

## XXII Mobile Kalibrierung vor-Ort

XXII Mobile Kalibrierung vor-Ort.....	1
XXII.1 Umgebungsbedingungen.....	2
XXII.2 Direkte Messung am Multimeter HP 3458A.....	3
XXII.2.1 Kalibrierverfahren .....	3
XXII.2.2 Messunsicherheit .....	3
XXII.2.3 Kalibrierung von Messgeräten mit zuvor eingemessenen Normalen (Quellen).....	3
XXII.2.3.1 Wechselstromwiderstand .....	3
XXII.2.4 Temperatursimulatoren .....	4
XXII.2.5 Stromstärke >1 A.....	5
XXII.3 Direkte Kalibrierung am Multifunktionskalibrator Fluke 5520A-SC1100.....	6
XXII.3.1 Kalibrierverfahren / Messunsicherheit DC-/NF- .....	6
XXII.3.2 Temperaturanzeigeräte .....	6
XXII.3.3 Temperatursimulatoren .....	8
XXII.3.4 Gleichstromleistung / Wechselstromwirkleistung (s.a. Kapitel X) .....	8
XXII.3.5 Stromzangen / Zangenmultimeter .....	8
XXII.3.6 Oszilloskope – Vertikalablenkung (Amplitude).....	8
XXII.3.7 Oszilloskope – Horizontalablenkung (Zeitbasis) .....	9
XXII.3.8 Oszilloskope – Frequenzgang und Bandbreite .....	10
XXII.3.9 Widerstände – indirekt (vgl. Kapitel VII) .....	11
XXII.4 Direkte Messung am Oszilloskop Tektronix TDS 3052B .....	12
XXII.4.1 Ablenkung (horizontal / vertikal) .....	12
XXII.4.2 Anstiegszeit .....	13
XXII.5 Frequenzsynthese und Messung (s.a. Kapitel XIII) .....	13
XXII.5.1 Messunsicherheit Frequenzsynthese.....	13
XXII.5.2 Messunsicherheit Frequenzmessung .....	14
XXII.6 Kalibrierung von HF-Leistungsquellen.....	15
XII.6.1 Direkte Messung von HF-Leistung .....	15
XII.6.2 HF-Spannung.....	15
XII.7 Ergebnisse.....	16

Für die mobile Kalibrierung vor-Ort beim Kunden steht ein flexibles Kalibriersystem im Baukastenprinzip zur Verfügung. Die Geräte sind dazu in transportable 19-Zoll-Racks eingebaut und werden gegen die Primärnormale im DKD-Labor kalibriert. Prinzipiell ist dadurch für die gebräuchlichsten Messgrößen aus Gleichstrom-, Niederfrequenz und Hochfrequenz eine Kalibrierung z.B. von Produktionsanlagen oder fest verbauten Prozessgeräten möglich. Das vor-Ort-System besteht im Wesentlichen aus:

Pos	Hersteller	Modell	Gegenstand	Messgrößen	Kalibriergegenstände
1	Hewlett Packard	3458A	Digitalmultimeter	Gleichspannung Gleichstromstärke Gleichstromwiderstand Wechselspannung Wechselstromstärke	DC/AC-Quellen, Widerstände Funktionsgeneratoren
2	Fluke	5520A-SC300	Kalibrator	Gleichspannung Gleichstromstärke Gleichstromwiderstand Wechselspannung Wechselstromstärke Temperatursimulation Temperaturanzeige Gleichstromleistung Oszilloskope Stromzangen	Multimeter DC/AC-Messgeräte Temperaturanzeigeräte Oszilloskope Zangenmultimeter Stromzangen Schreiber
3	Tektronix	TDS3052B	Oszilloskop	HF-Spannungen Frequenz/ Periodendauer/ Zeitintervall Anstiegszeit	Funktionsgeneratoren
4	Philips	6654C	Zähler	Frequenz Periodendauer Zeitintervall	Signalgeneratoren Funktionsgeneratoren
5a	Rohde&Schwarz	SME03	HF-Generator 2,7 GHz	Frequenz	Zähler
5b	Hewlett Packard	8672A	HF-Generator 18 GHz	HF-Leistung HF-Spannung (50 Ω)	
6	Rohde&Schwarz	NRVS	HF-Leistungsmesssystem	HF-Leistung	HF-Quellen

