACAL Funktion nötig, da signifikante Beeinflussung der Messergebnisse besonders im AC-Bereich beobachtet werden konnten.

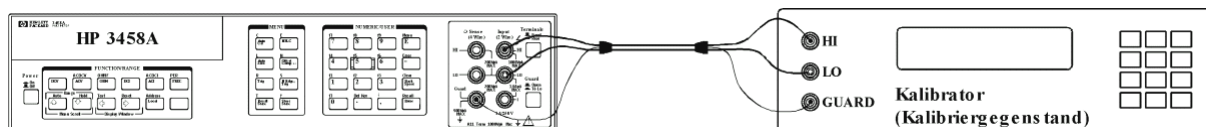


Bild IV.1 Direkte Messung am Kalibratorausgang

Widerstände werden in direkter Messung im Vierdrahtverfahren, hohe Widerstandswerte im Zweidrahtverfahren ermittelt. Dabei sind am HP 3458A die Einstellungen NPLC 100 und OCOMP ON zu verwenden (Bild IV.2).

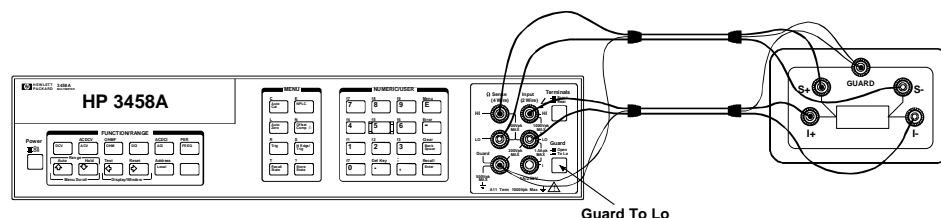


Bild IV.2 Widerstandsmessung im Vierdraht-Verfahren

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

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	IV.1 - Kalibrieren mit HP3458A - direkte Messung	1 von 1

## 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 vor einer Kalibrierung „einzumessen“ und die Folgemessung am Kalibriergegenstand durchzuführen. Sinnvoll und nötig wird dies beispielsweise im Widerstandsbereich: 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 5500A<sup>1</sup>).

### Messunsicherheit (s. IV.3)

Das Messunsicherheitsbudget dieser Methode erweitert sich durch die Verdopplung der Verfahrensunsicherheit  $u(\delta X_A)$  und einen Anteil  $\delta X_w$  (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 Messung 2 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	9,999537 Ω	9,999879 Ω	342 μΩ
19 Ω	18,997809 Ω	18,998389 Ω	580 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
1,9 MΩ	1,9002157 MΩ	1,900271 MΩ	55 Ω
10 MΩ	9,998718 MΩ	9,99869 MΩ	28 Ω
<b>2-Draht</b>			
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 Verfahreseinflüssen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Die Messung an Festwiderständen ist i.d.R. vorzuziehen bzw. sind Ergebnisse zu vergleichen. Besonders bei zu niederohmigen Messelektroniken von Multimetern / Widerstandsmessgeräten versagt z.T. die Widerstandssimulation der Multifunktionskalibratoren.

<sup>2</sup> 4-Draht-Messung, Temperatur(Labor) 23°C, Temperatur (HP) 42,5°C, Ergebnisse über Schnittstelle und Mittelwertbildung mit Stichprobenlänge n=10

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

Um Rechteckspannungen zu messen kann das Digitalmultimeter (Samplingmultimeter) als Digitizer programmiert werden<sup>3</sup>. 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 Triggerung 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

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

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

Die maximale 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 nur durch die Programmierung des NPLC-Wertes (Net Power Line Cycles) des HP 3458A unter Berücksichtigung der Netzfrequenz (i.d.R. 50 Hz) setzen.

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

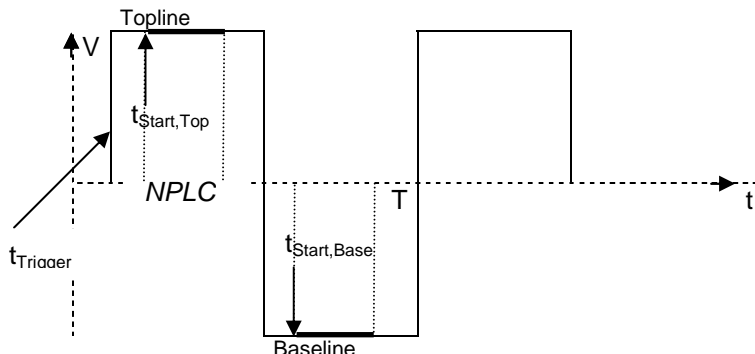


Bild IV.3 Rechteckmessung als DC-Digitizer

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

### 50 $\Omega$ - Systeme

In 50  $\Omega$  - 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

<sup>3</sup> 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
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	IV.3 - Kalibrieren mit HP3458A - Kalibrierung Rechteckspannung	1 von 2

$$a = v_l \left( \frac{1}{1 + \Gamma} \right) = v_l \left( \frac{Z_L + Z_0}{2Z_L} \right) \text{ mit } \Gamma \text{ als komplexen Reflexionsfaktor. Nimmt man rein reelle}$$

