

X Kalibrierung von elektrischer Leistung

X.1 Kalibrierung mit Kalibrator als Normal

Messgeräte für elektrische Leistung können durch getrennte Speisung ihres Strom- und Spannungspfad mit einem Kalibrator (wie z. B. Geräte der Serie Fluke 55xxA bzw. Fluke 6100A) oder dem Aufbau geeigneter gekoppelter Quellen (z. B. zwei Kalibratoren der Serie Fluke 5700A) kalibriert werden. Ist so ein Aufbau nicht möglich (z. B. bei integrierten Messgeräten ohne getrennte Pfade) empfiehlt sich die Kalibrierung mit angeschlossenem Verbraucher (Last) im Vergleich (siehe Abs. X.3).

Die Multifunktionskalibratoren der Serie Fluke 55xxA ermöglichen die phasengekoppelte Erzeugung von Strom und Spannung an einem Gerät und somit eine komfortable Möglichkeit zur Kalibrierung von Leistungsmessgeräten (Leistungsmessgeräte werden direkt an den Kalibrator angeschlossen).



Bild X.1.1 Anschluss von Leistungsmessgeräten an Kalibrator wie Fluke 55xxA

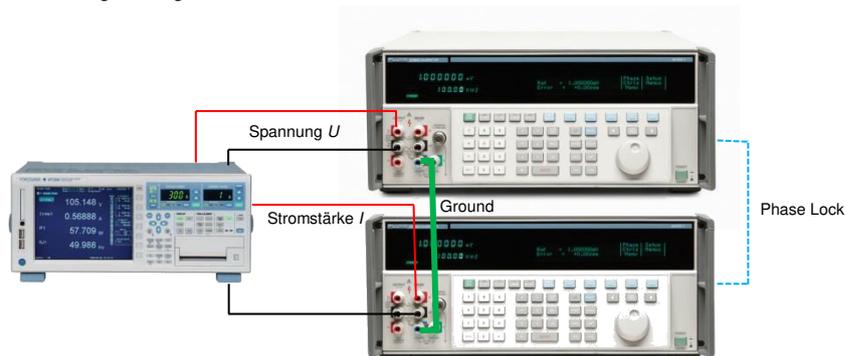


Bild X.1.2 Anschluss von Leistungsmessgeräten an gekoppelter Quelle, (2x Fluke 57xxA Kalibrator)

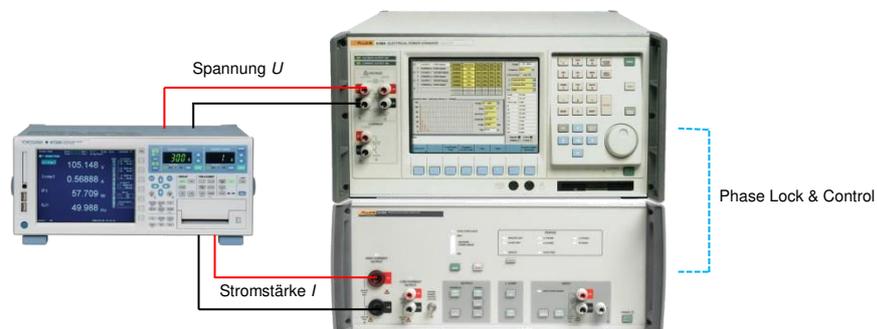


Bild X.1.3 Anschluss von Leistungsmessgeräten an gekoppelter Quelle, (1x Fluke 6100A Kalibrator, 1x Stromverstärker Fluke 52120A)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.28	von: PF am: 06.08.2018 s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - X Kalibrierung von elektrischer Leistung	1

X.1.1 Gleichstromleistung

Die eingesetzten Quellen erzeugen Gleichstromleistung indem eine Gleichspannung am Eingang des Messobjektes (DUT) angelegt wird (z. B. vom Ausgang NORMAL des Fluke 55xxA) während gleichzeitig eine Gleichstromstärke abgegeben wird (z. B. vom Ausgang AUX am DUT). Der Anschluss erfolgt empfehlungsgemäß über geeignete Messkabel wie Fluke 5440A-7002 (oder alternativ Pomona 1167-36, geschirmte Messleitung). Es ist dafür zu sorgen, dass Strom- und Spannungspfad gemeinsam geerdet sind. Diese Erdung geschieht in der Regel am Kalibriergegenstand („LO“s OPEN) und nur falls dies nicht möglich ist (z. B. batteriebetriebenes Gerät) an den verwendeten Quellen (z. B. über die Tasten EARTH und „LO“s TIED am Kalibrator Fluke 55xxA). Auf jeden Fall darf die Erdung nur an einer Seite erfolgen, um „Ringströme“ zu vermeiden. In jedem Fall sind die Bedienungsanleitungen und Hinweise der Hersteller zum Betrieb und Bedienung der Normale bzw. des Kalibriergegenstandes zu beachten.

