

XI Kalibrieren von LC-Messbrücken und Messgeräten

XI.1 Kalibrieren von Kapazitätsmessgeräten mit Standardkapazitäten

X.1.1 Messaufbau

Für die Kalibrierung stehen unter anderem folgende Normale (Bild XI.2) von General Radio zur Verfügung:

Nennwert	Typ	Seriennummer	Prüfmittelnummer
1 pF	1403-K	151	KL30219/000238
10 pF	1404-C	882	KL30220/000239
100 pF	1404-B	500	KL30070/000902
1 nF	1404-A	2994	KL30037/000901
10 nF	1409-L	6806	KL30035/000904
100 nF	1409-T	8432	KL30036/000903
1 µF	1409-Y	5620	KL30038/000271

Die Modelle 1404 besitzen Koaxialsteckbuchsen, zwischen deren Innenleitern die Normalkapazität liegt (Bild XI.1). Zum Anschluss werden –sofern mitgeliefert- die Leitungen der Messbrücke verwendet, deren Außenleiter möglichst nahe an den Anschlussklemmen gemeinsam geerdet werden. Weitere Angaben aus dem Kalibrierschein der Normale (Kalibrierwerte, Testpegel etc.) und herstellerspezifische Geräteangaben werden befolgt. Alle relevanten Details zum Messaufbau (Anschluss, Pegel, Frequenz, „OPEN/ ZERO“-Korrektur) werden im Kalibrierschein vermerkt.

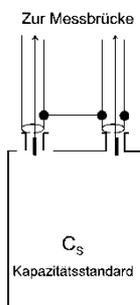


Bild XI.1a Anschluss 1404



Bild XI.1b 2-poliger Messadapter (OPEN)



Bild XI.1c Anschluss GR1409

Die Kapazitäten 1409 werden zwischen den Anschlussklemmen H und L üblicherweise dreipolig am Kalibriergegenstand gemessen, wobei die Gehäuseklemme G mit einem geerdeten Punkt der Messschaltung verbunden sein muss. Dazu dienen speziell angefertigte Messadapter mit koaxialen, gemeinsam geschirmten Buchsen, die unter die Steckanschlüsse der Standards geklemmt werden können (s. Bild XI.1b und XI.1c). Gleichbleibende Übergangswiderstände werden durch Anziehen der Schraubklemmen mit 3/8 Zoll- bzw. Eigenbau-Vielzahn­nüssen bei einem Drehmoment von 0,4 Nm erreicht.

In jedem Fall sind die Angaben der Kalibrierscheine der Normale mit den Testfrequenzen 100 Hz, 1 kHz und 10 kHz bei entsprechendem Pegel zu beachten. Falls die Messbrücke ohne Messleitungen geliefert wird, erfolgt der Anschluss, um Streukapazitäten so gering wie möglich zu halten, mittels geschirmter Laborleitungen (BNC-Leitung und Messadapter). Im Zweifelsfall sind die Anweisungen der Gerätespezifikation zu befolgen.



Bild XI.2 General Radio 1409 Standardkapazität

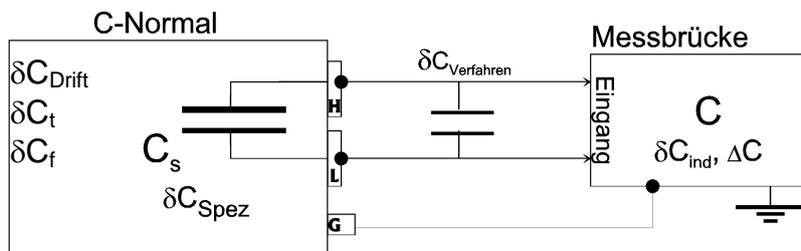
Wenn möglich werden Offsetfehler des Kalibriergegenstandes durch eine Null-Messung mit offenen Anschlüssen und mit Kurzschlussbrücke über den Enden des Messadapters (Anschlussebene) korrigiert. Dazu sind ggf. die Herstellerangaben des Kalibriergegenstandes zu beachten, bzw. die Laborleitungen vom Normal abzuziehen. Die Nullmessung ist auf einer isolierten Unterlage durchzuführen. Die Korrektur erfolgt mit dem Messadapter und offenen Eingangsklemmen (wie Bild XI.1b).

Der Referenzwert (Kalibrierwert) ist dem Kalibrierschein der Kapazitätsnormale bei den entsprechenden Frequenzen zu entnehmen.

Weitere Vorgaben zur Kalibrierung von Messgeräten enthält die mitgeltende Arbeitsanweisung AA0104: <http://dmsserver/technik/Arbeitsanweisungen/AA0104-Kalibrierumfang-LCR-Meter.docx>

XI.1.2 Messunsicherheitsbilanz

Skizze des Messaufbaus:



Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

C_s ermittelter Wert der Standardkapazität (Kalibrierwert) zum Zeitpunkt der letzten Kalibrierung bzw. zeitlich extrapoliertes Wert zum Verwendungszeitpunkt. Die tatsächliche Abweichung des Kalibrierwertes des Normals vom richtigen Wert wird zu Null mit den aus dem Kalibrierschein entnehmbaren Unsicherheitsintervallen angenommen (normalverteilt mit $k=2$, s. Angabe im Kalibrierschein)

C Gemessener Kapazitätswert am Kalibriergegenstand
Es wird empfohlen Ergebnisse der Kapazitätsmessung über eine Stichprobenlänge $n > 5$ zu reproduzieren und zu mitteln. Die Standardunsicherheit wird geometrisch zu den Unsicherheitsbeträgen addiert (Typ A Unsicherheiten).

Gesuchte Größe:

ΔC Abweichung der Anzeige des Kalibriergegenstandes vom Kalibrierwert

Einflussgrößen:

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.42	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XI Kalibrieren von LC-Messbrücken und Messgeräten	2

δC_{Drift}

Der genaue Wert (richtige Wert) des Normals zum Verwendungszeitpunkt ist nicht bekannt. Die Abweichung vom richtigen Wert kann durch eine Trendanalyse der vergangenen Kalibrierungen geschätzt werden. Typischerweise ergeben sich Jahresdriften unter $10 \mu\text{F}/\text{F}$ (Genrad 1404) bzw. $15 \mu\text{F}/\text{F}$ (Genrad 1409) im analysierten Zeitraum. Erfolgt keine Trendkorrektur (d. h. das Normal wird mit dem letzten ermittelten Wert eingesetzt), wird die maximale oder durchschnittlich ermittelte Drift („Steigung“ des Trends) im Kalibrierintervall als Grenze eines rechteckverteilten bzw. normalverteilten Unsicherheitsintervalls verwendet.

