

Inhaltsverzeichnis

1	Inhalt und Geltungsbereich	4
1.1	Zweck und Ziel.....	4
1.2	Geltungsbereich.....	4
2	Vorbereiten des Kalibriergegenstandes	4
2.1	Beschaffenheits-, Sicherheit- und Funktionsprüfung	4
2.2	Einstellung der Referenz- und Einsatzbedingungen.....	4
3	Kalibrierverfahren	4
3.1	Spannung	4
3.2	Strom.....	5
3.3	Widerstand	6
3.4	Frequenz	6
3.5	Temperatur.....	7
3.6	Kapazität.....	7
4	Bewertung der Kalibrierung.....	7
4.1	Auswertung der Messung	7
5	Kennzeichnung des Prüfstatus	7
6	Messunsicherheitsbudget	7
6.1	Angaben zum Kalibriergegenstand	8
6.2	Angaben zur Normalmesseinrichtung / Kalibriereinrichtung	8
6.3	Messaufbau	8
6.4	Einflussgrößen DCU	8
6.4.1	Einfluss des Normals	8
6.4.2	Einfluss des Verfahrens	8
6.4.3	Einfluss des Kalibriergegenstandes	8
6.5	Mathematisches Modell der Einflussgrößen.....	8
6.6	Beitrag für das Normal $U(VCAL)$	8
6.7	Beiträge für das Verfahren $U\delta V\text{Verfahren}$	9
6.8	Beitrag für den Kalibriergegenstand $U\delta V\text{ind}$	9
6.9	Beitrag für den Kalibriergegenstand $uVix$	9
6.10	Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge	10
6.11	Messunsicherheitsanalyse	10
6.12	Unsicherheitsbeitrag des Normals $u(VCAL)$	10
6.13	Unsicherheitsbeitrag des Verfahrens $u(\delta V\text{Verfahren})$	10
6.14	Unsicherheitsbeitrag für die endliche Auflösung des Kalibriergegenstandes $u(\delta V\text{ind})$	10
6.15	Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge	10
6.16	Erweiterte Messunsicherheit U	11
6.17	Einflussgrößen ACU	11
6.17.1	Einfluss des Normals	11

6.17.2	Einfluss des Verfahrens	11
6.17.3	Einfluss des Kalibriergegenstandes	11
6.18	Mathematisches Modell der Einflussgrößen	11
6.19	Beitrag für das Normal $U(VCAL)$	11
6.20	Beiträge für das Verfahren $U(\delta V\text{Verfahren})$	12
6.21	Beitrag für den Kalibriergegenstand $U(\delta V\text{ind})$	12
6.22	Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge	12
6.23	Messunsicherheitsanalyse	12
6.24	Unsicherheitsbeitrag des Normals $u(VCAL)$	12
6.25	Unsicherheitsbeitrag des Verfahrens $u(\delta V\text{Verfahren})$	13
6.26	Unsicherheitsbeitrag für die endliche Auflösung des Kalibriergegenstandes $u(\delta V\text{ind})$	13
6.27	Beitrag für den Kalibriergegenstand $u(Vix)$	13
6.28	Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge	13
6.29	Erweiterte Messunsicherheit U	13
6.30	Einflussgrößen DCI	13
6.30.1	Einfluss des Normals	13
6.30.2	Einfluss des Verfahrens	14
6.30.3	Einfluss des Kalibriergegenstandes	14
6.31	Mathematisches Modell der Einflussgrößen	14
6.32	Beitrag für das Normal $U(ACAL1)$	14
6.33	Beiträge für das Verfahren $U(\delta V\text{Verfahren})$	14
6.34	Beitrag für den Kalibriergegenstand $U(\delta A\text{ind})$	15
6.35	Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge	15
6.36	Messunsicherheitsanalyse	15
6.37	Unsicherheitsbeitrag des Normals $u(ACAL)$	15
6.38	Unsicherheitsbeitrag des Verfahrens $u(\delta A\text{Verfahren})$	15
6.39	Unsicherheitsbeitrag für die endliche Auflösung des Kalibriergegenstandes $u(\delta A\text{ind})$	16
6.40	Unsicherheitsbeitrag des Kalibriergegenstandes $u(Aix)$	16
6.41	Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge	16
6.42	Erweiterte Messunsicherheit U	16
6.43	Einflussgrößen ACI	16
6.43.1	Einfluss des Normals	16
6.43.2	Einfluss des Verfahrens	16
6.43.3	Einfluss des Kalibriergegenstandes	16
6.44	Mathematisches Modell der Einflussgrößen	17
6.45	Beitrag für das Normal $U(VCAL)$	17
6.46	Beiträge für das Verfahren $U\delta A\text{Verfahren}$	17
6.47	Beitrag für den Kalibriergegenstand $U\delta A\text{ind}$	17
6.48	Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge	18
6.49	Messunsicherheitsanalyse	18
6.50	Unsicherheitsbeitrag des Normals $uACAL$	18
6.51	Unsicherheitsbeitrag des Verfahrens $u\delta A\text{Verfahren}$	18
6.52	Unsicherheitsbeitrag für die endliche Auflösung des Kalibriergegenstandes $u\delta A\text{ind}$	18

6.53	Unsicherheitsbeitrag des Kalibriergegenstandes u_{Aix}	18
6.54	Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge	19
6.55	Erweiterte Messunsicherheit U	19
6.56	Einflussgrößen DCR	19
6.56.1	Einfluss des Normals	19
6.56.2	Einfluss des Verfahrens	19
6.56.3	Einfluss des Kalibriergegenstandes	19
6.57	Mathematisches Modell der Einflussgrößen	19
6.58	Beitrag für das Normal $U_{\Omega CAL}$	19
6.59	Beiträge für das Verfahren $U_{\delta \Omega \text{Verfahren}}$	20
6.60	Beitrag für den Kalibriergegenstand $U_{\delta \Omega ind}$	20
6.61	Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge	20
6.62	Messunsicherheitsanalyse	20
6.63	Unsicherheitsbeitrag des Normals $u_{\Omega CAL}$	20
6.64	Unsicherheitsbeitrag des Verfahrens $u_{\delta \Omega \text{Verfahren}}$	21
6.65	Unsicherheitsbeitrag für die endliche Auflösung des Kalibriergegenstandes $u_{\delta \Omega ind}$	21
6.66	Unsicherheitsbeitrag des Kalibriergegenstandes $u_{\Omega ix}$	21
6.67	Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge	21
6.68	Erweiterte Messunsicherheit	21
6.69	Einflussgrößen HZ	21
6.69.1	Einfluss des Normals	21
6.69.2	Einfluss des Verfahrens	22
6.69.3	Einfluss des Kalibriergegenstandes	22
6.70	Mathematisches Modell der Einflussgrößen	22
6.71	Beitrag für das Normal $U(f_{CAL1})$	22
6.72	Beiträge für das Verfahren $U(\delta f \text{Verfahren})$	22
6.73	Beitrag für den Kalibriergegenstand $U(\delta A ind)$	22
6.74	Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge	23
6.75	Messunsicherheitsanalyse	23
6.76	Unsicherheitsbeitrag des Normals $U(f_{CAL})$	23
6.77	Unsicherheitsbeitrag des Verfahrens $u(\delta f \text{Verfahren})$	23
6.78	Unsicherheitsbeitrag für die endliche Auflösung des Kalibriergegenstandes $u(\delta f ind)$	23
6.79	Unsicherheitsbeitrag durch die Anzeige des Kalibriergegenstandes $u(fix)$	23
6.80	Erweiterte Messunsicherheit U	24
7	Bezugsdokumente	24
7.1	Mitgeltende Unterlagen	24
7.2	Normen	24

1 Inhalt und Geltungsbereich

1.1 Zweck und Ziel

Diese Work Instruction beschreibt die Vorgehensweise zur Kalibrierung von Digitalmultimetern.

Die Kalibrierung erfolgt in Anlehnung an die beschriebene Vorgehensweise der Richtlinie VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 Blatt 3, Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen –

Digitalmultimeter, in ihrer jeweils gültigen Revision.

Die erweiterte Messunsicherheit U für den Kalibrierprozess, berechnet sich nach Richtlinie DKD-3-E2, Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen, in ihrer jeweils gültigen Revision.