Die erzeugte Gleichstromleistung errechnet sich aus der bekannten Gleichspannung U und der bekannten Gleichstromstärke I mit der Methodengleichung zu

$$P = U \cdot I$$

X.1.2 Wechselstromwirkleistung

Die Kalibrierung von Wechselstromleistung erfolgt mit sinusförmigen Signalverläufen. Für optimale Phasenbedingungen geschieht die gemeinsame Erdung von Spannung (z. B. NORMAL LO) und Stromstärke (z. B. AUX LO); am besten am Leistungsmessgerät. Dies entspricht der Funktion „LO“s OPEN am Kalibrator der Serie Fluke 55xxA. Bei hohen Stromstärken $>2,2$ A empfiehlt sich die LO Verbindung mit einem Kurzschlussstecker oder Kabel hohen Querschnitts und maximal $10 \text{ m}\Omega$ Widerstand¹ zu brücken. Bei Verwendung von zwei separaten Quellen müssen diese phasenstarr miteinander verbunden sein („Phase Lock“). In jedem Fall muss die genaue gegenseitige Phasenbeziehung (Leistungsfaktor) der Quellen bei deren Betrieb bekannt (kalibrierter oder spezifizierter Leistungsfaktor, bzw. bezüglich Wirkleistungsabgabe kalibrierte Quelle) sein, da sonst nur eine Aussage über die Scheinleistung getroffen werden kann.

X.1.3 Leistungsfaktor

Um eine Aussage über den Leistungsfaktor bei Wechselstromleistungsabgabe machen zu können, muss dieser für jede Quellenkombination oder den verwendeten Kalibrator separat kalibriert (rückgeführt) sein. Der Leistungsfaktor wird verändert, indem die Phasen der erzeugten Stromstärke und Spannung gegeneinander verschoben werden. Bei den Kalibratoren der Serie Fluke 55xxA gibt es dazu eigene Betriebsoptionen zur direkten Einstellung des Leistungsfaktors (WAVE MENUS – PHASE): Mit SHOW PF wird der Leistungsfaktor-Dialog geöffnet und über die Tasten kann der gewünschte Wert gewählt und aktiviert werden.

X.1.4 Blindleistung²

Die Kalibrierung der Blindleistung erfolgt analog zum Verfahren für die Kalibrierung der Wechselstromwirkleistung. Die Bestimmung der Einstellungsparameter erfolgt über die Umrechnung der Wechselstromwirkleistung. Folgende mathematische Beziehung besteht zwischen den Ausgangsgrößen:

$$P_{Blind} = \sqrt{P_{Schein}^2 - P_{Wirk}^2} = \sqrt{(U \cdot I)^2 - (U \cdot I \cdot \cos \phi)^2}$$

Siehe auch Arbeitsanweisung AA0335: <http://dmserver/technik/Arbeitsanweisungen/AA0335-Bestimmung-der-Einstellparameter-zum-Erzeugen-einer-Wechselstromblindleistung-am-Kalibrator-Fluke-55xxA.docx>

¹ Empfehlung aus dem Fluke 55xxA User Manual
² ehm X.2.4

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.28	von: PF am: 06.08.2018 s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - X Kalibrierung von elektrischer Leistung	2

X.2 Messunsicherheitsbilanz

X.2.1 Gleichstromleistung

Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

U bekannte Spannung der Quelle
 I bekannte Stromstärke der Quelle
 P_{ind} Gemessene (Wirk-)Leistung am Kalibriergegenstand

Gesuchte Größe:

ΔP Abweichung der Anzeige des Kalibriergegenstandes vom richtigen Wert

Einflussgrößen:

$\delta U,$
 δI Unbekannte Abweichung der Gleichspannung und Gleichstromstärke der verwendeten Quelle (Normal) vom bekannten Wert. Die Intervallgrenzen (Normalverteilung, $k=2$) hierfür ergeben sich aus den Unterbilanzen der zugehörigen DC-Direktmessverfahren („Kalibrierunsicherheiten“ vgl. QMH Abs. III.2). Hilfsweise kann die Herstellerspezifikation mit geeigneter Gewichtung (z. B. Rechteckverteilung oder Normalverteilung) verwendet werden

$\delta P_{Verfahren}$ Verfahrensbedingte Einflüsse der Anschlüsse des Messaufbaus beispielsweise Leitungslängen, thermoelektrische oder parasitäre Effekte der Messleitungen, Eingangsimpedanzen/-reaktanzen der Messanordnung, Offsetfehler etc. . Zum größten Teil hängen diese Unsicherheiten vom Kalibriergegenstand ab und die Grenzen der Rechteckverteilung können erst im Einzelfall zusätzlich abgeschätzt werden. Ein Anteil dieser Abweichung ist bereits in den Kalibrierunsicherheiten oder der nominellen Abweichung (Spezifikation) der Quellen enthalten. Daneben spielt dieser Einfluss in den betrachteten Betriebsbereichen Bezug auf die Größenordnung der Gesamtmessunsicherheit kaum eine Rolle und kann üblicherweise vernachlässigt werden.