Wird eine Trendkorrektur (Ermittlung des wahrscheinlichen Wertes zum Verwendungszeitpunkt) durchgeführt erfolgt die Unsicherheitsabschätzung durch Betrachtung der maximalen oder mittleren „Streuung“ der bekannten Werte um die Trendfunktion.

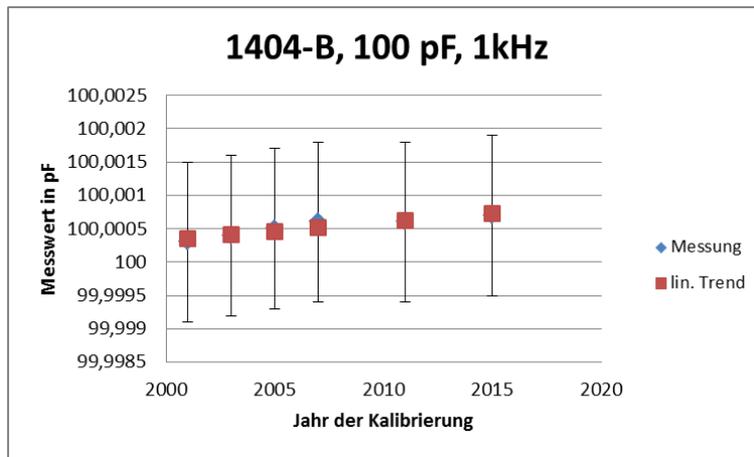


Bild XI.1.2.1 typischer Trend der Kalibriernormale für Kapazität, General Radio 1404 (inkl. Unsicherheitsbalken, $k=2$, der ext. Kalibrierung)

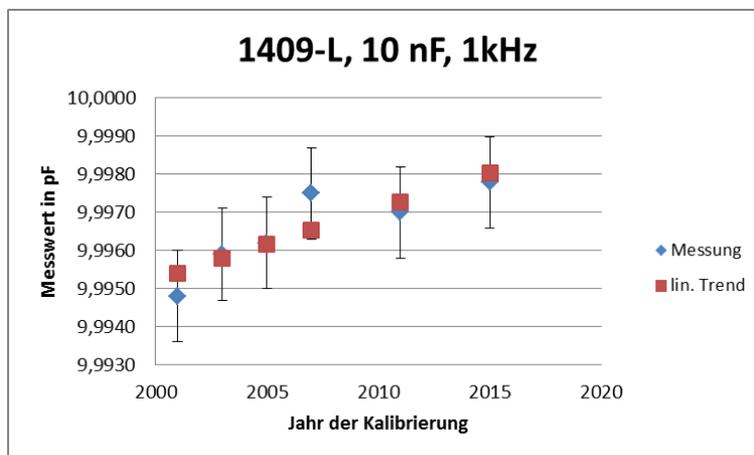


Bild XI.1.2.2 typischer Trend der Kalibriernormale für Kapazität, General Radio 1409 (inkl. Unsicherheitsbalken, $k=2$, der ext. Kalibrierung)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.42	von: PF am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XI Kalibrieren von LC-Messbrücken und Messgeräten	3

- δC_t Temperaturabhängigkeit der Kapazität. Der Einfluss ist für Verwendungstemperaturen von $23\text{ °C} \pm 1\text{ K}$ üblicherweise bereits in der Kalibrierunsicherheit enthalten. Bei Einsatz der Normale in abweichenden Temperaturfenstern wird der zusätzliche Einfluss (ppm/K) den Herstellerangaben entnommen und als rechteckverteiltes Unsicherheitsintervall angenommen.
- $\delta C_{\text{Verfahren}}$ Verfahrensbedingte Einflüsse der Anschlüsse des Messaufbaus beispielsweise Leitungslängen, thermoelektrische oder parasitäre Effekte der Messleitungen, Eingangsimpedanzen/-reaktanzen der Messanordnung, Offsetabweichung etc.. Zum größten Teil hängen diese Unsicherheiten vom Kalibriergegenstand und der verwendeten Messleitung ab. Die Grenzen der Rechteckverteilung können erst im Einzelfall zusätzlich abgeschätzt werden (Typ A Unsicherheiten oder Abschätzung von zusätzlichen Kapazitätsbelegen der Messleitung, Art der Anschlussebene etc.). Daher kann diese Abweichung erst im konkreten Fall miteinbezogen werden. Für die Berechnung der kleinsten angebbaren Unsicherheit werden Ergebnisse aus Testmessungen an einer typischen Messbrücke Hewlett Packard 4284A nach durchgeführter Offset-Korrektur (OPEN-Messung) verwendet. Die Werte werden als Unsicherheitsintervall mit Rechteckverteilung für einen möglichen Verfahrensfehler bei optimaler Reproduzierbarkeit der Messwerte angenommen.
- δC_{ind} Rundungsabweichung aufgrund der Auflösung des Messobjektes (Digitabweichung bzw. Ziffernsprung; abhängig vom Kalibriergegenstand). Für die kleinste angebbare Messunsicherheit muss dieser Term nicht berücksichtigt werden, da von einem idealen Fall ausgegangen wird und dieser Anteil bereits im Einfluss $\delta C_{\text{Verfahren}}$ enthalten ist.
- δC_f Werden die Normale an anderen als durch die Kalibrierung charakterisierten Frequenz-Stützstellen verwendet ergibt sich ein Werteintervall als Differenz dieser Werte (Frequenzgang). Je nach „Abstand“ zur nächst liegenden kalibrierten Frequenz kann dieses Intervall als Rechteckverteilung oder Dreieckverteilung gewichtet werden.