Pos	Hersteller	Modell	Gegenstand	Messgrößen	Kalibriergegenstände
7		NRV-Z1		HF-Spannung	
8		NRV-Z51			
9	Burster	1240	Kalibrierwiderstände 1mΩ bis 100 kΩ	Gleichstromwiderstand	Widerstandsmessgeräte
10	Burster	1407	R-Dekade 100mΩ bis 1 MΩ		
11	Genrad	1413	C-Dekade 1 pF bis 1 μF	Kapazität	Kapazitätsmessgeräte
12	ELC/Cenrad	DL07	L-Dekade 1μH bis 10 H	Induktivität	Induktivitätsmessgeräte
13	Hewlett Packard	4274A	LCR-Meter	Kapazität / Induktivität	LCR-Meter

Dadurch, dass das System als Arbeitsplatz im permanenten Labor verwendet wird ist sowohl vor als auch nach dem Transport zu mobilen Einsätzen immer die korrekte Gerätefunktion garantiert. Daneben werden Vor und nach dem Ab- und Wiederaufbau einfache Plausibilitätskontrollen durchgeführt (z.B. Gerätetest DMM an Kalibrator) um den einwandfreien Einsatz zu jeder Zeit zu gewährleisten. Ein reibungsloser Ablauf eines vor-Ort-Auftrages wird durch die in XXIII.6 genannte Checkliste ermöglicht.

## XXII.1 Umgebungsbedingungen

Da die Umgebungsbedingungen beim Kunden in der Regel nicht bekannt sind, können optimale Ergebnisse nur garantiert werden, wenn die Umgebungsbedingungen während der Kalibrierung überwacht werden. Sinnvolle Kalibrierungen sollen nur in einem Temperaturfenster von 20 °C bis 28 °C mit maximalen Kurzzeit- und Instabilitätsschwankungen von ±3 °C zulässig sein. Bei anderen Umgebungsbedingungen sind die angegebenen Messunsicherheiten unter Umständen nicht zu garantieren oder ein erhöhter Anteil durch Abweichungen instabiler Temperatur im Messunsicherheitsbudget zu berücksichtigen. Zum Zweck der Temperaturüberwachung hat jeder Techniker vor Ort ein kombiniertes Thermohygrometer-Messsystem zu beobachten und die Temperatur entsprechend im Kalibrierschein zu dokumentieren. Daneben gelten die empfohlenen Einlaufzeiten der Geräte wie z.B. mindestens eine Stunde für die elektrischen Normale und mindestens zwei Stunden für die offenbetriebenen Frequenzgeneratoren bzw. Zähler.

Eine Stromversorgung erfolgt dabei immer aus dem Hausnetz des Kunden.



Bild XXII.1 Mobiler Kalibrierplatz im permanenten Labor. Sofern nicht im mobilen Einsatz werden die Geräte als Messplatz im permanenten Labor genutzt. Dadurch wird die dauerhafte Funktion des Equipments garantiert.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: SF am: 08.01.2009	XXII Mobile Kalibrierung	2 von 2

## XXII.2 Direkte Messung am Multimeter HP 3458A

### XXII.2.1 Kalibrierverfahren

Analog zu Kapitel IV werden in direkter Messung Quellen im Gleichstrom- und Niederfrequenzbereich kalibriert. Dabei ist zu beachten, dass das Multimeter immer so angeschlossen und betrieben wird, wie es im aktuellen Kalibrierschein vermerkt ist bzw. die optimalen Ergebnisse erzielt, d.h. in der Regel:

	Geräteeinstellung	Anschlusstechnik
alle Messungen	ACAL ALL NPLC 200	GUARD TO LO (unguarded)
DC	NDIG 8 MATH NULL via Kurzschluss	verdrillte Bananenleitung, ca. 0,5m bis max. 1m, nach Möglichkeit mit vergoldeten Kontakten Stromstärke <10 mA, geschirmte, verdrillte Leitung (Pomona 1167)
AC	SETACV SYNC RES .001 LFILTER ON bis 50 kHz	verdrillte Bananenleitung, >10 kHz geschirmte, verdrillte Leitung oder BNC RG58 Leitung, ca. 0,5m bis max. 1m
4-Draht	OHMF	verdrillte Bananenleitungen, ca. 0,5m bis max. 1m, nach Möglichkeit mit vergoldeten Kontakten
Widerstand	OCOMP ON	>1 MOhm 2x geschirmte BNC RG58 Leitung oder geschirmte, verdrillte Leitung, 2-Draht

### XXII.2.2 Messunsicherheit

Das Messunsicherheitsbudget stützt auf der Annahme, dass die von HP/ Agilent für das Multimeter veröffentlichten Jahresspezifikationen Anwendung finden, sofern die Konformität im Rahmen der Kalibrierung nachgewiesen werden kann. Dazu wird zusätzlich jährlich der Artefaktabgleich durchgeführt und die Kalibrierergebnisse dokumentiert. Daneben wird ein zusätzlicher Temperatureinfluss für das unbekannte Einsatztemperaturintervall definiert und verfahrensabhängigen Anteile abhängig von den vor-Ort anwendbaren Einsatzbedingungen.