1.2 Geltungsbereich

- Phoenix Contact

2 Vorbereiten des Kalibriergegenstandes

2.1 Beschaffenheits-, Sicherheit- und Funktionsprüfung

Vor Beginn der Kalibrierung ist der Kalibrierstatus aller zur Durchführung der Kalibrierung benötigten Normale und Normalmesseinrichtungen zu prüfen. Gegebenenfalls sind sie zu kalibrieren und zu justieren.

Eine Sicherheitsüberprüfung nach DGUV-Vorschrift 3 wird durchgeführt. Diese umfasst eine Sichtprüfung auf Beschädigung des Gehäuses und der Anschlussleitungen. Gemessen werden der Schutzleiter-, Isolationswiderstand und der Ableitstrom. Die Funktionsfähigkeit des Multimeters wird geprüft.

Folgende nach *VDI/VDE/DGQ 2622, Blatt 3 vorbereitende Maßnahmen, Prüfungen und Tätigkeiten sind durchzuführen:

- Durch eine Sichtprüfung ist der allgemeine Zustand zu begutachten.
- Alle relevanten Funktionen die zur Kalibrierung benötigt werden sind zu überprüfen.
- Die Funktion der Schalter, Einsteller Anzeigen sowie der Betriebsarten sind zu überprüfen.

2.2 Einstellung der Referenz- und Einsatzbedingungen

Die Kalibrierung erfolgt bei dem vom Hersteller vorgegebenen Referenzbedingungen.

Die Aufwärmzeit für Kalibrator und Multimeter beträgt mindestens 30 Minuten.

3 Kalibrierverfahren

3.1 Spannung

Der Spannungsbereich von Digitalmultimetern wird an Fluke Kalibratoren, Modell 5520A/5500A, kalibriert. Die Kalibrierung erfolgt nach VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 Blatt 3. Die Kalibrierpunkte werden nach genannter Richtlinie festgelegt.

Die Spannung wird direkt am Ausgang des Kalibrators gemessen Abbildung 1.

Als Messleitungen im DC-Bereich dienen Fluke 5520A-525A/LEADS. Hierbei handelt es sich um geschirmte Leitungen mit Spezialsteckern und geringer Thermospannung.

Im AC Bereich werden geschirmte verdrehte Leitungen (Pomona 4530 /RG58) verwendet.

Bei vorhandenen Guard Anschluss am Digitalmultimeter wird dieses mit dem Guard Anschluss am Kalibrator verbunden. Die Verbindung zur Erde erfolgt am Kalibrator.

Bei geerdetem LO- Anschluss am Digitalmultimeter wird am Kalibrator „ExGRD“ eingeschaltet. Am Digitalmultimeter wird der Nullpunkt mit kurz geschlossenem Eingang gemessen. Für den Kurzschluss werden Kurzschlussstecker mit vergoldeten Kontakten verwendet, um eine möglichst geringe Thermospannung zu erreichen.

Um einen stabilen Nullpunkt zu bekommen, wird ein Zeitraum von einigen Minuten benötigt bis das thermische Gleichgewicht erreicht ist. Die Anzeige darf in diesem Fall keinerlei Drift aufweisen.

Übertrifft die Genauigkeit des Digitalmultimeters die des Kalibrators, wird bei Digitalmultimeter mit mehr als 6,5 digit, ein Agilent 3458A oder Keithley 2002 mit 8,5 digit in Substitution (Abbildung 2) verwendet.

Hierbei wird der Messwert des Agilent 3458A oder Keithley 2002 mit dem Messwert des zu kalibrierendem Multimeters verglichen.

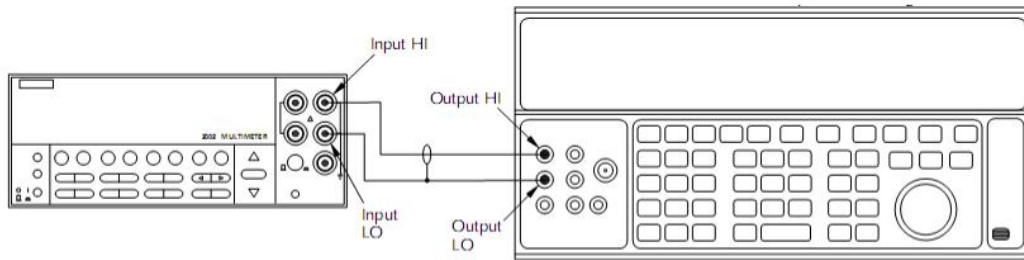


Abbildung 1: Messaufbau

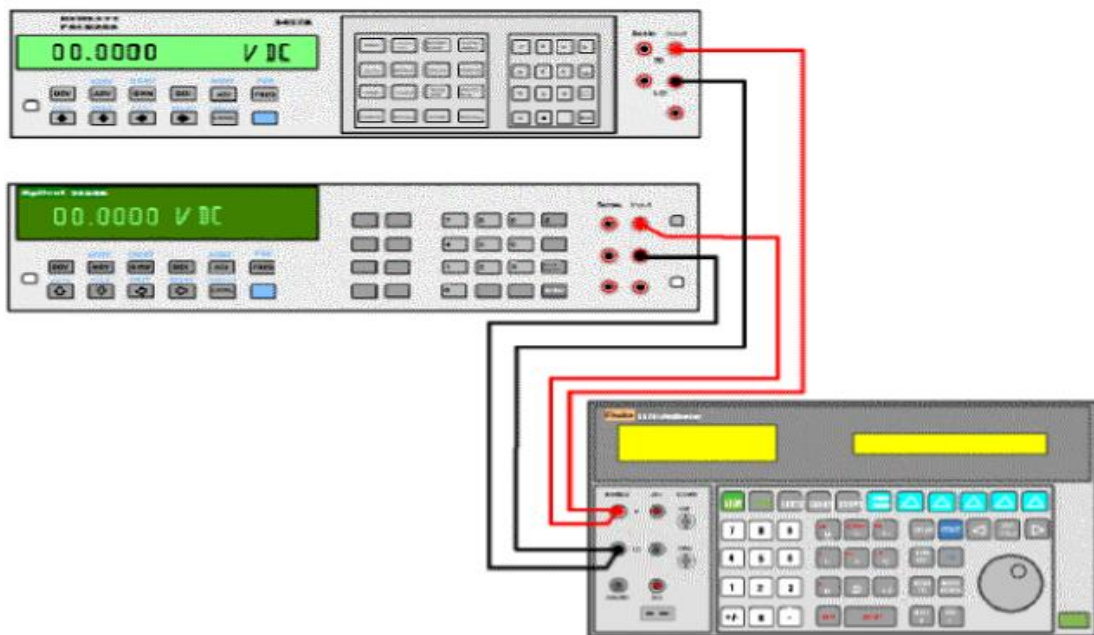


Abbildung 2: Substitutionsmessung

3.2 Strom

Der Strombereich von Digitalmultimetern wird an Fluke Kalibratoren, Modell 5520A/5500A, kalibriert. Kalibriert wird nach VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 Blatt 3. Die Kalibrierpunkte werden nach genannter Richtlinie festgelegt.

Der Strom wird direkt am Ausgang des Kalibrators gemessen.

Als Messleitungen dienen Fluke 5520A-525A/LEADS (High Current 30 A test lead). Ströme < 2,2 A, werden mit abgeschirmten Laborleitungen (Pomona 2x RG58 C/U) durchgeführt.

Bei vorhandenen Guard Anschluss am Digitalmultimeter wird dieser mit dem Guard Anschluss am Kalibrator verbunden. Die Verbindung zur Erde erfolgt am Kalibrator.

Bei geerdetem LO- Anschluss am Digitalmultimeter wird am Kalibrator „ExGRD“ eingeschaltet.

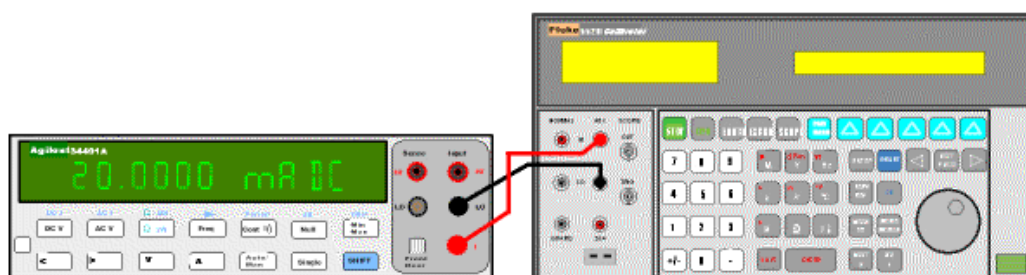


Abbildung 3: Anschlussdarstellung Digitalmultimeter - Kalibrator

3.3 Widerstand

Der Widerstandsbereich von Digitalmultimetern wird an Fluke Kalibratoren, Modell 5520A/5500A, Burster Widerstandsdekade Typ:1424 oder Burster Festwiderstand 100kOhm, 0,01 Ohm, 0,001 Ohm, 0,0001 Ohm, kalibriert. Kalibriert wird nach VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 Blatt 3. Die Kalibrierpunkte sind nach der genannten Richtlinie festgelegt.