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich aus

$$C - \Delta C + \delta C_{\text{Ind}} = C_S + \delta C_{\text{Drift}} + \delta C_t + \delta C_{\text{Verfahren}} + \delta C_f$$

die für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit maßgebliche Modellgleichung mit $\delta C_{\text{ind}=0}$

$$\Delta C = C - C_S - \delta C_{\text{Drift}} - \delta C_t - \delta C_{\text{Verfahren}} - \delta C_f$$

$$\left| \frac{\partial(\Delta C)}{\partial C_i} \right| = c_i = 1$$

Messunsicherheitsbilanz:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta C) = u^2(c) + c_{\text{Drift}}^2 u^2(\delta C_{\text{Drift}}) + c_{\text{cal}}^2 u^2(C_{\text{Cal}}) + c_t^2 u^2(\delta C_t) + c_{\text{Verfahren}}^2 u^2(\delta C_{\text{Verfahren}}) + c_f^2 u^2(\delta C_f)$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.42	von: PF am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XI Kalibrieren von LC-Messbrücken und Messgeräten	4

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	$u(x_i)$		$ c_i $	$u_i(y)$
C_s	c_s	$U(C_{cal})/2$	Normal	1	$u(c_{cal})$
C	\bar{c}	$U(C)$	Normal A		$u(c)$
δC_{Drift}	0	$\Delta(\delta C_{Drift})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta c_{Drift})$
δC_t	0	$\Delta(\delta C_t)/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta c_t)$
$\delta C_{Verfahren}$	0	$\Delta(\delta C_{Verfahren})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta c_{Verfahren})$
δC_f	0	$\Delta(\delta C_f)/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta c_f)$
ΔC	$\bar{c} - c_s$				$u(\Delta c)$

Gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 ergibt sich aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis ΔC beizuordnende relative erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$W_{rel}(\Delta C) = 2 \frac{u(\Delta c)}{c_s} \quad (\text{bezogen auf den Kalibrierwert})$$

Die Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen sind der Tabelle

- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XI.1-Kalibrieren-von-Kapazitaetsnormalen-und-Kapazitaetsmessgeraeten.xls>

zu entnehmen, die Ergebnisse sind im Leistungsnachweis aufgeführt.

XI.2 Kalibrieren von Kapazitätsmessgeräten mit selbst eingemessenen Normalen

XI.2.1 Messaufbau

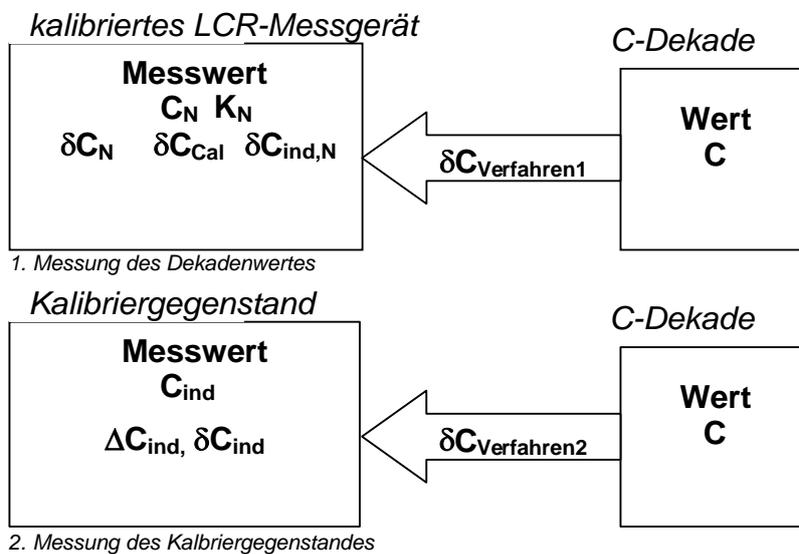
Zusammen mit einer hochauflösenden Messbrücke wie Hewlett Packard 4284A und schaltbaren variablen Kapazitäten (C-Dekaden) oder Gebrauchsnormalen können im rückgeführten Bereich mit eingemessenen Normalen als TransfERNormal Kalibrierungen von Kapazitätsmessgeräten durchgeführt werden.

Zur Kalibrierung an Zwischenwerten (abweichende Werte von den kalibrierten Werten der GenRad Standardkapazitäten) wird in aufeinanderfolgenden Messungen

- ggf. zunächst die Abweichung des Messgerätes an min. zwei Stützpunkten im korrespondierenden C-Messbereich bestimmt (= Kalibrierung des LCR-Messgerätes),
- dann der Wert der Dekade bestimmt,
- ggf. der Messwert um den ermittelten Korrekturfaktor des Messgerätes korrigiert und
- dieses Ergebnis als Kalibrierwert für den Kalibriergegenstand herangezogen.

Messaufbau und -verfahren zur Direktmessung der Kapazität entsprechen den in Kapitel XII.1.1 beschriebenen Details. Offset-Korrekturmessungen werden auf der Anschlussebene des verwendeten TransfERNormal durchgeführt. Bei Anschluss des Kalibriergegenstandes ist zur Minimierung der Messunsicherheit auf identischen Messaufbau und -anschluss wie beim „Einmessen“ (Systemkorrektur Open/Short) zu achten (z. B. 3-poliger Anschluss).

XI.2.2 Messunsicherheitsbilanz



Abgelesene Größen:

- C_{ind} Gemessener (abgelesener) Wert am Kalibriergegenstand bei Messung des TransfERNormalen
- C_N Gemessener Wert am Normal (kalibrierte LCR-Messgerät) bei Messung des TransfERNormalen = Kalibrierwert für den Kalibriergegenstand
- K_N Bekannter Korrekturfaktor (aus der Kalibrierung des LCR-Messgerätes). Üblicherweise gilt $K_N=1$ bei Verzicht auf Messwertkorrektur und Verwendung der Herstellerspezifikationen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.42	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XI Kalibrieren von LC-Messbrücken und Messgeräten	6

Empfehlenswert ist es, dass Ergebnisse über eine Stichprobenlänge $n > 5$ reproduziert und gemittelt werden. Die Standardunsicherheit wird dann geometrisch zu den Unsicherheitsbeträgen addiert (Typ-A Unsicherheiten).