Die **Modellgleichung** für direkte Messungen am Multimeter wird dementsprechend formuliert zu:

$$Y - \Delta Y + \delta Y_{Res} = X + \delta X_{Res} + \delta X_{Drift} + \delta X_{Kal} + \delta X_{Temp} + \delta X_{Verfahren} + \delta X_{mismatch}$$

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis  $\Delta Y$  beizuordnende erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ ) die **relative erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ )**:

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

### XXII.2.3 Kalibrierung von Messgeräten mit zuvor eingemessenen Normalen (Quellen)

Genauso kann das Multimeter genutzt werden um zuvor ausgemessene Normale (z.B. Widerstände an der Dekade) zur Kalibrierung von Messgeräten zu benutzen. Das MU-Budget erweitert sich dann durch den doppelten Messvorgang an Normal und Messobjekt um den Verfahrens- und auflösungsabhängigen Anteil, sofern gute Kurzzeitstabilität und Reproduktion angenommen wird:

$$u^2(\Delta Y) = u^2(X) + 2u^2(\delta X_{Res}) + u^2(\delta X_{Drift}) + u^2(\delta X_{Kal}) + 2u^2(\delta X_{Verfahren})$$

#### XXII.2.3.1 Wechselstromwiderstand

Die Kalibrierung von Prüfgeräten der elektrischen Sicherheit erfordert oft einen Bezug der Messergebnisse auf die Größe „Wechselstromwiderstand“. Dazu stehen vor Ort nicht nur die genannten Widerstandsdekaden sondern auch ausgemessene mobile Widerstandsboxen zur Verfügung, die für die Erzeugung der Kalibrierwerte für Schutzleiterwiderstand und Ableitstrom genutzt werden. Diese Testboxen sind gemäß Kapitel XI.2.3 auch im Wechselstrombereich bei 50 Hz kalibriert und charakterisiert. Obwohl der Wechselstromwert vor Ort nicht exakt verifiziert werden kann,

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: SF am: 08.01.2009	XXII Mobile Kalibrierung	3 von 3

kann durch eine vorangegangene DC-Messung Aufschluss über die Gültigkeit des kalibrierten Wertes gewonnen werden, da sich für induktionsarme Widerstände die ermittelten 50 Hz-Werte i.d.R. im Rahmen der Messunsicherheit nicht von den Gleichstromwerten unterscheiden. Es wird daher angenommen, dass die Messunsicherheit für die Bestimmung der 50 Hz Werte vor-Ort das 1,5 fache der Messunsicherheit des permanenten Laboratorium nicht überschreitet, sofern sich die Gleichstromwerte vor-Ort verifizierbar sind.

## **XXII.2.4 Temperatursimulatoren**

Analog zu Kapitel XVII (DKD-R 5-5) können Temperatursimulatoren am Multimeter kalibriert. Einfach gestaltet sich hierbei die Messung von Pt100-Simulatoren im 4-Draht-Verfahren. Die gemessenen Werte werden dann über die Grundwertgleichungen der DIN 60751 umgerechnet (z.B. Software JUMSENS) und es kann die Dokumentation der Ergebnisse direkt in °C erfolgen. Werden die elektrischen Unsicherheiten dem äquivalenten Intervall auf der Temperaturskala zugeordnet ergibt sich z.B.

<b>Ausgabe:</b>	<b>erstellt</b>	<b>geprüft/genehmigt</b>	<b>Kapitel</b>	<b>Seite</b>
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: SF am: 08.01.2009	XXII Mobile Kalibrierung	4 von 4

Kalibrierwert [°C]	R nach ITS-90 [Ω]	MU(R) [mΩ]	MU(R) [K]
-100	60,256	4,0	0,010
0	100,000	4,0	0,010
100	138,506	5,0	0,013
300	212,052	6,0	0,017
750	360,638	9,0	0,030

Genauso können Thermospannungen den entsprechenden Temperaturen zugeordnet werden. Die eingebaute Messfunktion des Fluke 5520A stellt jedoch eine komfortablere Möglichkeit zur direkten Anzeige des gemessenen Wertes in °C zur Verfügung. Daneben kann die Vergleichsstellenkompensation zur Messung von Geräten mit CJC genutzt werden.