δP_{ind} Rundungsfehler aufgrund der Auflösung des Messgerätes (abhängig vom Kalibriergegenstand). Für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit muss dieser Term nicht berücksichtigt werden, da vom idealen Fall ausgegangen wird.

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich aus

$$P - \Delta P + \delta P_{ind} = (U + \delta U) \cdot (I + \delta I) + \delta P_{Verfahren}$$

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

$$\Delta P = P - (U + \delta U) \cdot (I + \delta I) - \delta P_{Verfahren}$$

Messunsicherheitsbilanz:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta P) = c_U^2 u^2(\delta U) + c_I^2 u^2(\delta I) + c_{Verfahren}^2 u^2(\delta P_{Verfahren}) + c_{ind}^2 u^2(\delta P_{ind})$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.28	von: PF am: 06.08.2018 s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - X Kalibrierung von elektrischer Leistung	3

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	$u(x_i)$		$ c_i $	$u_i(y)$
U	u				
δU	0	$U(\delta U)/2$	Normal	1	$u(\delta U)$
I	i				
δI	0	$U(\delta I)/2$	Normal	U	$u(\delta I)$
δI_{ind}	0	$U(\delta I_{ind})/\sqrt{3}$	Rechteck	U	$u(\delta I_{ind})$
$\delta P_{Verfahren}$	0	$U(\delta P_{Verfahren})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta P_{Verfahren})$
P	p				
ΔP	$p-u-i$				$u(\Delta P)$

Relative erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$W(\Delta P) = 2 \frac{u(\Delta P)}{P}$$

Bei Verwendung der relativen erweiterten Messunsicherheiten W_U und W_I von Spannung bzw. Stromstärke und Vernachlässigung von zusätzlichen verfahrensbedingten Unsicherheiten $U(\delta P_{Verfahren})$ kann die relative Gesamtunsicherheit der Leistungsabweichung des Messobjektes vereinfacht dargestellt werden:

$$W(\Delta P) = \sqrt{W_U^2 + W_I^2}$$

X.2.2 Wechselstromwirkleistung

Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

- P bekannte oder errechnete Wirkleistung der Quelle
- P_{Ind} Gemessene Leistung am Kalibriergegenstand

Gesuchte Größe:

- ΔP_{ind} Abweichung der Anzeige des Kalibriergegenstandes vom richtigen Wert

Einflussgrößen:

- δP_{nom} Die Abweichung der Quelle (z. B. Kalibrator) bezogen auf die Wirkleistungsabgabe bei den eingestellten Festwerten für Stromstärke, Spannung und Leistungsfaktor, und Frequenz ist aus der Kalibrierung bekannt. An anderen Betriebspunkten kann der genaue Wirkleistungswert nicht interpoliert werden. Es wird daher die maximal zu erwartende Nominalabweichung zum eingestellten (errechneten) Wert als Grenze eines normal³-, rechteck⁴- oder u⁵-verteilten Unsicherheitsintervall verwendet. Hilfsweise kann als zu erwartende Maximalabweichung die Herstellerspezifikation verwendet werden, die sich üblicherweise aus Anteilen für die eingestellte Stromstärke, die eingestellte Spannung, dem eingestellten Leistungsfaktor und der Frequenz zusammensetzt.

Wird das Normal an den festen (direkt rückgeführten) Stützwerten betrieben kann

³ bei Zusammenfassung mehrerer Werte im Bereich und Berechnung des Mittelwertes und dessen Standardunsicherheit

⁴ bei Zusammenfassung mehrerer Werte im Bereich und Verwendung des Maximalwertes

⁵ bei „stützpunktgenauer“ Betrachtung an jedem Punkt einzeln

Ausgabe: DMS.28	erstellt von: PF am: 06.08.2018 s.DMS	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - X Kalibrierung von elektrischer Leistung	Seite 4
---------------------------	-------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------

dieser Anteil entfallen.