Gesuchte Größe:

ΔC_{ind} Abweichung des abgelesenen Wertes am Kalibriergegenstand vom Kalibrierwert der Kapazität

Einflussgrößen

$\delta C_N,$
 $\delta C_{ind,N}$ Die genaue Abweichung des Messwertes vom richtigen Wert an der Messbrücke ist üblicherweise nur an den kalibrierten Punkten im ganzen Messbereich bekannt. Bei Betrieb im variablen Messbereich kann aus der Kalibrierung ggf. ein Korrekturfaktor errechnet werden, dessen „Qualität“ durch mindestens einen weiteren Stützpunkt im selben Messbereich validiert werden muss. Die Abweichung korrigierter Werte wird dann zu Null und rechteckverteilt im Intervall zwischen errechnetem Korrekturwert und dem abgelesenen Messwert am Kontrollpunkt angenommen. Erfolgt keine Messwertkorrektur wird das Werteintervall aus den Herstellerangaben und den dort entnehmbaren maximalen Abweichungen des Messbereichs geschätzt. Der Ziffernsprung des Normals $\delta C_{ind,N}$ aufgrund der begrenzten Auflösung der Messbrücke. (im „worst case“ $\pm 0,5$ Digits der Anzeige) ist dann bereits in den Herstellerspezifikationen enthalten. Üblicherweise liefert er allerdings nur einen vernachlässigbaren Anteil an der Gesamtunsicherheit.

δC_{Cal} Unsicherheit der Kontrollpunkte bei Überprüfung des Korrekturfaktors bzw. Überprüfung der Einhaltung der Herstellerspezifikation. Der Unsicherheitsbeitrag ergibt sich als Normalverteilung aus der Bilanz des Direktmessverfahrens aus Abschnitt XI.1.2 (bzw. Werte und k -Faktor aus dem Kalibrierschein).

$\delta C_{Verfahren1}$ siehe Abs. XI.1.2

$\delta C_{Verfahren2}$ Die Beiträge sind typischerweise klein genug, dass sie vernachlässigt werden können, zudem sind sie teils stark korreliert und heben sich sogar auf. Sie werden jedoch der Vollständigkeit halber in der Modellgleichung berücksichtigt. Ein Teil ist bereits in der empirischen Standardunsicherheit des Mittelwertes der Wiederholungsmessungen enthalten (Typ-A).

δC_{ind} Die Rundungsabweichung δC_{ind} aufgrund der begrenzten Auflösung des Kalibriergegenstandes. (im „worst case“ $\pm 0,5$ Digits der Anzeige)

Modellgleichung:

$$C = K_N C_N + \delta C_N + \delta C_{Cal} \left[+ \delta C_{Verfahren1} \right]$$

$$C_{ind} - \Delta C_{ind} = C + \delta C_{ind} \left[+ \delta C_{Verfahren2} \right]$$

$$\Delta C_{ind} = C_{ind} - K_N C_N - \delta C_N - \delta C_{Cal} - \delta C_{ind} - \left[\delta C_{Verfahren2} + \delta C_{Verfahren1} \right]$$

$$\left| \frac{\partial(\Delta C)}{\partial C_i} \right| = c_i = 1$$

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta C_{ind}) = u^2(c_{ind}) + u^2(\delta C_N) + u^2(\delta C_{Cal}) + u^2(\delta C_{Verfahren1}) + u^2(\delta C_{Verfahren2}) + u^2(\delta C_{ind})$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.42	von: PF am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XI Kalibrieren von LC-Messbrücken und Messgeräten	7

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Standard- messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitäts- koeffizient c _i	Unsicherheits- beitrag u _i (y)
X _i	x _i	u(x _i)			
ΔC	$\overline{c_{ind} - c_N}$	$\frac{s(\Delta C)}{\sqrt{n}}$	Normal A	1	u(c _{ind})
K _N	1				
δC _{Cal}	0	U(δC _{Cal})/k	Normal	1	u(δC _{Cal})
δC _N	0	Δ(δC _N)/√3	Rechteck	1	u(δC _N)
δC _{Verfahren1}	0	Δ(δC _{Verfahren1})/√3	Rechteck	1	u(δC _{Verfahren1})
δC _{Verfahren2}	0	Δ(δC _{Verfahren2})/√3	Rechteck	1	u(δC _{Verfahren2})
δC _{ind}	0	Δ(δC _{ind})/√3	Rechteck	1	u(δC _{ind})
ΔC					u(ΔC)

Gemäß DKD-3:2002 Abschnitt4 ergibt sich aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis C beizuordnende relative erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$W_{rel}(\Delta C) = 2 \frac{u(\Delta C)}{C_N} \quad (\text{bezogen auf den Kalibrierwert})$$

Die Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen sind den Tabellen

- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XI.2-XII-HP4284A-L-C-Z-Direktmessung-und-Messung-mit-eingemessenen-Normalen.xls>
- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XI.2-Kalibrieren-von-Kapazitaetsmessgeraeten-mit-eingemessenen-Normalen-an-Zwischenwerten.xls>

zu entnehmen.

XI.2.3 Wechselstromwiderstand

Neben der Bestimmung der Abweichung im Kapazitäts- und Induktivitätsbereich wird die Anzeige von LCR-Messgeräten in der Regel ebenfalls im Wechselstromwiderstandsbereich kalibriert. Der Betrag der komplexen Impedanz Z der dazu verwendeten Kalibrierwiderstände (z. B. Burster 1240) kann über die Zusammenhänge aus einer bekannten Wechselstromstärke I (wie der Ausgangsstromstärke eines Kalibrators) und einer bekannten Wechselspannung U (bspw. gemessen an einem Digitalmultimeter) bestimmt werden.

$$|Z| = \frac{U}{I}$$

Die Kenntnis der Phasenlage bei der Betragsbestimmung ist dabei nicht erforderlich.

Alternativ wird der Wechselstromwiderstand (Betrag der Impedanz) an einem kalibrierten LCR-Messgerät bestimmt. Zur Verifikation können in überlappenden Bereichen die Messwerte der beiden Methoden verglichen werden.



Bild XI.2.3.1 Messmethoden der AC-Widerstandskalibrierung

Die Verifikation liefert dazu für kleine (induktive) Lasten am Kalibrator und kleine Impedanzabweichungen zwischen Quelle und Multimeter sehr gute Übereinstimmungen der Messergebnisse (Frequenzgangabweichung).