Der Widerstand wird direkt am Ausgang des Kalibrators, der Widerstandsdekade oder des Festwiderstandes gemessen.

Als Messleitungen dienen Fluke 5520A-525A/LEADS. Bei vorhandenen Guard Anschluss am Widerstandsmessgerät wird dieser mit dem Guard Anschluss am Kalibrator verbunden. Die Verbindung zur Erde erfolgt am Kalibrator.

Bei geerdetem LO- Anschluss am Widerstandsmessgerät wird am Kalibrator „ExGRD“ eingeschaltet. Abweichende Messaufbauten erfolgen nur, wenn der Hersteller einen anderen Messaufbau empfiehlt.

Digitalmultimeter werden bei vorhandenem Vierleiteranschluss wie folgt angeschlossen: Die Stromführenden Anschlüsse „Input Hi / Lo“ des Widerstandsmessgerätes werden mit den „Normal Hi / Lo“ Anschlüssen des Kalibrators verbunden. Die Sense Anschlüsse werden mit dem (Aux) Sense Anschluss des Kalibrators verbunden, siehe Abbildung 4.

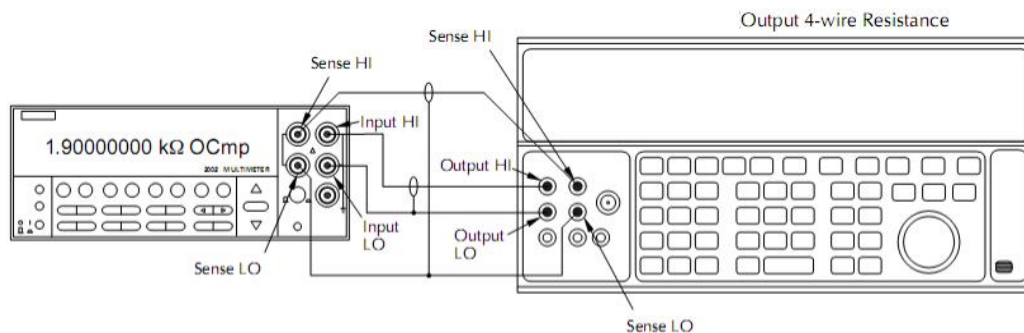


Abbildung 4: Systematische Anschlussdarstellung

Bei Zweileiteranschluss (Abbildung 5) kann zur Kompensierung der Leitung zusätzlich der Sense Anschluss des Kalibrators mit den Input Hi / Lo Anschlüssen des Widerstandsmessgerätes verbunden werden. In diesem Fall muss der Kalibrator bis 300 kOhm auf „2 Wire Comp“ geschaltet werden.

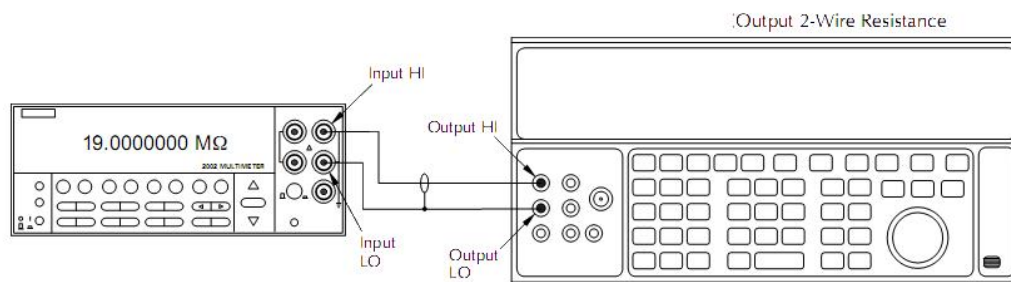


Abbildung 5: Systematische Darstellung - Zweileiteranschluss

3.4 Frequenz

Der Frequenzbereich von Digitalmultimetern wird an Fluke Kalibratoren, Modell 5520A/5500A, kalibriert. Kalibriert wird nach VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 Blatt 3. Die Kalibrierpunkte sind nach der genannten Richtlinie festgelegt.

Die Frequenz wird direkt am Ausgang des Kalibrators gemessen. Wenn möglich wird die Messung mit einem rechteckförmigen Ausgangssignal durchgeführt.

3.5 Temperatur

Der Temperaturbereich von Digitalmultimetern wird an Fluke Kalibratoren, Modell 5520A/5500A, kalibriert. Kalibriert wird nach VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 Blatt 3. Die Kalibrierpunkte sind nach der genannten Richtlinie festgelegt.

Die Temperatur wird direkt am TC-Ausgang oder bei PT100 Messeingängen in Vierleiter Widerstandstechnik am Ausgang des Kalibrators gemessen.

Als Messleitungen für Thermospannungen dienen Fluke 5520A-525A/LEADS (Typ K,J etc.). Hierbei handelt es sich um spezielle Leitungen für Temperaturmessungen.

Für PT100 oder andere Temperaturwiderstandseingänge werden ebenfalls Fluke 5520A-525A/LEADS (BNC-geschirmt) verwendet.

3.6 Kapazität

Der Kapazitätsbereich von Digitalmultimetern wird an Kalibratoren der Firma Fluke, Modell 5520A/5500A, kalibriert. Kalibriert wird nach VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 Blatt 3. Die Kalibrierpunkte sind nach der genannten Norm festgelegt.

Als Messleitungen für Kapazitäten dienen Fluke 5520A-525A/LEADS. Die Kapazität der Messleitung wird vor der Messung kompensiert.

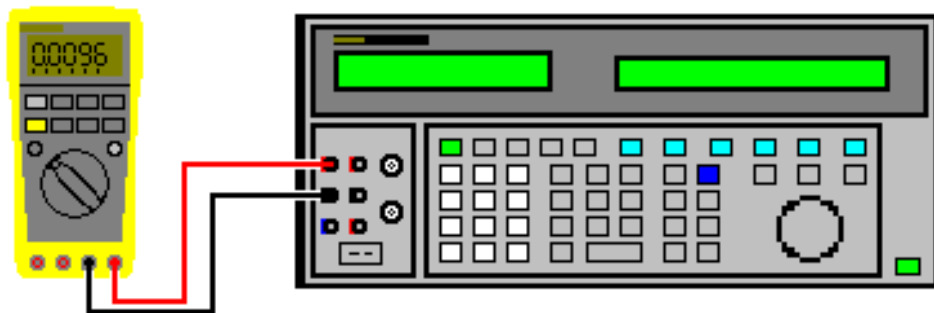


Abbildung 6: Systematische Darstellung - Kapazitätsmessung

4 Bewertung der Kalibrierung

4.1 Auswertung der Messung

Aus den ermittelten Messwerten wird von der Auswertesoftware Fluke Metcal ein Kalibrierschein erstellt. Betriebsbedingungen und Messaufbau werden ebenfalls dokumentiert.

5 Kennzeichnung des Prüfstatus

Nach erfolgreicher Kalibrierung wird der Prüfling mit einer Prüfplakette gekennzeichnet. Sie trägt den aktuellen und den nächsten Prüfzeitpunkt.

6 Messunsicherheitsbudget

Die erweiterte Messunsicherheit U für den Kalibrierprozess berechnet sich nach Richtlinie DKD-3 in ihrer jeweils gültigen Revision.

Zur Ermittlung der Messunsicherheit eines Multimeters werden die folgenden Schritte vorgenommen. Die Berechnung wird beispielhaft an einem Agilent 34401A vorgenommen.

6.1 Angaben zum Kalibriergegenstand

Digital-Multimeter zum Messen von DCV, ACV, DC-Widerstand, DCI, ACI.

6.2 Angaben zur Normalmesseinrichtung / Kalibriereinrichtung

Der Multiprodukt-Kalibrator liefert an seinen Ausgang DCV, ACV, DC-Widerstand, DCI, ACI, Kapazität, Gleich- und Wechsellast und Temperatursimulation. Zusätzlich ist eine Option zur Kalibrierung von Oszilloskopen vorhanden.