(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  $\Omega$ . Die systematische Abweichung durch verschiedene Quell und Eingangsimpedanz bei Anwendung dieser Näherung ergibt sich zu

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

und sind im Rahmen der übrigen beteiligten Messunsicherheitsanteile sehr klein und werden daher vernachlässigt. Alternativ kann an einem 50  $\Omega$  - Abschlusswiderstand über den Bananen-Buchse am Eingang des Multimeters gemessen werden. Der DC-Widerstandswert wird vor der Kalibrierung bestimmt und als Korrekturfaktor entsprechend berücksichtigt. Vergleichsmessungen ergaben keine signifikanten Abweichungen der beiden Messmethoden innerhalb der angestrebten Messunsicherheit.

Da sich der Ausgang der meisten Generatoren unter Last 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  $r_L=0,015$  bei Generatorimpedanzen mit  $r_G$  ebenfalls besser als 0,015) Abweichungen von etwa

$$\Delta_{mismatch} \approx 100 \cdot r_L r_G \% = 0,023\%$$

durch Fehlanpassungen.

## Messunsicherheit

Da sich die Spitze-Spitze-Spannung des Rechtecks als Differenz der DC-Messwerte zwischen Topline und Baseline gegeben ist ergibt sich mit

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

die der Messung beizuordnende Messunsicherheit analog zur einzelnen DC-Messung von Y bzw.  $\Delta Y$

$$u^2(V_{SS}) = u^2(Y = V_{Top}) + u^2(Y = V_{Base}) \text{ bzw.}$$

$$u^2(V_G) = \frac{1}{2} \left( u^2(Y = V_{Top}) + u^2(Y = V_{Base}) \right)$$

als Quadratesumme der Unsicherheitsbeiträge der jeweiligen Gleichspannungsmessmethode. Da mit verhältnismäßig kleinen Integrationszeiten (NPLC=0,0015 bei 10 kHz = 30  $\mu$ s) im Vergleich zur DC-Kalibrierung mit höchster Auflösung gemessen werden muss (NPLC=100) wurden Vergleichsmessungen am Gleichspannungsausgang des 5700A Multifunktionskalibrator durchgeführt um weiter Unsicherheitsanteile dieses Verfahrens abzuschätzen. Die aufgetretenen Standardabweichungen werden als zusätzlicher Unsicherheitsbeitrag  $U(\delta X_S)$  im Budget aufgenommen.

Spannung	Parameterprogrammierung analog zu <sup>4</sup>	Mittelwert	Standardabweichung	relativ
10 mV	100 Hz	10,00015 mV	3 $\mu$ V	$3 \cdot 10^{-4}$
	1 kHz	10,00085 mV	4 $\mu$ V	$4 \cdot 10^{-4}$
	10 kHz	10,00122 mV	6 $\mu$ V	$6 \cdot 10^{-4}$
1 V	100 Hz	1,000005 V	11 $\mu$ V	$11 \cdot 10^{-6}$
	1 kHz	1,000008 V	11 $\mu$ V	$11 \cdot 10^{-6}$
	10 kHz	1,000015 V	25 $\mu$ V	$25 \cdot 10^{-6}$
100 V	100 Hz	100,0003 V	1,9 mV	$19 \cdot 10^{-6}$
	1 kHz	100,0005 V	2,2 mV	$22 \cdot 10^{-6}$
	10 kHz	100,0011 V	5 mV	$5 \cdot 10^{-5}$

Tabelle IV.2 - Kontrollmessung zur weiteren Abschätzung des Verfahrenseinflüssen durch verkürzte Integrationszeit

<sup>4</sup> z.B. 100 Hz Parameter: RANGE 10e-3; DELAY 0.001; NPLC 0.15; TRIGGER AUTO

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	IV.3 - Kalibrieren mit HP3458A - Kalibrierung Rechteckspannung	2 von 2

## IV.4 Kalibrierung an Keithley 617

### IV.4.1 DC-Strom

Für präzise Strommessungen im Low-Current-Bereich steht das Elektrometer Keithley 617 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:

- AMPS Modus und V-Guard OFF
- Im 2 pA Bereich wird das Gerät über ZERO CHECK und ZERO CORRECT genullt. Dabei wird eine ausreichende Beruhigungszeit von >2 min, wie bei allen folgenden Messungen empfohlen.
- 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.
- AUTO RANGE einschalten oder besser in entsprechenden festen Messbereich über RANGE wechseln
- ZERO CORRECT ausschalten

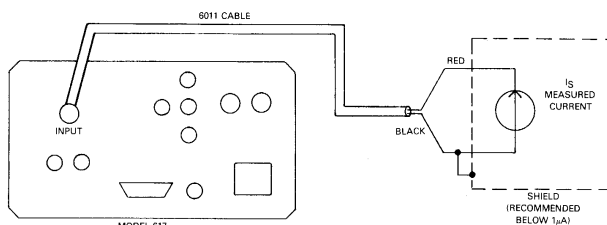


Bild IV.4 Anschluss Keithley 617 (s. User Manual)

### IV.4.2 DC-Widerstand bis 120 TΩ

Widerstände können am Elektrometer direkt in der OHMS-Funktion mit konstantem Stromfluss (bis 100 GΩ) oder bei konstanter Spannung mit der eingebauten Gleichspannungsquelle als Quotient aus U und I gemessen und das Ergebnis sofort in Ohm abgelesen werden. Für beste Messergebnisse wird empfohlen sowohl geschirmt als auch mit eingeschaltetem GUARD-Potential zu messen. Der Anschluss erfolgt gemäß Bild IV.5, die Messung erfolgt nach durchgeführtem ZERO CORRECT im festen Messbereich (RANGE).

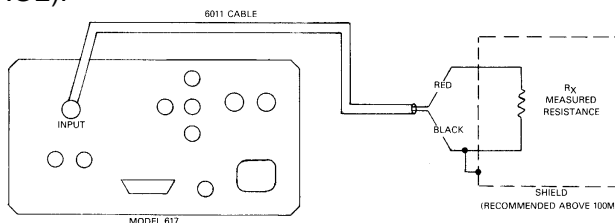


Bild IV.5 Anschluss Widerstandsmessung bis 100 GΩ, Keithley 617 (s. User Manual)

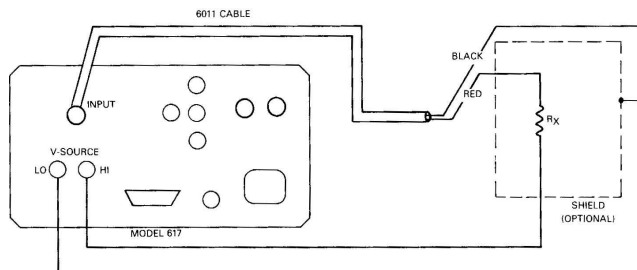
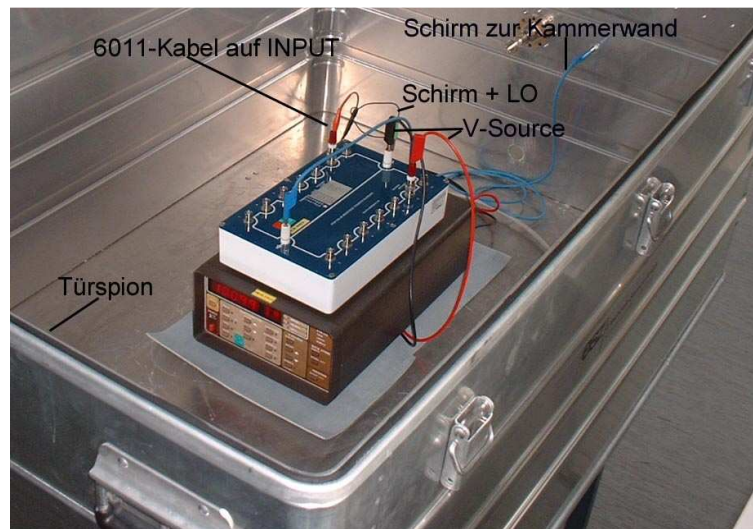


Bild IV.6 Anschluss Widerstandsmessung bis 120 TΩ

Um die Widerstandsmessung bei konstanter Spannung zu nutzen ist diese gemäß Bild IV.6 am Messobjekt anzuschließen. Die Quelle wird über V-SOURCE ADJUST eingestellt, i.d.R. 100 V für

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	IV.4 - Kalibrieren mit Keithley 617 -	1 von 2