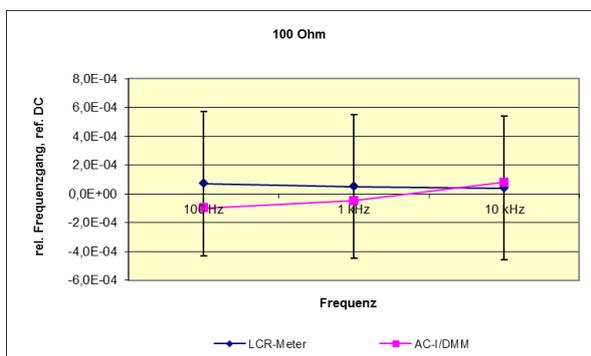


Bild XI.2.3.2a Wechselstromwiderstand 100 Ω Verifikation

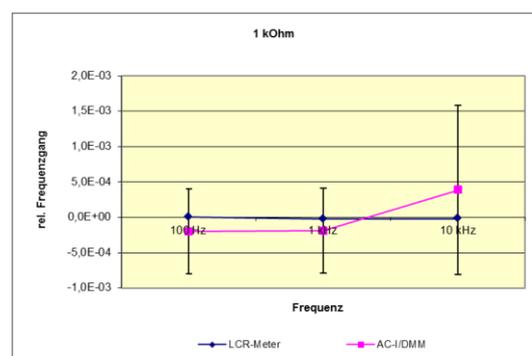


Bild XI.2.3.2b Wechselstromwiderstand 1 kΩ Verifikation

Modellgleichung:

Die Modellgleichung für die Kalibrierung von Wechselstromwiderstand¹ ≤100 Ω formuliert sich zu

$$R_{Anz} - \Delta R = R_{AC} \cdot K_U K_I K_{Drift} K_{Rin}$$

bzw. bei Messung an einem LCR Messgerät mit

$$K_R = (K_U K_I K_{Rin})$$

$$R_{Anz} - \Delta R = R_{AC} \cdot K_R K_{Drift}$$

mit

R_{Anz} Abgelesener Widerstandswert am Kalibriergegenstand

ΔR Abweichung des am Kalibriergegenstand abgelesenen Wertes vom Kalibrierwert

R_{AC} Ermittelter Wechselstromwert des eingesetzten Normalwiderstandes (Kalibrierwert). Der frequenzabhängige Widerstand wird i.d.R. durch Messung des Impedanzbetrages an der einer Messbrücke wie Hewlett Packard 4284A oder durch indirekte Messung an einer Wechselstromquelle (wie Fluke 5700A) und einem Präzisionsmultimeter (wie Hewlett Packard 3458A) bestimmt.

K_U Korrektionsfaktor aufgrund der Wechselspannungsmessung bei Bestimmung des AC-Wertes Dieser Faktor wird zu eins mit der Unsicherheit aus dem Verfahren der Wechselspannungsmessung angenommen.

K_I Korrektionsfaktor aufgrund der Wechselstromerzeugung bei Bestimmung des AC-Wertes an bei der Verifikation. Dieser Faktor wird zu eins mit der Unsicherheit aus dem Verfahren der Wechselstromerzeugung angenommen.

K_{Drift} Korrektionsfaktor aufgrund der Drift des Widerstandswertes seit der Kalibrierung. Wird der Widerstand unmittelbar vor der Verwendung an der Messbrücke „eingemessen“ kann der Unsicherheitsbetrag entfallen, ansonsten wird muss aus den Auswertungen der Historie oder (Hersteller-)Spezifikation eine maximale (Rechteckverteilung) oder typische (Normalverteilung) Drift ermittelt werden. Üblicherweise genügt die Betrachtung der DC-Werte bei Bestimmung der Drift, da anzunehmen ist, dass der Frequenzgang mit deren Veränderung korreliert ist.

K_{Rin} Korrektion aufgrund der systematischen Abweichung durch verschiedene Quell und Eingangsimpedanz am Multimeter, z.B. 1 MΩ mit der Halbbreite

$$a_{Rin} = 1 - \left(\frac{(1 \text{ M}\Omega \parallel 140 \text{ pF})}{(1 \text{ M}\Omega \parallel 140 \text{ pF}) + R_{Last}} \right)$$

K_R Bei Verwendung eines kalibrierten LCR-Messgerätes kann dessen (Hersteller-)Spezifikation als Intervall für den Beitrag der Unsicherheit der Bestimmung des Normalwiderstandes verwendet werden. Dabei wird üblicherweise angenommen, dass eine Kalibrierung in der komplexen Impedanzebene bezogen auf die Messgrößen „Kapazität“ und „Induktivität“ und damit der Nachweis der Spezifikationen an korrespondierenden Stützpunkten des Impedanzbetrages ausreicht um die Anwendbarkeit der Herstellerspezifikation bei Impedanzmessungen beliebiger Phasenlagen zu garantieren.

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

$$W_{UI} = 2 \cdot w_{ui} = 2 \cdot \sqrt{w_U^2 + w_I^2 + w_{Drift}^2 + w_{Rin}^2} \text{ bzw.}$$

¹ sowohl anwendbar für die Bestimmung der Unsicherheit bei der Kalibrierung von Widerständen als auch von Messgeräten

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.42	von: PF am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XI Kalibrieren von LC-Messbrücken und Messgeräten	10

$$W_{LCR-Meter} = 2 \cdot w_{LCR-Meter} = 2 \cdot \sqrt{w_R^2 + w_{Drift}^2}$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivität skoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
x_i	x_i	a		$w(x_i)$	$ c_i $	$w_i(y)$
R_{Anz}	r_{anz}					
R_{AC}	r_{AC}					
K_U	1	a_u	Normal	$w(K_u) = a_u / 2$	1	w_u
K_i	1	a_i	Normal	$w(K_i) = a_i / 2$	1	w_i
K_{Drift}	1	a_{Drift}	Rechteck	$w(K_{Drift}) = a_{Drift} / \sqrt{3}$	1	w_{Drift}
K_{Rin}	1	a_{Rin}	u-verteilt	$w(K_{Rin}) = a_{Rin} / \sqrt{2}$	1	w_{Rin}
ΔR	rel. Standardunsicherheit			$w(\Delta R) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(y)}$		$w(\Delta R)$
ΔR	rel. Erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(\Delta R) = 2 \cdot w(\Delta R)$		$W(\Delta R)$

bzw.

