

XX Hochspannungskalibrierung

XX.1 Kalibrierverfahren

XX.1.1 Direktmessverfahren mit kalibriertem HV-Teiler

Die Kalibrierung von Hochspannungen bis zu 60 kV (DC) bzw. 30 kV (AC) kann durch Messung an einem Hochspannungsmesssystem (bestehend aus Teiler und Anzeigegerät) realisiert werden. Dazu sollte zur Validierung das Teilverhältnis des Teilers an 1000 V Gleichspannung bzw. Wechselspannung an einem Multifunktionskalibrator (z.B. Fluke 57xxA) verifiziert werden, um danach auf Basis der bekannten oder kalibrierten Kennlinie die unbekannte Spannungsquelle zu messen. Die Kalibrierung erfolgt immer an der zum Hochspannungsteiler zugehörigen Anzeige (z.B. Multimeter) mit konstanter bzw. bekannter Eingangsimpedanz wie z. B. 10 M Ω . Zu beachten ist, dass dann immer so gemessen wird, wie das System auch charakterisiert wurde, z.B. dass im festen Messbereich (Range 50 V) gemessen wird, damit eine etwaige Bereichumschaltung bei höheren Spannungen keine zusätzlichen Korrekturen aufgrund bereichsübergreifender Nichtlinearitäten erfordert.

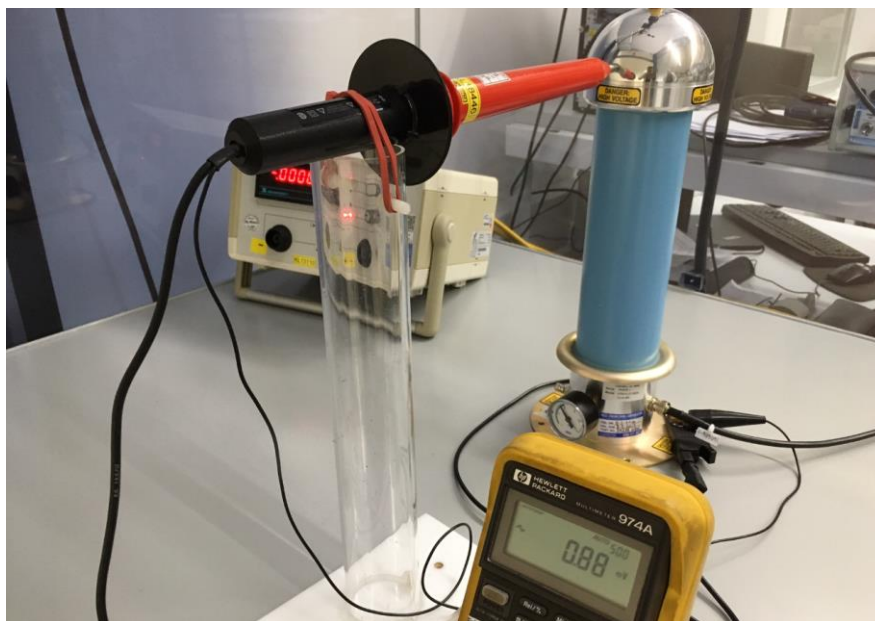


Bild XX.1 Kalibrieraufbau für Hochspannungsmessgeräte in der HV-Zelle

Zur Verbesserung der Messgenauigkeit werden die Anzeigewerte nach der Messung über die bekannte Nichtlinearität des Teilers und ein Polynom höherer Ordnung korrigiert (siehe Kapitel XIV.1 – Kennlinienkorrektion).