6.3 Messaufbau

Die Kalibrierung von Multimetern erfolgt durch eine direkte Messung am Kalibrator 5520A, siehe Abbildung 7.



Abbildung 7: Messaufbau Multimeter - Kalibrator

6.4 Einflussgrößen DCU

6.4.1 Einfluss des Normals

a) Unsicherheitsbeitrag des Normals

6.4.2 Einfluss des Verfahrens

b) Ungeeignete Messleitungen

c) Temperatureinflüsse / Thermospannungen bei kleinen DC-Spannungen

d) Kontaktwiderstand / Übergangswiderstand

e) Korrosion

f) Kabelbruch

6.4.3 Einfluss des Kalibriergegenstandes

g) Leckstrom

h) Genauigkeit / Auflösung / Präzision

6.5 Mathematisches Modell der Einflussgrößen

Mit den Einflussgrößen wird das mathematische Modell der Messunsicherheit aufgestellt.

$$u_{\text{gesamt}}(V) = \sqrt{u^2(V_{\text{CAL}}) + u^2(\delta V_{\text{Verfahren}}) + u^2(\delta V_{\text{ind}}) + u^2(V_{\text{ix}})}$$

6.6 Beitrag für das Normal $U(V_{\text{CAL}})$

Beispielrechnung für 10 VDC

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibrators wird aus dem gültigen Kalibrierschein entnommen.

Bereich: 33 VDC

Kalibrierwert: 10 VDC

$$U(V_{CAL1}) = 25 \mu V \quad \text{mit } k=2$$

$$U(V_{CAL1}) = 12,5 \mu V$$

Für die Drift des Kalibrators seit seiner letzten Kalibrierung werden die Angaben aus den Herstellerspezifikationen eingesetzt.

Einhahrespezifikation, 99%Confidence Interval

Absolute Uncertainty, $t_{cal} \pm 5^\circ C$

Bereich: 0 - 32,99999 VDC / $\pm(12\text{ppm of output} + 20 \mu V)$

Bei 10 VDC ergibt sich hieraus:

$$U(V_{CAL2}) = 140 \mu V$$

$$U(V_{CAL}) = U(V_{CAL1}) + U(V_{CAL2})$$

$$U(V_{CAL}) = 12,5 \mu V + 140 \mu V$$

$$U(V_{CAL}) = 152,5 \mu V$$

6.7 Beiträge für das Verfahren $U(\delta V_{Verfahren})$

Thermospannungen: Der Seebeck Effekt wird durch einheitliches Material der Messleitungen verhindert, der Thomson Effekt durch gleichbleibende Temperaturen möglichst klein gehalten. Messleitungen werden im Labor gelagert.

Die Thermospannungen wirken sich nur bei kleinen Spannungen $< 1 \text{ mV}$ aus. Generell werden die Messgeräte vor der Kalibrierung mindestens 12 Std. im Labor eingeschaltet gelagert um gleiche Temperaturen an den Kontaktstellen zu erreichen.

Wartung und Pflege der Messkabel: Um Fehler durch Kontaktwiderstand/Übergangswiderstand, Korrosion oder Kabelbruch zu verhindern, werden die Kabel regelmäßig visuell und messtechnisch überprüft.

Zur Ermittlung des Messunsicherheitsbeitrags der verschiedenen Typen von Messleitungen wurden Messreihen durchgeführt um die Standardabweichung aus diesen Werten zu ermitteln. Diese beinhalten eventuelle Thermospannungen.

Für den Bereich 10 VDC wurde die Standardabweichung aus einer Messreihe von 15 Messwerten ermittelt.

$$U(\delta V_{Verfahren}) = 2,1647 \mu V$$

6.8 Beitrag für den Kalibriergegenstand $U(\delta V_{ind})$

Die Auflösung des Multimeters beträgt im 10 Volt Bereich $10 \mu V$, als Unsicherheitsbeitrag wird die Hälfte der Auflösung eingesetzt.

$$U(\delta V_{ind}) = 5 \mu V$$

Die Standardunsicherheit durch eventuelle Schwankungen des Multimeters wird durch eine Messreihe von 20 Messwerten ermittelt. Die Schwankungen sind so gering das sich diese nicht auf das Endergebnis auswirken.

$$U(s) = 2,2 \mu V$$

6.9 Beitrag für den Kalibriergegenstand $u(V_{ix})$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i

$$u(V_{ix}) = U(s) \cdot b_i \cdot c(V_{ix})$$

$$u(V_{ix}) = 2,2 \mu V \cdot 0,58 \cdot 1$$

$$u(V_{ix}) = 1,3 \mu V$$

6.10 Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge

Folgende Beiträge werden in das Messunsicherheitsbudget übernommen:

$$U(V_{CAL}) = 152,5 \mu V$$

$$U(\delta V_{Verfahren}) = 2,2 \mu V$$

$$U(\delta V_{ind}) = 5 \mu V$$

$$U(s) = 2,2 \mu V$$

6.11 Messunsicherheitsanalyse

Jede identifizierte Einflussgröße liefert einen Beitrag zum Messunsicherheitsbudget.

Der Einzelbeitrag jeder Einflussgröße ist mit seinem Sensitivitätskoeffizienten c_i zu multiplizieren. Der Sensitivitätskoeffizient beträgt $c(V_{CAL}) = 1$, da zur Berechnung die Grenzwerte der Veränderung des Einflusses angenommen werden.

Der Unsicherheitsbeitrag ergibt sich somit aus:

$$u_i(y) = U_i \cdot c_i$$

6.12 Unsicherheitsbeitrag des Normals $u(V_{CAL})$

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibrators ergibt sich aus dessen Kalibrierung und der Drift. Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i .

$$u(V_{CAL}) = U(V_{CAL}) \cdot b_i \cdot c(V_{CAL})$$

$$u(V_{CAL}) = 152,5 \mu V / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(V_{CAL}) = 88,5 \mu V$$

6.13 Unsicherheitsbeitrag des Verfahrens $u(\delta V_{Verfahren})$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung.

Aus entsprechenden Untersuchungen der Messleitungen wurde folgender Wert ermittelt:

$$u(\delta V_{Verfahren}) = U(\delta V_{Verfahren}) \cdot b_i \cdot c(\delta V_{Verfahren})$$

$$u(\delta V_{Verfahren}) = 2,1647 \mu V / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(\delta V_{Verfahren}) = 1,25 \mu V$$

6.14 Unsicherheitsbeitrag für die endliche Auflösung des Kalibriergegenstandes $u(\delta V_{ind})$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i .

$$u(\delta V_{ind}) = U(\delta V_{ind}) \cdot b_i \cdot c(\delta V_{ind})$$

$$u(\delta V_{ind}) = 5 \mu V / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(\delta V_{ind}) = 2,9 \mu V$$

6.15 Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge

Folgende Beiträge werden in das Messunsicherheitsbudget übernommen:

$$u(V_{CAL}) = 88,5 \mu V$$

$$u(\delta V_{Verfahren}) = 1,25 \mu V$$

$$u(\delta V_{ind}) = 2,9 \mu V$$

$$u(V_{ix}) = 1,3 \mu V$$

6.16 Erweiterte Messunsicherheit U

$$U = k \cdot u(Ex) = 163 \mu V$$

6.17 Einflussgrößen ACU

6.17.1 Einfluss des Normals

a) Unsicherheitsbeitrag des Normals

6.17.2 Einfluss des Verfahrens

b) Kabelkapazität

c) Externe Störungen im Millivoltbereich

d) Kabelinduktivität über 1MHz

e) Kontaktwiderstand / Übergangswiderstand

f) Korrosion

g) Kabelbruch

6.17.3 Einfluss des Kalibriergegenstandes

h) Leckstrom

i) Genauigkeit / Auflösung / Präzision

6.18 Mathematisches Modell der Einflussgrößen

Mit den Einflussgrößen wird das mathematische Modell der Messunsicherheit aufgestellt.

$$u_{gesamt}(V) = \sqrt{u^2(V_{CAL}) + u^2(\delta V_{Verfahren}) + u^2(\delta V_{ind}) + u^2(V_{ix})}$$

6.19 Beitrag für das Normal $U(V_{CAL})$

Beispielrechnung für 10VAC

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibrators wird aus dem gültigen Kalibrierschein entnommen.

