

# V Kalibrierung im Substitutionsverfahren

## V.1 Substitution an (hochauflösendem) Messgerät

Neben der direkten Messung kann eine Substitutionsmessung mit einem Normal (z. B. Quelle oder Kalibrator) und einem (Transfer-)Messgerät (z. B. Multimeter) durchgeführt werden. Dazu wird beispielsweise zunächst der Wert der vom Kalibriergegenstand abgegebenen Größe direkt gemessen. Dann wird das Multimeter am Normal angeschlossen und dieses so eingestellt, dass sich an der Anzeige des Messgeräts wieder der Wert der ersten Messung ergibt. Anschließend wird noch einmal der Kalibriergegenstand vermessen. Diese abwechselnden Messungen werden solange iterativ wiederholt, bis beide Werte im Rahmen der gewünschten Messunsicherheit übereinstimmen. Der wahre Wert der Messgröße entspricht dann dem Normal eingestellten Wert (Bild V.1).

### Beispiel:

Quelle (Normal) ist ein Gleichspannungskalibrator bei 1 V

Messobjekt ist ein Gleichspannungskalibrator, dessen Wert **ebenfalls bei 1 V** bestimmt werden soll.

Als Transferglied steht ein hochauflösendes, stabiles DMM zur Verfügung

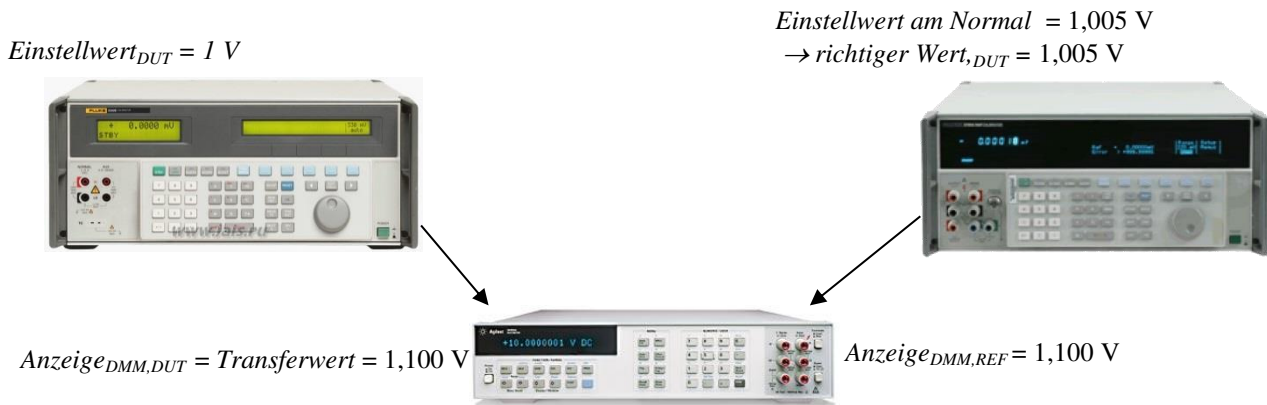


Bild V.1 Kalibrierung im Substitutionsverfahren mit stufenlos einstellbarem Normal

Ist das Normal nicht stufenlos einstellbar wird durch die Messung des Normals am (Transfer-)Messgerät im ersten Schritt die Abweichung des Transferglieds bestimmt. Im zweiten Schritt wird der Kalibriergegenstand angeschlossen und die Anzeige um die zuvor ausgemessene Abweichung des Transferglieds korrigiert. Die Vorgehensweise im Allgemeinen und die Behandlung der Korrekturwerte des Normals im Besonderen ist in Arbeitsanweisung AAA0292 (<http://dmsserver/technik/Arbeitsanweisungen/AA0292-Substitution-von-Kalibratoren-mit-Korrekturwerten.docx>) beschrieben.

Um die Messunsicherheiten möglichst niedrig zu halten gelten für Messverfahren und Anschlusstechnik dieselben Bedingungen, wie sie für eine Direktmessung (vgl. z. B. Kapitel III) nötig sind. Voraussetzung für die Anwendung einer Substitutionsmessung ist dabei immer ein stabiles Transfermessgerät hoher Auflösung und sehr guter Kurzzeitstabilität (die Kurzzeitwiederholbarkeit muss ein Vielfaches unter der angestrebten Messunsicherheit liegen).

Im Substitutionsverfahren können beispielsweise Spannungsstandards, Widerstände oder beliebige Quellen miteinander verglichen werden, sofern ein hochauflösendes Anzeigegerät zur Verfügung steht. Für den direkten Widerstandsvergleich an Fluke 742 empfiehlt sich die Kalibrierung nach Lindeck-Rothe im Konstantstromverfahren (siehe Kapitel VII) damit die Auflösung über den Spannungsabfall am Multimeter erhöht werden kann. Dies ist v.a. beim 1 Ohm Vergleich nötig um stabile und hochauflösende Messergebnisse zu erhalten.