δP_{Drift} Abweichung durch mögliche Drift, wenn das Normal an den festen (direkt rückgeführten) Stützwerten betrieben wird. Bei Betrieb an anderen Punkten ist dieser Anteil bereits in der (Hersteller-)Spezifikation bzw. der unbekanntem Nominalabweichung im Anteil δP_{nom} enthalten

δP_{Kal} Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Normals. Das Unsicherheitsintervall ist dem Kalibrierschein entnehmbar (Normalverteilung, $k = 2$).

$\delta P_{Verfahren}$ Verfahrensbedingte Einflüsse der Anschlüsse des Messaufbaus beispielsweise Leitungslängen, thermoelektrische oder parasitäre Effekte der Messleitungen, Eingangsimpedanzen/-reaktanzen der Messanordnung, Offsetfehler etc.. Zum größten Teil hängen diese Unsicherheiten vom Kalibriergegenstand ab und die Grenzen der Rechteckverteilung können erst im Einzelfall zusätzlich abgeschätzt werden. Ein Anteil dieser Abweichung ist bereits in der Kalibrierunsicherheit und der nominellen Abweichung des Kalibrators enthalten. Daneben spielt dieser Einfluss im betrachteten Frequenzbereich in Bezug auf die Größenordnung der Gesamtmessunsicherheit kaum eine Rolle und wird daher vernachlässigt.

δP_{Ind} Rundungsfehler aufgrund der begrenzten Auflösung des Messgerätes (abhängig vom Kalibriergegenstand).

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich aus

$$P_{Ind} - \Delta P + \delta P_{Ind} = P + \delta P_{nom} + \delta P_{Drift} + \delta P_{Kal} + \delta P_{Verfahren}$$

die für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit maßgebliche Modellgleichung:

$$\Delta P = P_{Ind} - P - \delta P_{nom} - \delta P_{Drift} - \delta P_{Kal} - \delta P_{Verfahren} + \delta P_{Ind}$$

Messunsicherheitsbilanz:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta P) = c_{Kal}^2 u^2(\delta P_{Kal}) + c_{nom}^2 u^2(\delta P_{nom}) + c_{Drift}^2 u^2(\delta P_{Drift}) + c_{Verfahren}^2 u^2(\delta P_{Verfahren}) + c_{Ind}^2 u^2(\delta P_{Ind})$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	$u(x_i)$		$ c_i $	$u_i(y)$
P	p				
δP_{nom}	0	$U(\delta P_{nom}) / \sqrt{2}$	u-verteilt	1	$u(\delta P_{nom})$
δP_{Drift}	0	$U(\delta P_{Drift}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta P_{Drift})$
δP_{Kal}	0	$U(\delta P_{Kal}) / 2$	Normal	1	$u(\delta P_{Kal})$
$\delta P_{Verfahren}$	0	$U(\delta P_{Verfahren}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta P_{Verfahren})$
δP_{Ind}	0	$U(\delta P_{Ind}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta P_{Ind})$
ΔP	$p_{ind} - p$				$u(\Delta P)$

Relative erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$W(\Delta P) = 2 \frac{u(\Delta P)}{P_{ind}}$$

Ausgabe: DMS.28	erstellt von: PF am: 06.08.2018 s.DMS	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - X Kalibrierung von elektrischer Leistung	Seite 5
---------------------------	-------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------

X.2.3 Leistungsfaktor

Die Modellgleichung der Leistungsfaktorkalibrierung kann beschrieben werden zu

$$PF_{DUT} - \Delta PF_{DUT} = PF_{Normal} + \delta PF_{Kal} + \delta PF_{Drift} + \delta PF_{Auflösung} + \delta PF_{Interpolation} + \delta PF_{Frequenz} + \delta PF_{Bereich}$$

mit

PF_{DUT} Anzeige des Messobjektes bei Anschluss des Normals

ΔPF_{DUT} unbekannte Abweichung der Anzeige des Messobjektes

PF_{Normal} Bekannter (korrigierter) Wert des Leistungsnormal. An den festen Stützpunkten sind die Korrekturwerte direkt dem Kalibrierschein des Gerätes entnehmbar. Dazwischen kann jeweils für kapazitiven und induktiven Leistungsfaktor einzeln interpoliert werden. Alle bekannten Stützpunkte können dann als Kontrollwerte zur Bestimmung der Interpolationsabweichung verwendet werden.

δPF_{Kal} Kalibrierunsicherheit der Korrekturwerte (ebenfalls aus dem Kalibrierschein), Normalverteilung mit $k=2$

δPF_{Drift} Veränderung der Korrekturwerte zwischen zwei Kalibrierungen. Dazu wird die Drift aus den Folgekalibrierungen ermittelt und üblicherweise der Maximalwert als Grenzen einer Rechteckverteilung angenommen. Liegt eine ausreichende Anzahl an Rekalibrierungen vor, kann auch die „wahrscheinliche“ Drift als Mittelwert aller bisherigen Veränderungen der Kalibrierwerte verwendet werden (Normalverteilung).