Bereich: 33 VAC@1kHz

Kalibrierwert: 10 VAC@1kHz

$$U(V_{CAL1}) = 700 \mu V \quad \text{mit } k=2$$

$$U(V_{CAL1}) = 350 \mu V$$

Für die Drift des Kalibrators seit seiner letzten Kalibrierung werden die Angaben aus den Herstellerspezifikationen eingesetzt.

Einjahresspezifikation, 99%Confidence Interval

Absolute Uncertainty, $t_{cal} \pm 5^\circ C$

Bereich: 3,3-32,9999VAC von 45Hz-10kHz / $\pm(150\text{ppm of output} + 600\mu V)$

Bei 10 VAC ergibt sich hieraus:

$$U(V_{CAL2}) = 2100 \mu V$$

$$U(V_{CAL}) = U(V_{CAL1}) + U(V_{CAL2})$$

$$U(V_{CAL}) = 350 \mu V + 2100 \mu V$$

$$U(V_{CAL}) = 2450 \mu V$$

6.20 Beiträge für das Verfahren $U(\delta V_{\text{Verfahren}})$

Kabelkapazität: Eine geringe Kabelkapazität wird durch verdrehte ungeschirmte Kabelpaare erreicht (Pomona Model: 2BA).

Externe Störungen: Im Millivoltbereich werden verdrehte, geschirmte Kabel verwendet um externe Störungen zu vermeiden (Pomona Model: 1167).

Kabelinduktivität: Kabelinduktivität wirkt sich bei Frequenzen oberhalb 1 MHz aus. Der Kalibrator ist nur bis maximal 500 kHz spezifiziert, weswegen sich hierdurch kein Beitrag ergibt.

Wartung und Pflege der Messkabel: Um Fehler durch Kontaktwiderstand / Übergangswiderstand, Korrosion oder Kabelbruch zu verhindern, werden die Kabel regelmäßig visuell und messtechnisch überprüft.

Zur Ermittlung des Messunsicherheitsbeitrags der verschiedenen Typen von Messleitungen wurden Messreihen durchgeführt um die Standardabweichung aus diesen Werten zu ermitteln.

Für den Bereich 10VAC@1kHz wurde die Standardabweichung aus einer Messreihe von 15 Messwerten ermittelt.

$$U(\delta V_{\text{Verfahren}}) = 265 \mu V$$

6.21 Beitrag für den Kalibriergegenstand $U(\delta V_{\text{ind}})$

Die Auflösung des Multimeters beträgt im 10 Volt AC-Bereich 10 μV . Als Unsicherheitsbeitrag wird die Hälfte der Auflösung eingesetzt.

$$U(\delta V_{\text{ind}}) = 5 \mu V$$

Die Standardunsicherheit durch eventuelle Schwankungen des Multimeters wird durch eine Messreihe von 20 Messwerten ermittelt. Die Schwankungen sind so gering das sich diese nicht auf das Endergebnis auswirken.

$$U(s) = 60 \mu V$$

6.22 Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge

Folgende Beiträge werden in das Messunsicherheitsbudget übernommen:

$$U(V_{\text{CAL}}) = 2450 \mu V$$

$$U(\delta V_{\text{Verfahren}}) = 265 \mu V$$

$$U(\delta V_{\text{ind}}) = 5 \mu V$$

$$U(s) = 60 \mu V$$

6.23 Messunsicherheitsanalyse

Jede identifizierte Einflussgröße liefert einen Beitrag zum Messunsicherheitsbudget.

Der Einzelbeitrag jeder Einflussgröße ist mit seinem Sensitivitätskoeffizienten c_i zu multiplizieren. Der Sensitivitätskoeffizient $c(V_{\text{CAL}})$ beträgt 1, da zur Berechnung die Grenzwerte der Veränderung des Einflusses angenommen werden.

Der Unsicherheitsbeitrag ergibt sich somit aus:

$$u_i(y) = U_i \cdot c_i$$

6.24 Unsicherheitsbeitrag des Normals $u(V_{\text{CAL}})$

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibrators ergibt sich aus dessen Kalibrierung und der Drift. Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i .

$$u(V_{CAL}) = U(V_{CAL}) \cdot b_i \cdot c(V_{CAL})$$

$$u(V_{CAL}) = 2450 \mu V / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(V_{CAL}) = 1421 \mu V$$

6.25 Unsicherheitsbeitrag des Verfahrens $u(\delta V_{Verfahren})$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung.

Aus entsprechenden Untersuchungen der Messleitungen wurde folgender Wert ermittelt:

$$u(\delta V_{Verfahren}) = U(\delta V_{Verfahren}) \cdot b_i \cdot c(\delta V_{Verfahren})$$

$$u(\delta V_{Verfahren}) = 265 \mu V / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(\delta V_{Verfahren}) = 153 \mu V$$

6.26 Unsicherheitsbeitrag für die endliche Auflösung des Kalibriergegenstandes $u(\delta V_{ind})$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i .

$$u(\delta V_{ind}) = U(\delta V_{ind}) \cdot b_i \cdot c(\delta V_{ind})$$

$$u(\delta V_{ind}) = 5 \mu V / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(\delta V_{ind}) = 2,9 \mu V$$

6.27 Beitrag für den Kalibriergegenstand $u(V_{ix})$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i .

$$u(V_{ix}) = U(s) \cdot b_i \cdot c(l_s)$$

$$u(V_{ix}) = 60 \mu V \cdot 0,58 \cdot 1$$

$$u(V_{ix}) = 35 \mu V$$

6.28 Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge

Folgende Beiträge werden in das Messunsicherheitsbudget übernommen:

$$u(V_{CAL}) = 1421 \mu V$$

$$u(\delta V_{Verfahren}) = 153 \mu V$$

$$u(\delta V_{ind}) = 2,9 \mu V$$

$$u(V_{ix}) = 35 \mu V$$

6.29 Erweiterte Messunsicherheit U

$$U = k \cdot u(Ex) = 2617 \mu V$$

6.30 Einflussgrößen DCI

6.30.1 Einfluss des Normals

a) Unsicherheitsbeitrag des Normals

6.30.2 Einfluss des Verfahrens

- b) Ungeeignete Messleitungen
- c) Kontaktwiderstand / Übergangswiderstand
- d) Korrosion
- e) Kabelbruch

6.30.3 Einfluss des Kalibriergegenstandes

- f) Leckstrom
- g) Genauigkeit / Auflösung / Präzision

6.31 Mathematisches Modell der Einflussgrößen

Mit den Einflussgrößen wird das mathematische Modell der Messunsicherheit aufgestellt.

$$u_{gesamt}(A) = \sqrt{u^2(A_{CAL}) + u^2(\delta A_{Verfahren}) + u^2(\delta A_{ind}) + u^2(A_{ix})}$$

6.32 Beitrag für das Normal $U(A_{CAL1})$ **Beispielrechnung für 1-A DC Current**

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibrators wird aus dem gültigen Kalibrierschein entnommen.

Bereich: 0-1,099999A

Kalibrierwert: 1A

$U(A_{CAL1}) = 30 \mu A$ mit $k=2$

$U(A_{CAL1}) = 15 \mu A$

Für die Drift des Kalibrators seit seiner letzten Kalibrierung werden die Angaben aus den Herstellerspezifikationen eingesetzt.

Einhressspezifikation, 99%Confidence Interval

Absolute Uncertainty, $t_{cal} \pm 5^\circ C$

Bereich: 0-1,099999A DC / $\pm(200ppm \text{ of output } +40\mu A)$

Bei 1 A DC ergibt sich hieraus:

$U(A_{CAL2}) = 240 \mu A$

$U(A_{CAL}) = U(A_{CAL1}) + U(A_{CAL2})$

$U(A_{CAL}) = 15 \mu A + 240 \mu A$

$U(A_{CAL}) = 255 \mu A$

6.33 Beiträge für das Verfahren $U(\delta V_{Verfahren})$

Thermospannungen: Der Seebeck Effekt wird durch einheitliches Material der Messleitungen verhindert, der Thomson Effekt durch gleichbleibende Temperaturen möglichst klein gehalten. Messleitungen werden im Labor gelagert.

Der sich aus der Thermospannung ergebende Strom wirkt sich nur bei kleinen Strömen $<1\mu A$ aus. Die Schwankungen des Ausgangstroms des Kalibrators sind größer als die Beeinflussung durch Thermospannungen. Generell werden die Messgeräte vor der Kalibrierung über einen Zeitraum von mindestens 12 Std. im Labor eingeschaltet gelagert, um gleiche Temperaturen an den Kontaktstellen zu erreichen.