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivität skoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
x_i	x_i	a		$w(x_i)$	$ c_i $	$w_i(y)$
R_{Anz}	r_{anz}					
R_{AC}	r_{AC}					
K_R	1	a_R	Rechteck	$w(K_R) = a_R / \sqrt{3}$	1	w_R
K_{Drift}	1	a_{Drift}	Rechteck	$w(K_{Drift}) = a_{Drift} / \sqrt{3}$	1	w_{Drift}
ΔR	rel. Standardunsicherheit			$w(\Delta R) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(y)}$		$w(\Delta R)$
ΔR	rel. Erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(\Delta R) = 2 \cdot w(\Delta R)$		$W(\Delta R)$

Die Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen sind der mitgeltenden Excel-Tabelle

- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XI-Kalibrieren-von-Wechselstromwiderstand.xlsx>

zu entnehmen, die Ergebnisse werden im Leistungsnachweis aufgeführt.

Es lässt sich zeigen, dass das Ergebnis bei „guter“ Spannungsmessung wesentlich von der Unsicherheit der Kalibrierstromstärke abhängig ist. Bei Betrachtung der relativen erweiterten Messunsicherheiten W_I der Kalibrierstromstärke und relativen Unsicherheit W_U der gemessenen Spannung am Widerstand gilt außerdem

$$U_R = \sqrt{W_I^2 + W_U^2} \cdot R$$

XI.3 Kalibrieren von Induktivitätsmessgeräten mit Standardinduktivitäten

XI.3.1 Messaufbau

Für die Kalibrierung stehen unter anderem folgende Normale (Bild XI.3a) bspw. von General Radio zur Verfügung:

Nennwert	Typ	Seriennummer	Prüfmittelnummer
100 μ H	1482-B	9370	KL30069/000907
1 mH	1482-E	19605	KL30032/000911
10 mH	1482-H	19512	KL30048/000910
100 mH	1482-L	5866	KL30068/000909
1 H	1482-P	19647	KL30047/000912

Die Modelle besitzen drei Buchsen, zwischen HIGH und LOW liegt die Standardinduktivität (Bild XI.3b) während die dritte mit dem Gehäuse verbunden ist. Bei den zweipoligen Messungen ist die Klemme LOW mit der zugehörigen Lasche der Gehäuseklemme zu verbinden. Angaben aus dem Kalibrierschein der Normale (Sollwerte, Teststromstärke, Frequenz) und herstellerspezifische Geräteangaben werden befolgt. Alle relevanten Details zum Messaufbau (Testkabel, Messstromstärke, -Frequenz) werden im Kalibrierschein vermerkt. Zum Anschluss diene speziell angefertigte Messadapter (s. XI.1) der unter die HIGH/ LOW Buchsen geklemmt und koaxial belegt werden kann. Eine Kurzschlussmessung zur Offsetkorrektur von Leitungslängen ist durch Messung mit einer Kurzschlussbrücke über dem Messadapter oder durch umlegen der LOW-Lasche am Normal möglich. Gleichbleibende Übergangswiderstände werden durch Anziehen der Schraubklemmen mit 3/8 Zoll- bzw. Eigenbau-Vielzahnنüssen bei einem Drehmoment von 0,4 Nm erreicht.



Bild XI.3a Genrad Induktivitätsstandard

Das 100 μ H Normal besitzt insgesamt 6 Anschlussbuchsen. Die zu messende Brücke ist dabei mit den oberen Anschlussbuchsen entsprechend HIGH und LOW zu verbinden. Die OFFSET Korrektur und Nullmessung erfolgt durch Umlegen der unteren Lasche von L auf L_0 , wodurch die Zuleitungsinduktivität bestimmt werden kann und von der gemessenen Induktivität in Laschenstellung L abgezogen wird (Bild XI.3c).

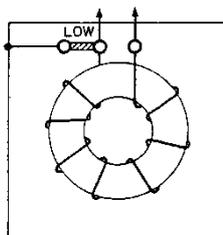


Bild XI.3b 3-poliges Induktivitäts-Standard

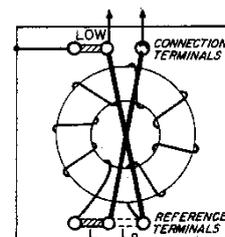


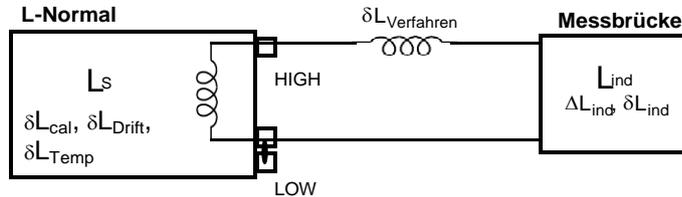
Bild XI.3c GR1482-E

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.42	von: PF am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XI Kalibrieren von LC-Messbrücken und Messgeräten	12

Weitere Vorgaben zur Kalibrierung von Messgeräten enthält die mitgeltende Arbeitsanweisung AA0104: <http://dmsserver/technik/Arbeitsanweisungen/AA0104-Kalibrierumfang-LCR-Meter.docx>

XI.3.2 Messunsicherheitsbilanz

Skizze des Messaufbaus:



Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

L_s ermittelter Wert der Standardinduktivität (Kalibrierwert) zum Zeitpunkt der letzten Kalibrierung bzw. zeitlich extrapoliertes Wert zum Verwendungszeitpunkt. Die tatsächliche Abweichung des Kalibrierwertes des Normal vom richtigen Wert wird zu Null mit den aus dem Kalibrierschein entnehmbaren Unsicherheitsintervallen angenommen (normalverteilt mit $k=2$, s. Angabe im Kalibrierschein)

δL_{cal}

L_{ind} Gemessener Induktivitätswert am Kalibriergegenstand
Es ist zu empfehlen, dass Ergebnisse der Induktivitätssmessung am Kalibriergegenstand über eine Stichprobenlänge $n > 5$ reproduziert und gemittelt werden. Die Standardabweichung wird geometrisch zu den Unsicherheitsbeträgen addiert (Typ A Unsicherheiten).