$\delta PF_{Auflösung}$ Sowohl die Abstimmungsauflösung des Normals (bei von den festen Stützpunkten abweichenden Werten) als auch die Auflösung eines Messobjektes geht in die Messunsicherheitsbilanz zur Hälfte der letzten angezeigten Stelle ($\pm 0,5$ Digits) als rechteckverteiltes Unsicherheitsintervall ein. In beiden Fällen wird für die Ergebnisrechnung von 0,0001 also Intervallgrenzen von $\pm 0,00005$ ausgegangen.

$\delta PF_{Interpolation}$ Durch die Korrekturwertinterpolation ist ggf. ein zusätzlicher Anteil der „Qualität“ der Interpolation zu berücksichtigen. Dieser wird aus der Interpolationsabweichung der Kennlinie zu den zusätzlichen Kontrollpunkten bestimmt. Angenommen wird ein rechteckiges Werteintervall für variable Werte zwischen diesen Stützstellen.

$\delta PF_{Frequenz}$ Wird das Normal im Frequenzbereich 45 Hz bis 65 Hz und damit an von der kalibrierten Frequenz abweichenden Punkten betrieben ist der zusätzliche Frequenzeinfluss zu berücksichtigen. Er wird durch Verstimmung der Frequenz beim Leistungsfaktor $PF=0,5$ an einem Leistungsmessgerät bestimmt. Die beobachtete Abweichung bei der Kontrolle von Extrempunkten im Messbereich enthält zwar kombinierte Einflüsse aus Normal und Messgerät, es wird aber angenommen, dass das Werteintervall des Normals alleine in dieser Messung auf jeden Fall enthalten ist (Rechteckverteilung).

$\delta PF_{Bereich}$ Wird das Normal an beliebigen Werten für Stromstärke und Spannung im selben Bereich und damit an von der kalibrierten Spannung bzw. Stromstärke abweichenden Punkten betrieben ist der zusätzliche Einfluss zu berücksichtigen. Er wird durch Verstimmung der Spannung bzw. Stromstärke beim Leistungsfaktor $PF=0,5$ an einem Leistungsmessgerät bestimmt. Die beobachtete Abweichung bei der Kontrolle von Extrempunkten im Messbereich enthält zwar kombinierte Einflüsse aus Normal und Messgerät, es wird aber angenommen, dass das Werteintervall des Normals alleine in dieser Messung auf jeden Fall enthalten ist (Rechteckverteilung).

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.28	von: PF am: 06.08.2018 s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - X Kalibrierung von elektrischer Leistung	6

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität $ c_i ^6$	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$
PF_{DUT}	$PF_{angezeigt}$	σ_X	Normal (Typ A)	$\sigma_X / \sqrt{n_X}$	1	u_{DUT}
PF_{Normal}	$PF_{Korrektur}$	-	-	-	-	-
δPF_{Kal}	0	a_{Kal}	Rechteck	$\frac{a_{Kal}}{\sqrt{3}}$	1	u_{Kal}
δPF_{Drift}	0	a_{Drift}	Rechteck	$\frac{a_{Drift}}{\sqrt{3}}$	1	u_{Drift}
$\delta PF_{Auflösung}$	0	$a_{Auflösung}$	Rechteck	$\frac{a_{Auflösung}}{\sqrt{3}}$	1	$u_{Auflösung}$
$\delta PF_{Interpolation}$	0	$a_{Interpolation}$	Rechteck	$\frac{a_{Interpolation}}{\sqrt{3}}$	1	$u_{Interpolation}$
$\delta PF_{Frequenz}$	0	$a_{Frequenz}$	Rechteck	$\frac{a_{Frequenz}}{\sqrt{3}}$	1	$u_{Frequenz}$
$\delta PF_{Bereich}$	0	$a_{Bereich}$	Rechteck	$\frac{a_{Bereich}}{\sqrt{3}}$	1	$u_{Bereich}$
ΔPF_{DUT}	Standardunsicherheit			$u(\Delta PF_{DUT}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u_i^2(y)}$		$u(\Delta PF_{DUT})$
	erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$U(\Delta PF_{DUT}) = k \cdot u(y)$		$U(\Delta PF_{DUT})$