Für Messströme $<2A$ werden Messleitungen der Firma Pomona verwendet (Model: 2BC). Für Messströme $>2A$ werden Messleitungen der Firma Fluke verwendet (High Current 30 A test lead).

Wartung und Pflege der Messkabel:

Um Fehler durch Kontaktwiderstand / Übergangswiderstand, Korrosion oder Kabelbruch zu verhindern, werden die Kabel regelmäßig visuell und messtechnisch überprüft. Zur Ermittlung des

Messunsicherheitsbeitrags der verschiedenen Typen von Messleitungen wurden Messreihen durchgeführt um die Standardabweichung aus diesen Werten zu ermitteln. Diese beinhalten eventuelle Ströme durch Thermospannungen.

Für den Bereich 1 A DC wurde die Standardabweichung aus einer Messreihe von 15 Messwerten ermittelt.

$$U(\delta A_{\text{Verfahren}}) = 0,11 \mu A$$

6.34 Beitrag für den Kalibriergegenstand $U(\delta A_{\text{ind}})$

Die Auflösung des Multimeters beträgt im 1A DC Bereich $1 \mu A$. Als Unsicherheitsbeitrag wird die Hälfte der Auflösung eingesetzt.

$$U(\delta A_{\text{ind}}) = 0,5 \mu A$$

Die Standardunsicherheit durch eventuelle Schwankungen des Multimeters wird durch eine Messreihe von 20 Messwerten ermittelt.

$$U(s) = 13 \mu A$$

6.35 Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge

Folgende Beiträge werden in das Messunsicherheitsbudget übernommen:

$$U(A_{\text{CAL}}) = 255 \mu A$$

$$U(\delta A_{\text{Verfahren}}) = 0,11 \mu V$$

$$U(\delta A_{\text{ind}}) = 0,5 \mu V$$

$$U(s) = 13 \mu A$$

6.36 Messunsicherheitsanalyse

Jede identifizierte Einflussgröße liefert einen Beitrag zum Messunsicherheitsbudget.

Der Einzelbeitrag jeder Einflussgröße ist mit seinem Sensitivitätskoeffizienten c_i zu multiplizieren. Der Unsicherheitsbeitrag ergibt sich somit aus:

$$u_i(y) = U_i \cdot c_i$$

Der Sensitivitätskoeffizient c_i beträgt bei allen Unsicherheitsbeiträgen $c = 1$, da zur Berechnung die Grenzwerte der Veränderung des Einflusses angenommen werden.

6.37 Unsicherheitsbeitrag des Normals $u(A_{\text{CAL}})$

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibrators ergibt sich aus dessen Kalibrierung und der Drift. Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i .

$$u(A_{\text{CAL}}) = U(A_{\text{CAL}}) \cdot b_i \cdot c(A_{\text{CAL}})$$

$$u(A_{\text{CAL}}) = 255 \mu A / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(A_{\text{CAL}}) = 148 \mu A$$

6.38 Unsicherheitsbeitrag des Verfahrens $u(\delta A_{\text{Verfahren}})$

Aus entsprechenden Untersuchungen der Messleitungen wurde folgender Wert ermittelt:

$$u(\delta A_{\text{Verfahren}}) = U(\delta A_{\text{Verfahren}}) \cdot b_i \cdot c(\delta A_{\text{Verfahren}})$$

$$u(\delta A_{\text{Verfahren}}) = 0,11 \mu A / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(\delta A_{\text{Verfahren}}) = 0,06 \mu A$$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung.

6.39 Unsicherheitsbeitrag für die endliche Auflösung des Kalibriergegenstandes $u(\delta A_{\text{ind}})$
Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i .

$$u(\delta A_{\text{ind}}) = u(\delta A_{\text{ind}}) \cdot b_i \cdot c(\delta A_{\text{ind}})$$

$$u(\delta A_{\text{ind}}) = 0,5 \mu A / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(\delta A_{\text{ind}}) = 0,29 \mu A$$

6.40 Unsicherheitsbeitrag des Kalibriergegenstandes $u(A_{ix})$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i

$$u(A_{ix}) = U(s) \cdot b_i \cdot c(l_s)$$

$$u(A_{ix}) = 13,2 \mu A \cdot 0,58 \cdot 1$$

$$u(A_{ix}) = 7,7 \mu A$$

6.41 Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge
Folgende Beiträge werden in das Messunsicherheitsbudget übernommen:

$$u(A_{\text{CAL}}) = 148 \mu A$$

$$u(\delta A_{\text{Verfahren}}) = 0,06 \mu A$$

$$u(\delta A_{\text{ind}}) = 0,29 \mu A$$

$$u(A_{ix}) = 7,7 \mu A$$

6.42 Erweiterte Messunsicherheit U

$$U = k \cdot u(E_x) = 273 \mu A$$

6.43 Einflussgrößen ACI

6.43.1 Einfluss des Normals

a) Unsicherheitsbeitrag des Normals

6.43.2 Einfluss des Verfahrens

b) Ungeeignete Messleitungen

c) Kabelkapazität

d) Kontaktwiderstand / Übergangswiderstand

e) Korrosion

f) Kabelbruch

6.43.3 Einfluss des Kalibriergegenstandes

g) Leckstrom

h) Genauigkeit / Auflösung / Präzision

6.44 Mathematisches Modell der Einflussgrößen

Mit den Einflussgrößen wird das mathematische Modell der Messunsicherheit aufgestellt.

$$u_{gesamt}(A) = \sqrt{u^2(A_{CAL}) + u^2(\delta A_{Verfahren}) + u^2(\delta A_{ind}) + u^2(A_{ix})}$$

6.45 Beitrag für das Normal $U(V_{CAL})$

Beispielrechnung für 300-mA@1kHz

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibrators wird aus dem gültigen Kalibrierschein entnommen.

Bereich: 33 - 329,99mA @ 1kHz

Kalibrierwert: 300mA@1kHz

$$U(A_{CAL1}) = 18 \mu A \quad \text{mit } k=2$$

$$U(A_{CAL1}) = 9 \mu A$$

Für die Drift des Kalibrators seit seiner letzten Kalibrierung werden die Angaben aus den Herstellerspezifikationen eingesetzt.

Ein Jahres Spezifikation, 99%Confidence Intervall

Absolute Uncertainty, $t_{cal} \pm 5^\circ C$

Bereich: 33-329,99mA@45Hz-1kHz / $\pm(0,04\% \text{ of output } +20\mu A)$

Bei 300 mA@1kHz ergibt sich hieraus:

$$U(A_{CAL2}) = 140 \mu A$$

$$U(A_{CAL}) = U(A_{CAL1}) + U(A_{CAL2})$$

$$U(A_{CAL}) = 9 \mu A + 140 \mu A$$

$$U(A_{CAL}) = 149 \mu A$$

6.46 Beiträge für das Verfahren $U(\delta A_{Verfahren})$

Kabelkapazität: Eine geringe Kabelkapazität wird durch verdrehte, ungeschirmte Kabelpaare erreicht (Pomona Model: 2BA), die für Messströme $< 2 A$ verwendet werden. Für Messströme $> 2A$ werden Messleitungen der Firma Fluke verwendet (High Current 30 A test lead).

Wartung und Pflege der Messkabel: Um Fehler durch Kontaktwiderstand / Übergangswiderstand, Korrosion oder Kabelbruch zu verhindern, werden die Kabel regelmäßig visuell und messtechnisch überprüft.

Zur Ermittlung des Messunsicherheitsbeitrags der verschiedenen Typen von Messleitungen wurden Messreihen durchgeführt um die Standardabweichung aus diesen Werten zu ermitteln.

Diese beinhalten eventuelle Leckströme durch Kapazitäten in der Messleitung.