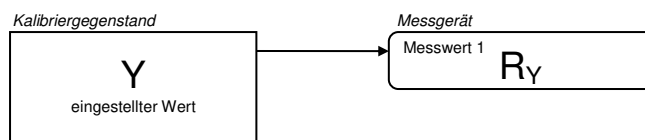
Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.18	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - V Kalibrierung im Substitutionsverfahren	1 von 5



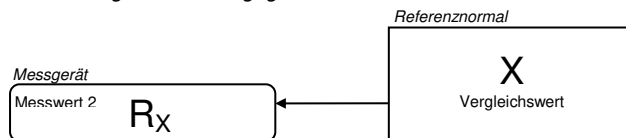
Beispiel aus der Temperaturmesstechnik ein Temperaturfühler zur Messung der Kontakttemperatur eines IR-Strahlers wird gegen ein hochgenaues IPRT eingemessen. Siehe auch <http://dmsserver/technik/Arbeitsanweisungen/AA0200-Beruehrungslose-Temperaturmessung-Kalibrierung-von-IR-Thermometern-Strahlern-Infrarotkalibratoren.docx>

## V.2 Messunsicherheitsbilanz

### Skizze des Messverfahrens:



1. Messung am Kalibriergegenstand



2. Vergleichsmessung am Normal

### Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

- $X$  eingestellter Vergleichswert am Normal
- $Y$  eingestellter Wert am Kalibriergegenstand
- $R_X$  abgelesener Wert am Messgerät bei Messung des Referenzwertes
- $R_Y$  abgelesener Wert am Messgerät bei Messung des unbekannten Wertes am Kalibriergegenstand

### Gesuchte Größe:

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

### Einflussgrößen:

- $\Delta X_K$  Abweichung des Normals vom abgelesenen Wert (entnehmbar aus dem Kalibrierschein des Normals)
- $\delta X$  Unsicherheit der Methode bei Direktmessung am Normal
- $\delta R_X$  Rundungsfehler aufgrund der Auflösung des verwendeten Anzeigerätes bei Messung des vom Normal gelieferten Referenzwertes. Ausschlaggebend ist die niederwertigste Stelle der Anzeige ( $\pm 0.5$  Digit).

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.18	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - V Kalibrierung im Substitutionsverfahren	2 von 5

$\delta R_Y$  Rundungsfehler aufgrund der Auflösung bzw. mögliche Reproduktion des verwendeten Anzeigeegerätes bei Messung des vom Kalibriergegenstandes eingestellten Wertes. Ausschlaggebend ist die niederwertigste Stelle der Anzeige ( $\pm 1$  Digit).  
Bei Verwendung desselben Anzeigeegerätes gehen die durch die Auflösung des Messgerätes verursachten Unsicherheitsbeiträge  $u(\delta R)$  zweimal in das Messunsicherheitsbilanz ein, da im schlechtesten Fall  $\delta R_X = -\delta R_Y = \delta R$  beträgt.

$\delta R_{AX}$   
 $\delta R_{AY}$  ggf. verfahrensbedingte Einflüsse, die sich durch den Anschluss des Kalibriergegenstandes am Normal bzw. am Transfermessgerät ergeben. Da sowohl mit Normal und Kalibriergegenstand unter gleichen Bedingungen gemessen wird, kann davon ausgegangen werden, dass die möglichen Einflüsse am Normal und Messobjekt gleich groß sind ( $\delta R_{AX} = \delta R_{AY}$ ) und sich gegenseitig aufheben. In diesem Fall muss kein zusätzlicher verfahrensbedingter Unsicherheitsbeitrag berücksichtigt werden.

**Modellgleichung:**

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich:

$$R_X + \delta R_X + \delta R_{AX} = X - \Delta X_K + \delta X$$

$$R_Y + \delta R_Y + \delta R_{AY} = Y - \Delta Y$$

Für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit wird vom idealen Fall  $R_X = R_Y$  (d.h. Übereinstimmung der Anzeige beider Messungen) ausgegangen. Aus

$$Y - \Delta Y - \delta R_{AY} - \delta R_Y = X - \Delta X_K - \delta R_{AX} - \delta R_X ,$$

$$\delta R_X = -\delta R_Y = \delta R \text{ und}$$

$$\delta R_{AX} = \delta R_{AY}$$

ergibt sich dann die für dieses Verfahren maßgebliche Modellgleichung:

$$\Delta Y = Y - (X - \Delta X_K + \delta X + 2\delta R)$$

Theoriebedingt ergeben sich i.d.R. nie höhere Messunsicherheiten als die Direktmessmethode, sofern die Auflösung des Anzeigeegerätes hoch genug ist und verfahrensbedingte Einflüsse sehr gering gehalten werden können.

**Messunsicherheitsbilanz:**

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta Y) = c_X^2 u^2(\delta X) + 2c_R^2 u^2(\delta R)$$

**Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:**

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
$X_i$	$x_i$	$u(x_i)$		$c_i$	$u_i(y)$
$X$	$x$				
$\Delta X_K$	$x_K$				
$\delta R$	0	$U(\delta R) / \sqrt{3}$	Rechteck	2	$u(\delta R)$
$\delta X$	0	$U(\delta X) / 2$	Normal	1	$u(\delta X)$
$Y$	$y$				
$\Delta Y$	$y - x + x_K$				$u(\Delta Y)$

Relative erweiterte Messunsicherheit (k=2):

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

Die Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen sind z.B. den Tabellen der jeweiligen Direktmessmethode wie Kapitel III zu entnehmen, sofern durch den Einsatz eines optimalen TransfERNormals keine zusätzliche Unsicherheit zu erwarten ist. Die Ergebnisse sind im Leistungsnachweis aufgeführt.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.18	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - V Kalibrierung im <b>Substitutionsverfahren</b>	4 von 5



© 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.

<b>Ausgabe:</b>	<b>erstellt</b>	<b>geprüft/ genehmigt</b>	<b>Kapitel</b>	<b>Seite</b>
DMS.18	von: PF am: s. DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - <b>V Kalibrierung im Substitutionsverfahren</b>	5 von 5