X.2.4 Blindleistung

Die Messunsicherheitsbilanz der Blindleistung entspricht betragsmäßig der Messunsicherheitsbilanz der korrespondierenden Wechselstromwirkleistung mal $\tan\varphi$ da die Blindleistung von denselben Eingangsparametern und Einflussgrößen abhängt und aufgrund der mathematischen Beziehung mit $\tan\varphi$ skaliert (Sensitivitätskoeffizient).

$$u(\Delta P_{Blind}) = u(\Delta P) \cdot \frac{\text{var}}{W} \cdot \tan\varphi$$

Unter der Annahme, dass der Einfluss des Leistungsfaktors δPf und der für die Wechselstromblindleistung relevante Faktor $\sin\varphi$ gleich sind entfällt der Sensitivitätskoeffizient, jedoch nicht der entsprechende zusätzliche, von $\cos\varphi$ abhängige Anteil. Damit gilt

$$u(\Delta P_{Blind}) = u(\Delta P) \cdot \frac{\text{var}}{W}$$

Relative erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$W(\Delta P_{Blind}) = 2 \frac{u(\Delta P_{Blind})}{P_{Blind}}$$

⁶ $c_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}$

X.3 Leistungskalibrierung im Vergleich

X.3.1 Quellen im Vergleich (Substitution)

Im Vergleich mit dem Leistungsnormal können an einem Leistungsanalysator analog zu dem in Kapitel V genannten Verfahren Leistungsquellen kalibriert werden (Substitution). Mit einem Anzeigergerät ausreichender Auflösung können dieselben Messunsicherheiten wie in X.2 gezeigt erreicht werden.

X.3.2 Leistungskalibrierung im Vergleich an geeigneter Last

Mit einem nach X.1 kalibrierten Leistungsmessgerät können auch Kalibriergegenstände ohne getrennten Strom- und Spannungspfad an einer geeigneten Last (Verbraucher) kalibriert werden. Dies betrifft zum Beispiel aktive Quellen mit eingebautem Anzeigeinstrument. Die Last kann je nach Leistungsbereich aus regelbaren Glühbirnen, Heizkörpern oder elektronischen Bauformen bestehen.

X.3.2.1 Messaufbau

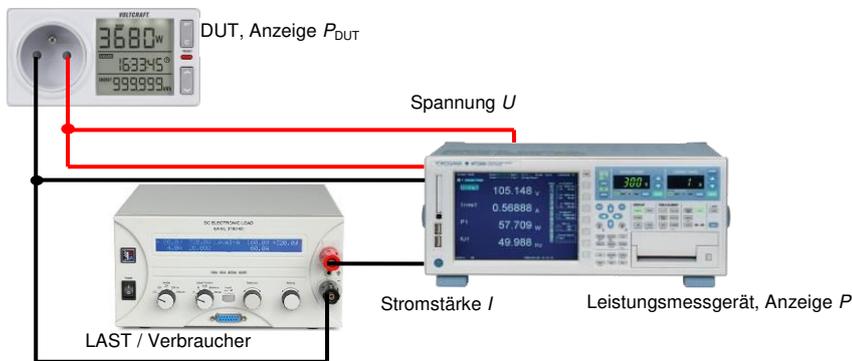


Bild X.3.1 Anschluss eines integrierten Leistungsmessgerätes an Last und kalibriertes Vergleichsgerät (Normal)

Als Alternative zur Kalibrierung solcher Instrumente, die zum Betrieb direkt zwischen Netzversorgung und Verbraucher eingesteckt werden, kann dazu die getrennte Strom-/Spannungspfad aus Abs. X.1 sein, sofern die „Compliance“-Stromstärke des Kalibrators zur Energieversorgung des Messobjektes ausreicht. Dabei muss abhängig vom internen Messaufbau des Kalibriergegenstandes bekannt sein auf welcher Anschlussseite Spannung und Stromstärke angelegt werden müssen, um korrekte Ablesewerte zu erhalten.

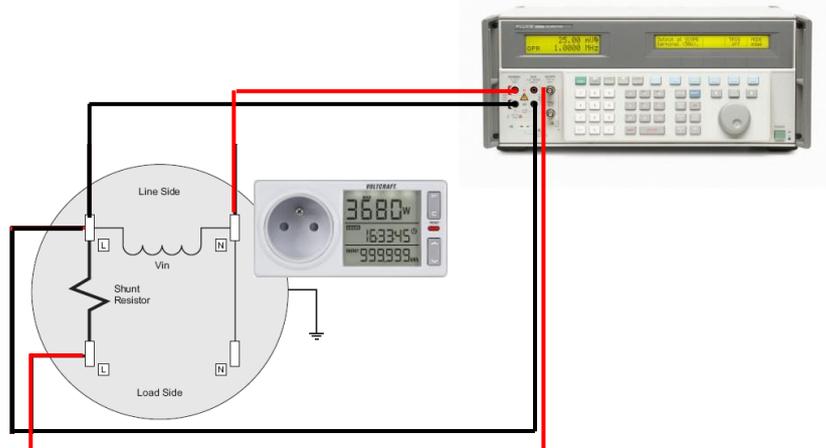


Bild X.3.2 Anschluss eines integrierten Leistungsmessgerätes an Kalibrator (siehe auch Fluke 52120A, User Manual)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.28	von: PF am: 06.08.2018 s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - X Kalibrierung von elektrischer Leistung	8