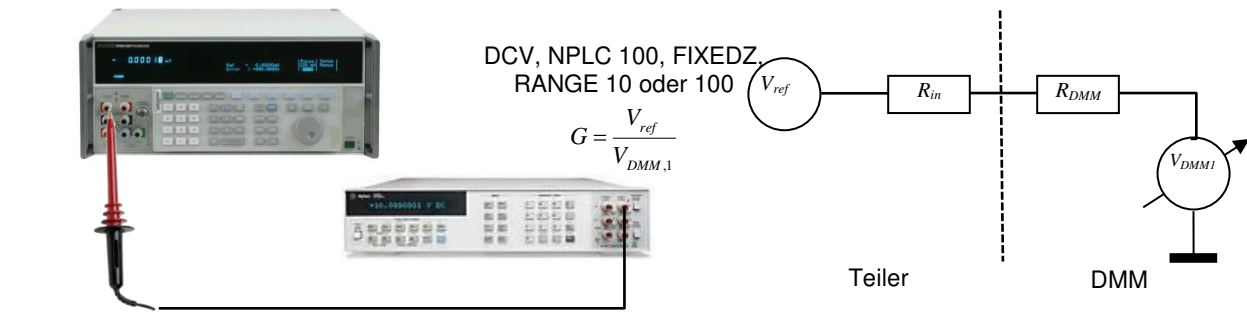
Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.7	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XX Hochspannungskalibrierung	1

Sicherheitsrichtlinien, s.a. Arbeitsanweisung AA0025:

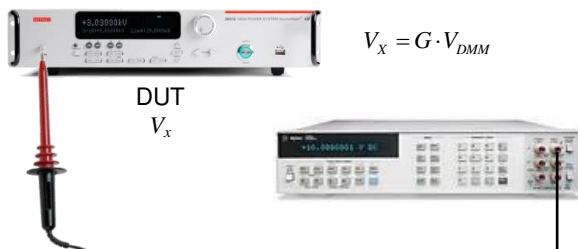
- Bei der Kalibrierung von Hochspannungsgeräten **muss** sich **immer** eine zweite Person im Raum befinden.
- Die zweite Person muss informiert sein, zu welchem Zeitpunkt mit den Arbeiten bei laufender Hochspannung begonnen wird (Sichtkontakt)
- Die zweite Person muss in die Sicherheitsvorkehrungen eingewiesen sein:
 - Wo sind die NOT-AUS - Schalter?
 - Welcher Netzstecker ist zu ziehen?
 - Wie und wo kann das Gerät ausgeschaltet werden?
 - Wo befindet sich das nächste Telefon für eventuellen NOTRUF?
- Unter Spannung stehende Personen **nicht** berühren!
- Messspitzen sind mit dem Messpunkt fest zu verbinden.
- Verboten: Lose Verbindungen (Gefahr der Funkenbildung und Überschlag)
- Personen, die an der Kalibrierung nicht beteiligt sind, sind vom Arbeitsplatz fernzuhalten.
- **Nach der Kalibrierung** sind eventuell geladene Teile mit dem vorhandenen **Erdungsstab** zu entladen

XX.1.2 Direktmessverfahren mit eingemessenem HV-Teiler

Kleinere Messunsicherheiten für die Messungen von Gleichspannungen sind mit einem eingemessenem HV-Teiler am hochauflösenden Anzeigergerät möglich. Beispielsweise kann das Digitalmultimeter Hewlett Packard 3458A hierfür über die Funktion FIXEDZ fest mit 10 MΩ Eingangswiderstand betrieben werden. Das genaue Teilverhältnis wird vor der eigentlichen Kalibrierung des Messobjekts an einer stabilen 1000 V-Quelle (z.B. Fluke 57xxA) bestimmt. Im zweiten Schritt kann mit diesem Teilverhältnis jede gesuchte Spannung bis 40 kV gemessen werden. Dies setzt voraus, dass die Linearität des eingesetzten Teilers mit all Ihren darin enthaltenen Effekten (Temperatur, Leckströme, etc...) bekannt sind oder separat abgeschätzt wurden.



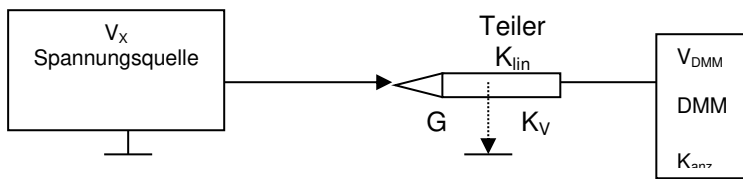
Bestimmung des Teilverhältnisses an 1000 V-Quelle



Bestimmung der Ausgangsspannung des Kalibriergegenstandes

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.7	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XX Hochspannungskalibrierung	2

XX.2 Messunsicherheitsbilanz



Modellgleichung:

Mit dem Teilerverhältnis $G = \frac{V_{ref}}{V_{DMM,1}}$ ergibt sich die Spannung der unbekanntenen Quelle zu

$$V_X = G \cdot V_{DMM} \cdot K_{Lin} \cdot K_V \cdot K_{Anz} \cdot K_{Kal} \cdot K_{Stab} \cdot K_{Temp} \cdot K_{Drift}$$

mit

V_X Gesuchte Ausgangsspannung der Quelle

V_{DMM} Angezeigte (geteilte) Spannung am angeschlossenen Multimeter

G Teilungsfaktor, berechenbar aus dem Kalibrierschein, dem Einmessen gegen 1000 V oder durch Kennliniengerade oder -polynom interpoliert

K_{Lin} Anteil durch Interpolationsabweichung bzw. Linearitätsabweichung. Üblicherweise wird die maximale Abweichung von den korrigierten zu den erwarteten Werten laut Kalibrierschein. Erfolgt keine Kennlinienkorrektur kann hilfsweise die (Hersteller-)Spezifikation als maximale Anzeigeabweichung verwendet werden.

K_V Verfahrensbedingter Korrekturfaktor z. B. durch , kapazitivem Einfluss der Wandabstände und instabilen Entladungen im Hochspannungsbereich. Sofern die kapazitiven Kopplungen gegen Messerde klein genug gehalten werden können (Wandabstand mindestens 1x Teilerhöhe) kann dieser Einfluss im Netzfrequenzbereich vernachlässigt werden.

K_{Temp} Korrekturfaktor durch die thermische Erwärmung, die den Teilerfaktor beeinflussen kann. Typischerweise ist dieser Anteil bereits in der Kalibrierunsicherheit enthalten, sofern die Zeitspanne der Hochspannungsbelastung im Kalibrierschein erkenntlich ist.

K_{Stab} Verfahrensbedingter Korrekturfaktor durch die Stabilität der Quelle. Die Instabilität der Quelle mit dessen „Anzeigerauschen“ am Teiler und Messobjekt kann durch ausreichende Mittelwertbildung „kompensiert“ werden. Sie ist daher als empirische Standardunsicherheit des Mittelwerts (Mehrfachmesswert) im Einzelfall zu berücksichtigen.

K_{Anz} Korrekturfaktor bedingt durch die Rundung der Auflösung am Multimeter (Ablesbarkeit $\pm 0,5$ Digits)

K_{Kal} Korrektur aufgrund der Kalibrierung. Entnehmbar aus dem Kalibrierschein bzw. aus der Unsicherheitsbilanz der 1000 V-Quelle, die zum Einmessen verwendet wird (XX.1.2).

K_{Drift} Korrektur aufgrund der Drift seit der letzten Kalibrierung (entfällt, wenn der Teiler vor dem Gebrauch eingemessen wird)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.7	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XX Hochspannungskalibrierung	3

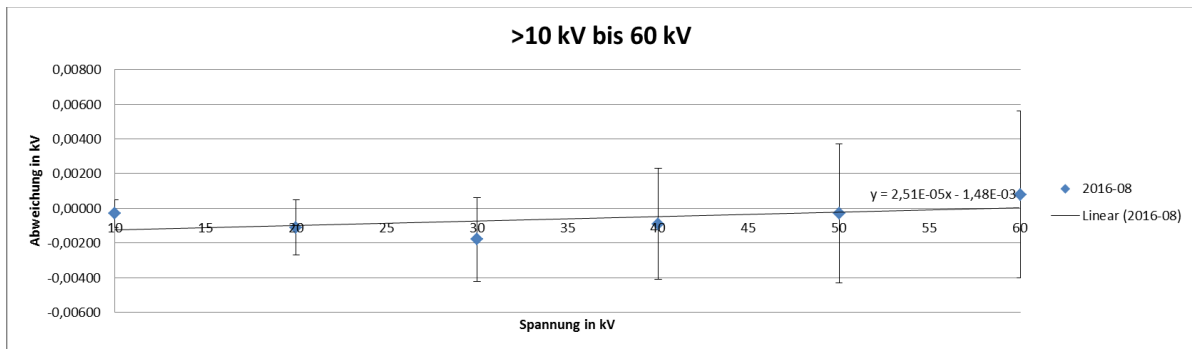


Bild XX.3 Linearität des Bezugsnormals bei linearer Kennlinienkorrektur

Die beigeordnete **relative** erweiterte Messunsicherheit (k=2) bestimmt sich zu:

$$W = 2 \cdot w = 2 \cdot \sqrt{w_{DMM}^2 + w_{Lin}^2 + w_V^2 + w_{Stab}^2 + w_{Temp}^2 + w_{Kal}^2 + w_{Anz}^2}$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe x_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $w(x_i)$	Sensitivität koeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)$
G	g					
V_{DMM}	v		Normal, Typ-A	$w(V_{DMM}) = \frac{s / \sqrt{n}}{V_{DMM}}$	1	w_{DMM}
K_{Lin}	1	a_{lin}	Normal od. Rechteck	$w(G) = a_{Lin} / \sqrt{3}$ ¹	1	w_{Lin}
K_V	1	a_V	Rechteck	$w(K_V) = a_V / \sqrt{3}$	1	w_V
K_{Stab}	1	a_{Stab}	Rechteck	$w(K_{Stab}) = a_{Stab} / \sqrt{3}$	1	w_{Stab}
K_{Temp}	1	a_{Temp}	Rechteck	$w(K_{Temp}) = a_{Temp} / \sqrt{3}$	1	w_{Temp}
K_{Anz}	1	a_{Anz}	Rechteck	$w(K_{Anz}) = a_{Anz} / \sqrt{3}$	1	w_{Anz}
K_{Kal}	1	a_{Kal}	Normal	$w(K_{Kal}) = a_{Kal} / 2$	1	w_{Kal}
K_{Drift}	1	a_{Drift}	Rechteck	$w(K_{Drift}) = a_{Drift} / \sqrt{3}$	1	w_{Drift}
V_X	$g \cdot v$			$w(V_X) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(y)}$		$w(V_X)$
V_X	rel. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(V_X) = 2 \cdot w(V_X)$		$W(V_X)$

XX.3 Wechselfspannung

Es können das Modell und die Einflussgrößen aus XX.2 verwendet werden.

XX.4 Hochspannungsmessgeräte (Direkt anzeigende Messgeräte und Messsysteme)

Für die Kalibrierung von Spannungsmessgeräten kann bei Verwendung einer konstanten HV-Quelle und gleichzeitiger Verwendung eines eingemessenen oder kalibrierten HV-Teilers (parallel zum

¹ bei Verwendung des mittleren Betrags der Linearitätsabweichung entfällt der Teiler Wurzel(3)

Messobjekt) die Messunsicherheitsbilanz aus XX.2 angewendet werden. Dabei wird angenommen, dass die Spannungsquelle hinreichend stabil ist und keinen weiteren signifikanten Einfluss auf die Messunsicherheit hat, bzw. deren Unsicherheitsbeitrag im Anwendungsfall durch die empirische Standardunsicherheit des Mittelwerts (Mehrfachmesswert) berücksichtigt werden kann. Das Budget muss dann lediglich um einen Anteil der Auflösepräzision (Ablesbarkeit) K_{ind} des Kalibriergegenstandes erweitert werden. Für die gemessene Spannung an einem direkt ablesbaren Messgerät ergibt sich also

$$w^2(V_{X,Anz}) = w^2(V_X) + \left(\frac{a_{Anz,X}}{V_{Anz,X} \cdot \sqrt{3}} \right)^2 \text{ und } W(V_{X,Anz}) = 2w(V_{X,Anz})$$

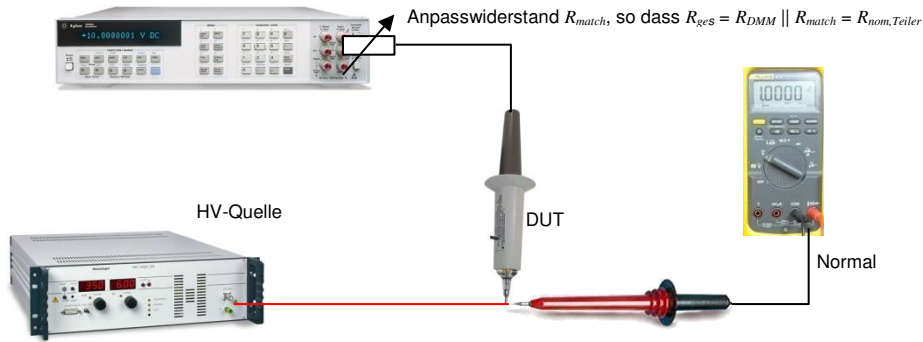
mit $a_{Anz,X} = 0,5$ Digit der Auflösung der Anzeige. Da dieser Anteil vom jeweiligen Messobjekt abhängt bleiben die kleinsten angebbaren Messunsicherheiten gegenüber der Kalibrierung von Spannungsquellen zunächst unverändert.