Für den Bereich 330 mA AC wurde die Standardabweichung aus einer Messreihe von 15 Messwerten ermittelt.

$$U(\delta A_{Verfahren}) = 2 \mu A$$

6.47 Beitrag für den Kalibriergegenstand $U(\delta A_{ind})$

Die Auflösung des Multimeters beträgt im 1A AC Bereich $1\mu A$. Als Unsicherheitsbeitrag wird die Hälfte der Auflösung eingesetzt.

$$U(\delta A_{Verfahren}) = 0,5 \mu A$$

Die Standardunsicherheit durch eventuelle Schwankungen des Multimeters wird durch eine Messreihe von 20 Messwerten ermittelt.

$$U(s) = 4 \mu A$$

6.48 Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge

Folgende Beiträge werden in das Messunsicherheitsbudget übernommen:

$$U(A_{CAL}) = 149 \mu A$$

$$U(\delta A_{Verfahren}) = 2 \mu A$$

$$U(\delta A_{ind}) = 0,5 \mu A$$

$$U(s) = 4 \mu A$$

6.49 Messunsicherheitsanalyse

Jede identifizierte Einflussgröße liefert einen Beitrag zum Messunsicherheitsbudget. Der Einzelbeitrag jeder Einflussgröße ist mit seinem Sensitivitätskoeffizienten c_i zu multiplizieren. Der Unsicherheitsbeitrag ergibt sich somit aus:

$$u_i(y) = U_i \cdot c_i$$

Der Sensitivitätskoeffizient beträgt bei allen Unsicherheitsbeiträgen $c = 1$, da zur Berechnung die Grenzwerte der Veränderung des Einflusses angenommen werden.

6.50 Unsicherheitsbeitrag des Normals $u(A_{CAL})$

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibrators ergibt sich aus dessen Kalibrierung und der Drift. Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i . Bei 1 A ergibt sich hieraus:

$$u(A_{CAL}) = U(A_{CAL}) \cdot b_i \cdot c(A_{CAL})$$

$$u(A_{CAL}) = 149 \mu A \cdot \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(A_{CAL}) = 86 \mu A$$

6.51 Unsicherheitsbeitrag des Verfahrens $u(\delta A_{Verfahren})$

Aus entsprechenden Untersuchungen der Messleitungen wurde folgender Wert ermittelt:

$$u(\delta A_{Verfahren}) = U(\delta A_{Verfahren}) \cdot b_i \cdot c(\delta A_{Verfahren})$$

$$u(\delta A_{Verfahren}) = 2 \mu A / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(\delta A_{Verfahren}) = 1 \mu A \quad \text{Angenommen wird eine Rechteckverteilung}$$

6.52 Unsicherheitsbeitrag für die endliche Auflösung des Kalibriergegenstandes $u(\delta A_{ind})$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i .

$$u(\delta A_{ind}) = U(\delta A_{ind}) \cdot b_i \cdot c(\delta A_{ind})$$

$$u(\delta A_{ind}) = 0,5 \mu A / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(\delta A_{ind}) = 0,29 \mu A$$

6.53 Unsicherheitsbeitrag des Kalibriergegenstandes $u(A_{ix})$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i

$$u(A_{ix}) = U(s) \cdot b_i \cdot c(l_s)$$

$$u(A_{ix}) = 4 \mu A \cdot 0,58 \cdot 1$$

$$u(A_{ix}) = 2,3 \mu A$$

6.54 Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge

Folgende Beiträge werden in das Messunsicherheitsbudget übernommen:

$$u(A_{CAL}) = 86 \mu A$$

$$u(\delta V_{Verfahren}) = 1 \mu A$$

$$u(\delta V_{ind}) = 0,29 \mu A$$

$$u(A_{ix}) = 2,3 \mu A$$

6.55 Erweiterte Messunsicherheit U

$$U = k \cdot u(Ex) = 159 \mu A$$

6.56 Einflussgrößen DCR

6.56.1 Einfluss des Normals

a) Unsicherheitsbeitrag des Normals

6.56.2 Einfluss des Verfahrens

b) Ungeeignete Messleitungen

c) Kontaktwiderstand / Übergangswiderstand

d) Korrosion

e) Kabelbruch

6.56.3 Einfluss des Kalibriergegenstandes

f) Leckstrom

g) Genauigkeit / Auflösung / Präzision

6.57 Mathematisches Modell der Einflussgrößen

Mit den Einflussgrößen wird das mathematische Modell der Messunsicherheit aufgestellt.

$$u_{gesamt}(\Omega) = \sqrt{u^2(\Omega_{CAL}) + u^2(\delta\Omega_{Verfahren}) + u^2(\delta\Omega_{ind}) + u^2(\Omega_{ix})}$$

6.58 Beitrag für das Normal $U(\Omega_{CAL})$

Beispielrechnung für 10-Ω 4-Wire

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibrators wird aus dem gültigen Kalibrierschein entnommen.

Bereich: 0-10,9999 Ω

Kalibrierwert: 10 Ω

$$U(\Omega_{CAL1}) = 100 \mu\Omega \quad \text{mit } k=2$$

$$U(\Omega_{CAL1}) = 50 \mu\Omega$$

Für die Drift des Kalibrators seit seiner letzten Kalibrierung werden die Angaben aus den Herstellerspezifikationen eingesetzt.

Ein Jahres Spezifikation, 99%Confidence Interval

Absolute Uncertainty, $t_{cal} \pm 5^\circ C$

Bereich: 0-10,9999 Ω / $\pm(40\text{ppm of output} + 0,001 \Omega)$

Bei 10 Ω ergibt sich hieraus:

$$U(\Omega_{CAL2}) = 0,0014 \, \Omega$$

$$U(\Omega_{CAL}) = U(\Omega_{CAL1}) + U(\Omega_{CAL2})$$

$$U(\Omega_{CAL}) = 50 \, \mu\Omega + 0,0014 \, \Omega$$

$$U(\Omega_{CAL}) = 50,0014 \, \mu\Omega$$

6.59 Beiträge für das Verfahren $U(\delta\Omega_{Verfahren})$

Messkabel: Für Widerstandsmessungen werden geschirmte Messleitungen der Firma Pomona verwendet (Model: 1167). Bei vorhandenem Vierleiteranschluss am Kalibriergegenstand wird dieser bevorzugt verwendet. Die Schirmung wird auf Guard gelegt.

Wartung und Pflege der Messkabel: Um Fehler durch Kontaktwiderstand / Übergangswiderstand, Korrosion oder Kabelbruch zu verhindern, werden die Kabel regelmäßig visuell und messtechnisch überprüft.

Zur Ermittlung des Messunsicherheitsbeitrags der verschiedenen Typen von Messleitungen wurden Messreihen durchgeführt um die Standardabweichung aus diesen Werten zu ermitteln.

Diese beinhalten eventuelle externe Einflüsse. Für den Bereich 10 Ω wurde die Standardabweichung aus einer Messreihe von 15 Messwerten ermittelt.

$$U(\delta\Omega_{Verfahren}) = 25 \, \mu\Omega$$

6.60 Beitrag für den Kalibriergegenstand $U(\delta\Omega_{ind})$

Die Auflösung des Multimeters beträgt im 100 Ohm Bereich 100 $\mu\Omega$. Als Unsicherheitsbeitrag wird die Hälfte der Auflösung eingesetzt.

$$U(\delta\Omega_{ind}) = 50 \, \mu\Omega$$

Die Standardunsicherheit durch eventuelle Schwankungen des Multimeters wird durch eine Messreihe von 20 Messwerten ermittelt.

$$U(s) = 462 \, \mu\Omega$$

6.61 Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge

Folgende Beiträge werden in das Messunsicherheitsbudget übernommen:

$$U(\Omega_{CAL}) = 50,0014 \, \mu\Omega$$

$$U(\delta\Omega_{Verfahren}) = 25 \, \mu\Omega$$

$$U(\delta\Omega_{ind}) = 50 \, \mu\Omega$$

$$U(s) = 462 \, \mu\Omega$$

6.62 Messunsicherheitsanalyse

Jede identifizierte Einflussgröße liefert einen Beitrag zum Messunsicherheitsbudget. Der Einzelbeitrag jeder Einflussgröße ist mit seinem Sensitivitätskoeffizienten c_i zu multiplizieren. Der Sensitivitätskoeffizient beträgt bei allen Unsicherheitsbeiträgen $c = 1$ da zur Berechnung die Grenzwerte der Veränderung des Einflusses angenommen werden.