Gesuchte Größe:

ΔL_{ind} Abweichung der Anzeige des Kalibriergegenstandes vom Kalibrierwert des Normal

Einflussgrößen:

δL_{Drift} Der genaue Wert (richtige Wert) des Normal zum Verwendungszeitpunkt ist nicht bekannt. Die Abweichung vom richtigen Wert kann aus den Rekalibrierungen durch eine Trendanalyse der vergangenen Kalibrierungen geschätzt werden. Typischerweise ergeben sich Jahresdriften unter $15 \mu\text{H}/\text{H}$. Erfolgt keine Trendkorrektur (d. h. das Normal wird mit dem letzten ermittelten Wert eingesetzt), wird die maximale oder durchschnittlich ermittelte Drift („Steigung“ des Trends) im Kalibrierintervall als Grenze eines rechteckverteilten bzw. normalverteilten Unsicherheitsintervalls verwendet.

Wird eine Trendkorrektur (Ermittlung des wahrscheinlichen Wertes zum Verwendungszeitpunkt) durchgeführt erfolgt die Unsicherheitsabschätzung durch Betrachtung der maximalen oder mittleren „Streuung“ der bekannten Werte um die Trendfunktion.

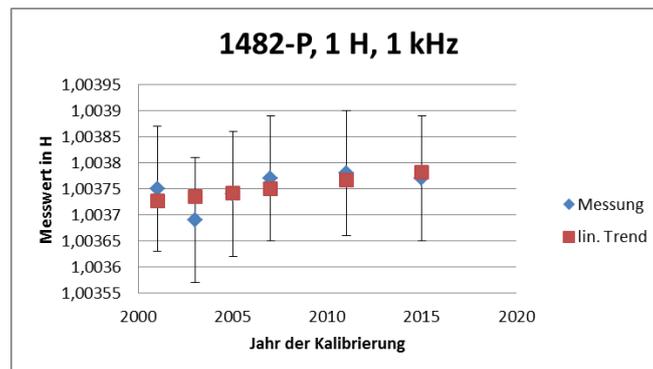


Bild XI.3d Typische Drift und Trend eines Induktivitätsnormal

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.42	von: PF am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XI Kalibrieren von LC-Messbrücken und Messgeräten	13

$\delta L_{\text{Verfahren}}$ Verfahrensbedingte Einflüsse der Anschlüsse des Messaufbaus beispielsweise Leitungslängen, thermoelektrische oder parasitäre Effekte der Messleitungen, Eingangsimpedanzen/-reaktanzen der Messanordnung, Offsetabweichung etc.. Zum größten Teil hängen diese Unsicherheiten vom Kalibriergegenstand und der verwendeten Messleitung ab. Die Grenzen der Rechteckverteilung können erst im Einzelfall zusätzlich abgeschätzt werden. Daher kann diese Abweichung erst dann miteinbezogen werden. Die kleinstmögliche Messunsicherheit bezieht sich somit im Wesentlichen auf die Bereitstellung der Kalibriergröße.

Für die Berechnung der kleinsten angebbaren Unsicherheit werden Ergebnisse aus Testmessungen an einer typischen Messbrücke Hewlett Packard 4284A nach durchgeführter Offset-Korrektur (SHORT-Messung) verwendet. Die Werte werden als Unsicherheitsintervall mit Rechteckverteilung für einen möglichen Verfahrensfehler bei optimaler Reproduzierbarkeit der Messwerte angenommen.

δL_{Temp} Temperaturabhängigkeit der Induktivität. Der Einfluss ist für Verwendungstemperaturen von $23\text{ °C} \pm 1\text{ K}$ üblicherweise bereits in der Kalibrierunsicherheit enthalten. Bei Einsatz der Normale in abweichenden Temperaturfenstern wird der zusätzliche Einfluss (ppm/ K) den Herstellerangaben entnommen und als rechteckverteiltes Unsicherheitsintervall angenommen.

δL_{ind} Rundungsabweichung 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.

δL_f Werden die Normale an anderen als durch die Kalibrierung charakterisierten Frequenz-Stützstellen verwendet ergibt sich ein maximales Werteintervall als Differenz dieser Werte (Frequenzgang). Je nach „Abstand“ zur nächst liegenden kalibrierten Frequenz kann dieses Intervall mit Rechteckverteilung oder Dreiecksverteilung gewichtet werden.

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich aus

$$L_{\text{ind}} - \Delta L_{\text{ind}} + \delta L_{\text{ind}} = L_S + \delta L_{\text{Drift}} + \delta L_{\text{Temp}} + \delta L_{\text{Verfahren}} + \delta L_f$$

die für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit maßgebliche Modellgleichung mit $\delta L_{\text{ind}}=0$

$$\Delta L_{\text{ind}} = L_{\text{ind}} - L_S - \delta L_{\text{Drift}} - \delta L_{\text{Verfahren}} - \delta L_{\text{Temp}} - \delta L_f$$

Messunsicherheitsbilanz:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta L_{\text{ind}}) = c_{\text{ind}}^2 u^2(L_{\text{ind}}) + c_{\text{cal}}^2 u^2(L_{\text{cal}}) + c_{\text{Drift}}^2 u^2(\delta L_{\text{Drift}}) + c_{\text{Verfahren}}^2 u^2(\delta L_{\text{Verfahren}}) + c_{\text{Temp}}^2 u^2(\delta L_{\text{Temp}}) + c_f^2 u^2(\delta L_f)$$

$$\left| \frac{\partial(\Delta L_{\text{ind}})}{\partial L_i} \right| = c_i = 1$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.42	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XI Kalibrieren von LC-Messbrücken und Messgeräten	14

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	$u(x_i)$		$ c_i $	$u_i(y)$
L_S	l_s	$U(L_{cal})/2$	Normal	1	$u(l_{cal})$
L_{ind}	\bar{l}_{ind}	$\frac{s(L_{ind})}{\sqrt{n}}$	Normal A	1	$u(l_{ind})$
δL_{Drift}	0	$\Delta(\delta L_{Drift})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta L_{Drift})$
δL_{Temp}	0	$\Delta(\delta L_{Temp})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta L_{Temp})$
δL_f	0	$\Delta(\delta L_f)/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta L_f)$
$\delta L_{Verfahren}$	0	$\Delta(\delta L_{Verfahren})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta L_{Verfahren})$
ΔL_{ind}	$\bar{l}_{ind} - l_s$				$u(\Delta L)_{ind}$

Gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 ergibt sich aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis ΔL_{ind} beizuordnende relative erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$W_{rel}(\Delta L_{ind}) = 2 \frac{u(\Delta L_{ind})}{l_s} \text{ (bezogen auf den Kalibrierwert)}$$

Die Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen sind der Tabelle

- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XI.3-Kalibrieren-von-Induktivitaetsnormalen-und-Induktivitaetsmessgeraeten.xls>

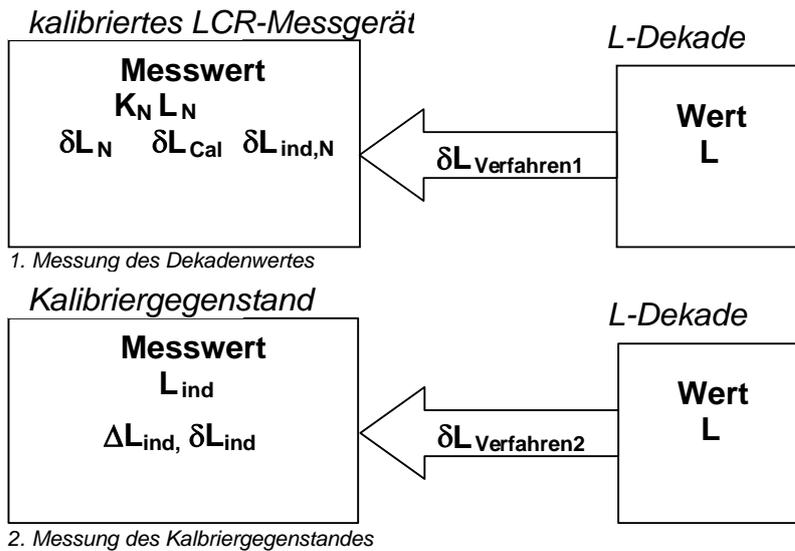
zu entnehmen, die Ergebnisse sind im Leistungsnachweis aufgeführt.

XI.4 Kalibrieren von Induktivitätsmessgeräten mit selbst eingemessenen Normalen

XI.4.1 Messaufbau

Methode und Verfahren entsprechen grundsätzlich der in [Abs. XI.2.1](#) genannten Vorgehensweise der Kapazitätsmessung. Als eingemessene Normale werden stattdessen L-Dekaden oder Transferinduktivitäten verwendet.

XI.4.2 Messunsicherheitsbilanz



Abgelesene Größen:

- L_{ind} Gemessener (abgelesener) Wert am Kalibriergegenstand bei Messung des Transfornormals
- L_N Gemessener Wert am Normal bei Messung des Transfornormals = Kalibrierwert für den Kalibriergegenstand
- K_N Bekannter Korrekturfaktor (aus der Kalibrierung des LCR-Messgerätes). Üblicherweise gilt $K_N=1$ bei Verzicht auf Messwertkorrektur und Verwendung der Herstellerspezifikationen.

Ergebnisse werden über eine Stichprobenlänge $n>5$ reproduziert und gemittelt. Die Standardunsicherheit wird ggf. geometrisch zu den Unsicherheitsbeträgen addiert (Typ A Unsicherheiten).

Gesuchte Größe:

- ΔL_{ind} Abweichung des abgelesenen Wertes am Kalibriergegenstand vom Kalibrierwert der Induktivität

Einflussgrößen

- δL_N vgl. Abschnitt [XI.2.2](#) - δC_N bzw. $\delta C_{ind,N}$
- $\delta L_{ind,N}$

- δL_{Cal} vgl. Abschnitt [XI.2.2](#) - δC_{Cal}

- $\delta L_{Verfahren1}$ vgl. [Abschnitt XI.3.2](#)

$\delta L_{Verfahren2}$

Die Beiträge sind typischerweise klein genug, dass sie vernachlässigt werden können, zudem sind sie teils stark korreliert und heben sich sogar auf. Sie werden jedoch der Vollständigkeit halber in der Modellgleichung berücksichtigt. Ein Teil ist bereits in der empirischen Standardunsicherheit des Mittelwertes der Wiederholungsmessungen enthalten (Typ-A)

- δL_{ind} vgl. Abschnitt [XI.2.2](#) - δC_{ind}

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.42	von: PF am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XI Kalibrieren von LC-Messbrücken und Messgeräten	16

Modellgleichung:

$$L = K_N L_N + \delta L_N + \delta L_{Cal} + \delta L_{Verfahren1}$$

$$L_{ind} - \Delta L_{ind} = L + \delta L_{ind} + \delta L_{Verfahren2}$$

$$\Delta L_{ind} = L_{ind} - L_{HP} - \delta L_{Spez} - \delta L_{Konf} - \delta L_{Verfahren1} - \delta L_{ind} - \delta L_{Verfahren2}$$

$$\left| \frac{\partial(\Delta L)}{\partial L_i} \right| = c_i = 1$$

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta L) = u^2(l_{ind}) + u^2(L_N) + u^2(\delta L_{Cal}) + u^2(\delta L_N) + u^2(\delta L_{Verfahren1}) + u^2(\delta L_{ind})$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standard- messunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitäts- koeffizient $ c_i $	Unsicherheits- beitrag $u_i(y)$
ΔL	$\overline{l_{ind} - l_N}$	$\frac{s(\Delta L)}{\sqrt{n}}$	Normal A		$u(l_{ind})$
K_N	1				
δL_{Cal}	0	$U(\delta L_{Cal}) / k$	Normal	1	$u(\delta L_{Cal})$
δL_N	0	$\Delta(\delta L_N) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta L_N)$
$\delta L_{Verfahren1}$	0	$\Delta(\delta L_{Verfahren1}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta L_{Verfahren1})$
$\delta L_{Verfahren2}$	0	$\Delta(\delta L_{Verfahren2}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta L_{Verfahren2})$
δL_{ind}	0	$\Delta(\delta L_{ind}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta L_{ind})$
ΔL					$u(\Delta L)$

Die Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen sind den Tabellen

- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XI.2-XII-HP4284A-L-C-Z-Direktmessung-und-Messung-mit-eingemessenen-Normalen.xls>
- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XI.4-Kalibrieren-von-Induktivitaetssmessgeraeten-an-Zwischenwerten.xls>

zu entnehmen.



© 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.42	von: PF am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XI Kalibrieren von LC- Messbrücken und Messgeräten	18