X.3.2.2 Messunsicherheit

Das Modell der Auswertung kann ähnlich zu Kapitel IV.1 formuliert werden aus

$$P_{DUT} - \Delta P + \delta P_{ind,DUT} = P \cdot (KP_{Spez} \cdot KP_{Kal}) + \delta P_{ind}$$

mit

P_{DUT} Anzeige am Kalibriergegenstand

ΔP Abweichung der Anzeige des Kalibriergegenstandes

$\delta P_{ind,DUT}$ Abweichung durch begrenzte Auflösung des Kalibriergegenstandes bzw. des Vergleichsgerätes (Normals)
 δP_{ind}

P Anzeige am Vergleichsgerät

KP_{Spez} Korrektur durch die maximale nominelle Abweichung der Leistungs- bzw. Leistungsfaktormessung (spezifizierte Toleranzen). Sofern die Anzeigeabweichung nicht an allen Kontrollpunkten bekannt ist und korrigiert wird (einkalibriert wurde), so dienen die Herstellerangaben des Vergleichsgeräts als Basis der maximal zu erwartenden Abweichungen.

KP_{Kal} Korrektur durch die Kalibrierung der Anzeige des Normals.

zu

$$\Delta P = P_{DUT} - P \cdot (KP_{Spez} \cdot KP_{Kal}) - \delta P_{ind} + \delta P_{ind,DUT}$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz (relative Messunsicherheitsangabe bezogen auf den Messwert):

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivität skoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	a		$w(x_i)$	$ c_i ^7$	$w_i(y)$
P_{DUT}	p_{DUT}					
$\delta P_{nd,DUT}$	0 W	$a_{ind,DUT}$	Rechteck	$\frac{a_{ind,DUT}}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{P_{DUT}}$	$w_{ind,DUT}$
P	p					
δP_{ind}	0 W	a_{ind}	Rechteck	$\frac{a_{ind}}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{P_{DUT}}$	w_{ind}
KP_{Spez}	1	a_{Spez}	Rechteck	$\frac{a_{Spez}}{\sqrt{3}}$	1	w_{Spez}
KP_{Kal}	1	a_{Kal}	Normal	$\frac{a_{Kal}}{2}$	1	w_{Kal}
$\Delta P = P_{DUT} - P$	Standardunsicherheit			$w(\Delta P) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 w_i^2(\Delta P)}$		$w_{\Delta P}$
	erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(\Delta P) = k \cdot w(\Delta P)$		

⁷ $c_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}$

X.4 Leistungssynthese über Leitungswicklungen passender Windungszahl

Werden Leistungsanalysatoren oder Messgeräte mit Stromzangen betrieben und kalibriert so lässt sich die Leistungssynthese über die Strom- und Spannungspfade an Leitungswicklungen passender Windungszahl durchführen (vgl. Kapitel XIX).

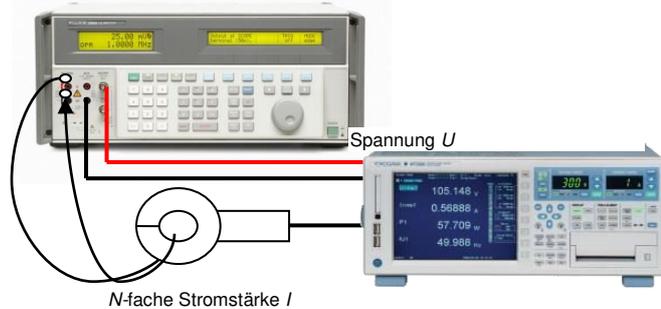


Bild X1.1.5 Anschluss eines Leistungsmessgerätes mit Stromzangen oder Zangenstromwandler

Die Messunsicherheit ist für dieses Verfahren im Wesentlichen durch die Stromstärkeunsicherheit und den Abgriff über die Zange beeinflusst, wodurch die Gesamtmessunsicherheit in Anlehnung zu Kapitel XIX bestimmbar ist. Ergänzend zu X.2.2 gilt mit