Widerstände  $>100 \text{ M}\Omega$ , wobei die Grenzparameter des Kalibriergegenstandes nicht überschritten werden dürfen ( $U_{\max}$ ,  $I_{\max}$ ). Nach der Nullung des Instruments wird die Quelle aktiviert und mit SHIFT und OHMS in den V/I - Modus gewechselt, wodurch das Gerät den Widerstandswert direkt in Ohm ausgibt. Der Messbereich sollte gerade im Hochohm-Bereich über RANGE verriegelt werden um bis zum Stabilisieren (nach ca. 5min) immer im gleichen Bereich zu bleiben. Ab Widerstandswerten  $>10 \text{ G}\Omega$  wird der Messaufbau in einer Eigenbau-Schirmkammer (Bild. IV.7 s.a. Kapitel III.1.3) durchgeführt um den Einfluss von elektromagnetischer Einstrahlung so gering wie möglich zu halten. Daneben kann durch einbringen von Salzkristall-Entfeuchtern in der Kammer die Luftfeuchte im Messvolumen weit genug gesenkt werden. Mögliche Offset-Effekte werden durch ein Umpolen der Messspannung und Mittelwertbildung aus mindestens zwei Messungen verringert.



*Bild IV.7 Teraohmmessung in Eigenbau-Schirmkammer. Bei der Kalibrierung wird der Deckel der Kammer geschlossen, so dass sich ein elektromagnetisch geschirmter Raum um den Messaufbau ergibt.. Beobachtet wird das Display des Messgeräts durch die in der Kammerwand eingebaute Weitwinkellinse.*

Das Messverfahren ermöglicht die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse der eigenen Hochohmdekade bei Kontrollmessung im Teraohm-Bereich mit Abweichungen von  $<7\%$  ( $100 \text{ T}\Omega$  Abgriff) bzw. maximal  $0,7\%$  ( $100 \text{ M}\Omega$  bis  $10 \text{ T}\Omega$  - Abgriffe). Aufgrund dieser hohen Unsicherheit erfolgen i.d.R. nur Messungen bis  $20 \text{ T}\Omega$ .

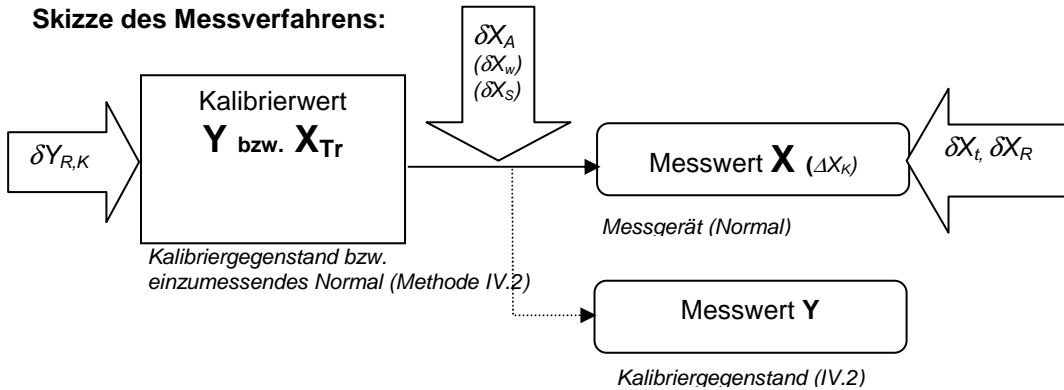
### IV.4.3 Rückführung

Die Rückführung bei Messungen im Low-Current Bereich ist durch die Gleichstromquelle Keithley 263 gewährleistet (s. Kapitel III.1.2). Die Hochohmmessung kann an der kalibrierten Dekade Sefelec KDH2 rückverfolgt werden. Vor der Kalibrierung im Direktmessverfahren erfolgt eine Kontrollmessung an diesen Normalen. Darüber hinaus wird das Messgerät im Jahresintervall vollständig kalibriert und auf die Einhaltung der Herstellerspezifikation überprüft. Das Drift-/ Abweichungsintervall wird im Messunsicherheitsbudget als Grenze einer angenommenen Rechteckverteilung berücksichtigt.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	IV.4 - Kalibrieren mit Keithley 617 -	2 von 2

## IV.5 Messunsicherheitsbudget

Skizze des Messverfahrens:



**Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:**

- X abgelesener Messwert am Messgerät (HP3458A oder Keithley 617)
- Y eingestellter Wert am Kalibriergegenstand
- X<sub>Tr</sub> Wert des einzumessenden Normals (Methode IV.2)

**Gesuchte Größe:**

- $\Delta Y$  Abweichung des am Kalibriergegenstandes eingestellten bzw. gemessenen vom richtigen Wert

Die Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen sind der Tabelle

- „Messunsicherheiten Tabelle IV U-I-R.XLS“ zu entnehmen, die Ergebnisse sind im Leistungsnachweis aufgeführt.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	IV.5 - Kalibrieren von U-I-R-Quellen Messunsicherheitsbudget	1 von 4