Sofern kein Referenzteiler parallel zur Quelle verwendet wird ist stattdessen die Unsicherheit und Korrektur der direkten Anzeige der Quelle zu berücksichtigen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.7	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XX Hochspannungskalibrierung	5

XX.5 Bestimmung des Maßstabsfaktors von Hochspannungsteilern

Ähnlich wie im o.g. Verfahren ist es möglich den Maßstabsfaktor (Teilerfaktor) einer einzelnen Komponente eines Hochspannungsmesssystem zu kalibrieren. Dazu kann es erforderlich sein, den Eingangswiderstand des dazu verwendeten Messgerätes an den Teiler anzupassen. Dies erfolgt beispielsweise durch Parallelschaltung eines variablen Widerstandes an den Eingang des Digitalmultimeters, so dass dieser gesamte Parallelwiderstand dem nominellen Widerstand entspricht, für den der Teiler konzipiert ist. Die Angabe dieses Wertes im Kalibrierschein ist in jedem Fall erforderlich.



Die Modellgleichung für den Maßstabsfaktor F_i erweitert sich dann zu

$$F_i = \frac{V_x}{V_{DMM} \cdot F_{nom}} \cdot K_{DMM} \cdot K_{match}$$

K_{DMM} Einfluss der Sekundärspannungsmessung am Digitalmultimeter. Bei Verwendung eines Referenzmultimeters wie Hewlett 3458A kann von relativen Unsicherheiten der Spannungsmessung bei ausreichender Aussteuerung kleiner $15 \cdot 10^{-6}$ für DC bzw. 0,03 % für AC ausgegangen werden.

K_{match} Die Anpassung erfolgt durch Messung des Gesamtwiderstandes am DMM-Eingang der Parallelschaltung aus DMM-Innenwiderstand und Teiler. Die relative Unsicherheit der 2-Draht-Widerstandes ist am o.g. DMM-Typ beispielsweise besser als $35 \cdot 10^{-6}$ möglich.

Ausgabe: DMS.7	erstellt von: PF am: s.DMS	geprüft/genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XX Hochspannungskalibrierung	Seite 6
--------------------------	---	---	--	-------------------

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivität skoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	a		$w(x_i)$	$ c_i $	$w_i(y)$
V_{DMM}	V_{DUT}					
V_x	v_x	a_{V_x}	Normal, $k=2^2$	$\frac{W(V_x)}{2}$	1	w_{V_x}
K_{DMM}	1	a_{DMM}	Normal, $k=2$	$\frac{W(V_{DMM})}{2}$	1	w_{DMM}
K_{match}	1	a_{match}	Normal, $k=2$	$\frac{W(R)}{2}$	1	w_{match}
F_i	$\frac{v_x}{v_{DMM} \cdot F_{nom}}$			$w(F_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(y)}$		$w(F_i)$
	rel. erweiterte Messunsicherheit ($k=2$)			$W(F_i) = 2 \cdot w(F_i)$		$W(F_i)$

Der Einfluss der Anpassung und der Sekundärspannungsmessung ist im Regelfall so klein, dass das Gesamtergebnis unverändert bleibt.

² siehe XX.2

XX.6 Ergebnisse

Die zu Grunde liegenden Zahlenwerte und Ergebnisse der Berechnungen für die einzelnen Bereiche sind der mitgeltenden Excel-Tabelle

<http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XX-Hochspannung.xlsx>

zu entnehmen, die Ergebnisse der kleinsten angebbaren Messunsicherheit werden im Leistungsnachweis aufgeführt.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.7	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XX Hochspannungskalibrierung	8



© esz AG, 2018

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

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.7	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XX Hochspannungskalibrierung	9