Der Unsicherheitsbeitrag ergibt sich somit aus:

$$u_i(y) = U_i \cdot c_i$$

6.63 Unsicherheitsbeitrag des Normals $u(\Omega_{CAL})$

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibrators ergibt sich aus dessen Kalibrierung und der Drift. Angenommen wird eine Rechteckverteilung. Bei 1 A ergibt sich hieraus:

$$u(\Omega_{CAL}) = U(\Omega_{CAL}) \cdot b_i \cdot c(\Omega_{CAL})$$

$$u(\Omega_{CAL}) = 50,0014 \mu\Omega / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(\Omega_{CAL}) = 29 \mu\Omega$$

6.64 Unsicherheitsbeitrag des Verfahrens $u(\delta\Omega_{Verfahren})$

Aus entsprechenden Untersuchungen der Messleitungen wurde folgender Wert ermittelt:

$$u(\delta\Omega_{Verfahren}) = U(\delta\Omega_{Verfahren}) \cdot b_i \cdot c(\delta\Omega_{Verfahren})$$

$$u(\delta\Omega_{Verfahren}) = 25 \mu\Omega / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(\delta\Omega_{Verfahren}) = 14,5 \mu\Omega$$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung.

6.65 Unsicherheitsbeitrag für die endliche Auflösung des Kalibriergegenstandes $u(\delta\Omega_{ind})$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i .

$$u(\delta\Omega_{ind}) = U(\delta\Omega_{ind}) \cdot b_i \cdot c(\delta\Omega_{ind})$$

$$u(\delta\Omega_{ind}) = 50 \mu\Omega / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(\delta\Omega_{ind}) = 29 \mu\Omega$$

6.66 Unsicherheitsbeitrag des Kalibriergegenstandes $u(\Omega_{ix})$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i

$$u(\Omega_{ix}) = U(s) \cdot b_i \cdot c(\Omega_{ix})$$

$$u(\Omega_{ix}) = 462 \mu\Omega \cdot 0,58 \cdot 1$$

$$u(\Omega_{ix}) = 261 \mu\Omega$$

6.67 Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge

Folgende Beiträge werden in das Messunsicherheitsbudget übernommen:

$$u(\Omega_{CAL}) = 29 \mu\Omega$$

$$u(\delta\Omega_{Verfahren}) = 14,5 \mu\Omega$$

$$u(\delta\Omega_{ind}) = 29 \mu\Omega$$

$$u(\Omega_{ix}) = 261 \mu\Omega$$

6.68 Erweiterte Messunsicherheit

$$U = k \cdot u(E_x) = 498 \mu\Omega$$

6.69 Einflussgrößen HZ

6.69.1 Einfluss des Normals

a) Unsicherheitsbeitrag des Normals

6.69.2 Einfluss des Verfahrens

- b) Ungeeignete Messleitungen
- c) Temperatureinflüsse / Thermospannungen bei kleinen DC-Spannungen
- d) Kontaktwiderstand / Übergangswiderstand
- e) Korrosion
- f) Kabelbruch

6.69.3 Einfluss des Kalibriergegenstandes

- g) Leckstrom
- h) Genauigkeit / Auflösung / Präzision

6.70 Mathematisches Modell der Einflussgrößen

Mit den Einflussgrößen wird das mathematische Modell der Messunsicherheit aufgestellt.

$$u_{gesamt}(f) = \sqrt{u^2(f_{CAL}) + u^2(\delta f_{Verfahren}) + u^2(\delta f_{ind}) + u^2(f_{ix})}$$

6.71 Beitrag für das Normal $U(f_{CAL1})$ **Beispielrechnung für 1000Hz**

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibrators wird aus dem gültigen Kalibrierschein entnommen.

Kalibrierwert: 1000Hz

$$U(f_{CAL1}) = 0,001 \text{ mHz} \quad \text{mit } k=2$$

$$U(f_{CAL1}) = 0,005 \text{ Hz}$$

Für die Drift des Kalibrators seit seiner letzten Kalibrierung werden die Angaben aus den Herstellerspezifikationen eingesetzt.

Ein Jahres Spezifikation, 99%Confidence Interval

Absolute Uncertainly, $t_{cal} \pm 5^\circ\text{C}$

Bereich: 0,01Hz to 2MHz / $\pm(0,00025\% \text{ of output } +0,000005\text{Hz})$

Bei 1000 Hz ergibt sich hieraus:

$$U(f_{CAL2}) = 2,5 \text{ mHz}$$

$$U(f_{CAL}) = U(f_{CAL1}) + U(f_{CAL2})$$

$$U(f_{CAL}) = 0,005 \text{ mHz} + 2,5 \text{ mHz}$$

$$U(f_{CAL}) = 2,505 \text{ mHz}$$

6.72 Beiträge für das Verfahren $U(\delta f_{Verfahren})$

Kabel: Als Messleitung dient ein abgeschirmtes Spezialkabel (Typ RG58 C/U) der Firma Fluke das mit dem Kalibrator 5520A ausgeliefert wurde. Ein Messunsicherheitsbeitrag durch das Kabel ist nicht zu erwarten.

$$U(\delta f_{Verfahren}) = 0 \text{ mHz}$$

6.73 Beitrag für den Kalibriergegenstand $U(\delta A_{ind})$

Beitrag durch die Auflösung des Kalibriergegenstandes:

Der Messbereich des Multimeters wird bei einem Kalibrierwert von 1000 Hz auf 40-300kHz eingestellt. Dadurch ergibt sich eine Auflösung von 0,1 mHz. Als Unsicherheitsbeitrag wird die Hälfte der Auflösung eingesetzt.

$$U(\delta f_{ind}) = 0,05 \text{ mHz}$$

Beitrag durch die Unsicherheit der Anzeige des Kalibriergegenstandes:

$$U(f_{ix}) = 0,79 \text{ mHz}$$

6.74 Zusammenfassung der Unsicherheitsbeiträge

Folgende Beiträge werden in das Messunsicherheitsbudget übernommen:

$$U(f_{CAL}) = 2,505 \text{ mHz}$$

$$U(\delta t_{\text{Verfahren}}) = 0 \text{ mHz}$$

$$U(\delta f_{ind}) = 0,05 \text{ mHz}$$

$$U(f_{ix}) = 0,79 \text{ mHz}$$

6.75 Messunsicherheitsanalyse

Jede identifizierte Einflussgröße liefert einen Beitrag zum Messunsicherheitsbudget. Der Einzelbeitrag jeder Einflussgröße ist mit seinem Sensitivitätskoeffizienten c_i zu multiplizieren. Der Unsicherheitsbeitrag ergibt sich somit aus:

$$u_i(y) = U_i \cdot c_i$$

Der Sensitivitätskoeffizient beträgt bei allen Unsicherheitsbeiträgen $c = 1$, da zur Berechnung die Grenzwerte der Veränderung des Einflusses angenommen werden.

6.76 Unsicherheitsbeitrag des Normals $U(f_{CAL})$

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibrators ergibt sich aus dessen Kalibrierung und der Drift. Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i .

Bei 1000 Hz ergibt sich hieraus:

$$u(f_{CAL}) = U(f_{CAL}) \cdot b_i \cdot c(f_{CAL})$$

$$u(f_{CAL}) = 2,505 \text{ mHz} / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(f_{CAL}) = 1,45 \text{ mHz}$$

6.77 Unsicherheitsbeitrag des Verfahrens $u(\delta f_{\text{Verfahren}})$

Ein Messunsicherheitsbeitrag durch das Kabel ist nicht zu erwarten.

6.78 Unsicherheitsbeitrag für die endliche Auflösung des Kalibriergegenstandes $u(\delta f_{ind})$

Angenommen wird eine Rechteckverteilung b_i .

$$u(\delta f_{ind}) = U(\delta f_{ind}) \cdot b_i \cdot c(\delta f_{ind})$$

$$u(\delta f_{ind}) = 0,05 \text{ mHz} / \sqrt{3} \cdot 1$$

$$u(\delta f_{ind}) = 0,029 \text{ mHz}$$

6.79 Unsicherheitsbeitrag durch die Anzeige des Kalibriergegenstandes $u(f_{ix})$

$$u(f_{ix}) = U(s) \cdot b_i \cdot c(f_{ix})$$

$$u(f_{ix}) = 0,79 \text{ mHz} \cdot 0,58 \cdot 1$$

$$u(f_{ix}) = 0,46 \text{ mHz}$$

6.80 Erweiterte Messunsicherheit U

$$U = k \cdot u(Ex) = 3 \text{ mHz}$$

Die Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen sind in Formsheets **FSB70111_DMM.xlsx** - Abschätzung der Messunsicherheit Labor FME - abgelegt.

7 **Bezugsdokumente**

7.1 Mitgeltende Unterlagen

VDI/VDE/DGQ/DKD-Richtlinie 2622, Blatt 3

DKD-3-E2 - Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen

FS B-7-0111

7.2 Normen

- DIN EN ISO 9001**

**Ausgabe lt. aktuellem IMS-Handbuch