N Windungszahl der verwendeten Stromwicklung

K_P Korrektionsfaktor durch das Streufeld der verwendeten Stromleitung, vgl. XIX.3.1

K_{coil} Durch das Messobjekt im Stromkreis kann die Induktivität des Strompfades v. a. bei Zangen mit Eisenkern zunehmen, was ungewollte Belastungen der Quelle und Phasenverschiebungen verursacht. Der Einfluss der Quellbelastung kann durch die Herstellerspezifikation oder geeignete Testmessungen z. B. an einem Shunt mit und ohne Wicklung und DUT im Stromkreis abgeschätzt werden, idealerweise wird die Ausgangsstromstärke an einem Kontrollshunt mitgemessen („gemonitort“). Die Phasenverschiebung wird durch Messung der kombinierten Induktivität L_{coil} und dessen ohmschen Widerstands R_{coil} abgeschätzt. Der Phasenversatz φ errechnet sich mit der Messfrequenz f zu

$$\varphi = \arctan \frac{2\pi f \cdot L_{coil}}{R_{coil}}$$

Unkorrigiert ergeben sich damit die Intervallgrenzen a_{coil} eines zusätzlichen (u-verteilter) Unsicherheitsintervall und deren Standardunsicherheit u_{coil} bei der Wirkleistungserzeugung:

$$a_{coil} = 1 - \cos \left(\arctan \frac{2\pi f \cdot L_{coil}}{R_{coil}} \right)$$

Bei eisenarmen Zangen und Wicklungen geringer Induktivität spielt dieser Einfluss jedoch gegenüber der Gesamtunsicherheit kaum eine Rolle und kann vernachlässigt werden.

Die **Modellgleichung** erweitert sich somit zu

$$\Delta P_{coil} = P_{Ind} - N \cdot (P - \delta P_{nom} - \delta P_{Kal} - \delta P_{Verfahren} + \delta P_{Ind}) \cdot K_{coil} \cdot K_P$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.28	von: PF am: 06.08.2018 s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - X Kalibrierung von elektrischer Leistung	10

Messunsicherheitsbilanz:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta P_{coil}) = c_{Kal}^2 u^2(\delta P_{Kal}) + c_{nom}^2 u^2(\delta P_{nom}) + c_{Drift}^2 u^2(\delta P_{Drift}) + c_{Verfahren}^2 u^2(\delta P_{Verfahren}) + c_{Ind}^2 u^2(\delta P_{Ind}) + c_{coil}^2 u^2(K_{coil}) + c_p^2 u^2(K_p)$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standard- messunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitäts- koeffizient $ c_i $	Unsicherheits- beitrag $u_i(y)$
$N \cdot P$	$n \cdot p$				
δP_{nom}	0	$U(\delta P_{nom}) / \sqrt{2}$	u-verteilt	1	$u(\delta P_{nom})$
δP_{Drift}	0	$U(\delta P_{Drift}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta P_{Drift})$
δP_{Kal}	0	$U(\delta P_{Kal}) / 2$	Normal	1	$u(\delta P_{Kal})$
$\delta P_{Verfahren}$	0	$U(\delta P_{Verfahren}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(\delta P_{Verfahren})$
K_{coil}	1	$a_{coil} / \sqrt{2}$	u-verteilt	$N \cdot P$	$u(\delta K_{coil})$
K_p	1	a_p	Normal	$N \cdot P$	$u(\delta K_p)$
ΔP_{coil}	$p_{ind} - n \cdot p$	Standardunsicherheit	$u(\Delta P) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u_i^2(\Delta P_{coil})}$ $U(\Delta P_{coil}) = k \cdot u(\Delta P_{coil})$		
erweiterte Messunsicherheit (k=2)					

Relative erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$W(\Delta P) = 2 \frac{u(\Delta P)}{P_{ind}}$$

Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen des Kapitels sind den Tabellen

- Unsicherheitsbilanzen für Leistungsfaktor und Wechselstromwirkleistung mit Leistungsfaktor ungleich 1: <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Driftanalyse-Leistungsnormal-5500A-011079.xlsx>
- Unsicherheitsbilanzen für Wechselstromwirkleistung mit Leistungsfaktor gleich 1: <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-X-Leistung-an-Fluke-5500A.XLS>
- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-X.2.4-Wechselstromblindleistung.xlsx>

zu entnehmen, die Ergebnisse sind im Leistungsnachweis aufgeführt.

Ausgabe: DMS.28	erstellt von: PF am: 06.08.2018 s.DMS	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - X Kalibrierung von elektrischer Leistung	Seite 11
---------------------------	-------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------



© 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.28	von: PF am: 06.08.2018 s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - X Kalibrierung von elektrischer Leistung	12