## XXII.2.5 Stromstärke >1 A

Stromstärken größer 1 A werden indirekt über die Verwendung von Lastwiderständen bestimmt (vgl. Kapitel VI). Dazu stehen z.B. 10 mΩ, 50 mΩ und 100 mΩ Lasten >50 W zu Verfügung, deren Wert durch die Kalibrierung im Labor exakt bestimmt wurden. Offsetabweichungen bei Bestimmung der Stromstärke über die Zusammenhänge des ohmschen Gesetzes werden durch wiederholte Messungen vertauschter Polarität minimiert. Die relative Gesamtunsicherheit der Strommessung ergibt sich dann als quadratische Summe der relativen Einzelanteile. Mit der Modellgleichung

$$I_{Quelle} = \frac{U_{HP}}{R_{Shunt}} \cdot K_U \cdot K_{R,cal} \cdot K_{Drift} \cdot K_{Temp} \cdot K_f$$

formuliert sich das Messunsicherheitsbudget zu

$$w^2(I_{Quelle}) = w_U^2 + w_{cal}^2 + w_{Drift}^2 + w_{Temp}^2 + w_f^2$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: SF am: 08.01.2009	XXII Mobile Kalibrierung	5 von 5

## XXII.3 Direkte Kalibrierung am Multifunktionskalibrator Fluke 5520A-SC1100

### XXII.3.1 Kalibrierverfahren / Messunsicherheit DC-/NF-

Analog zu Kapitel III werden im direkten Anschluss Messgeräte im Gleichstrom- und Niederfrequenzbereich kalibriert. Die Anschlusstechnik ist gemäß XXII.2.1 zu wählen.

	Geräteeinstellung	Anschlusstechnik
alle Messungen	INSTRUMENT ZERO PSEUDO CAL	XXII.2.1

Das Messunsicherheitsbudget baut ebenfalls im Wesentlichen auf den von Fluke veröffentlichten Jahresspezifikationen auf, sofern diese im Rahmen der Kalibrierung nachgewiesen werden. Die Erfahrung zeigt dabei, dass es sich um eine „worst case“-Abschätzung handelt, da bei dem untersuchten Gerät in der Regel sogar die 90-Tages-Spezifikation im Jahresintervall nachgewiesen wird. Angegeben wird ein Temperaturintervall von  $\pm 5$  K gegenüber Kalibrier-/ Abgleichtemperatur, so dass unter den genannten Einsatzbedingungen keine weiteren Temperatureinflüsse zu berücksichtigen sind. Die **Modellgleichung** für direkte Messungen am Kalibrator wird dementsprechend formuliert zu:

$$Y - \Delta Y + \delta Y_{Res} = X + \delta X_{Res} + \delta X_{Drift} + \delta X_{Kal} + \delta X_{Verfahren}$$

mit

X eingestellter Wert (Kalibrierwert) am Normal Fluke 5520A

Y abgelesener Wert (Messwert) am Kalibriergegenstand

$\Delta Y$  Abweichung des Messwertes vom richtigen Wert

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis  $\Delta Y$  beizuzuschreibende erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ ) die **relative erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ )**:

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

### XXII.3.2 Temperaturanzeigergeräte

Analog zu Kapitel XVI (DKD-R 5-5) können Temperaturanzeigergeräte am Multifunktionskalibrator kalibriert werden. Die zugrundeliegenden Werte der Grundwertgleichungen der DIN 60751 bzw. DIN 60584 sind im Gerät hinterlegt und es kann eine Einstellung der Messwerte direkt in  $^{\circ}\text{C}$  erfolgen. Dabei wird angenommen, dass das Gerät die Kalibrierwerte direkt aus den elektrischen Basisgrößen generiert. Die Messunsicherheit wird demzufolge direkt einem Intervall auf der Temperaturskala zugeordnet:

#### Widerstandssimulation

4-Draht	Temperatur T	R(T)	MU(R)	MU(T)
Pt100	-200 $^{\circ}\text{C}$	18,520 $\Omega$	14 m $\Omega$	0,04 K
	-100 $^{\circ}\text{C}$	60,256 $\Omega$	18 m $\Omega$	0,04 K
	0 $^{\circ}\text{C}$	100,000 $\Omega$	22 m $\Omega$	0,06 K
	100 $^{\circ}\text{C}$	138,506 $\Omega$	26 m $\Omega$	0,07 K
	300 $^{\circ}\text{C}$	212,052 $\Omega$	34 m $\Omega$	0,1 K
	600 $^{\circ}\text{C}$	313,708 $\Omega$	44 m $\Omega$	0,14 K
	800 $^{\circ}\text{C}$	375,704 $\Omega$	109 m $\Omega$	0,4 K

Wird der eingestellte Widerstandswert vor der Messung am HP 3458A verifiziert, exakt gemessen und über die Grundwerttabellen der Temperatur zugeordnet, lassen sich diese Unsicherheiten sogar weiter verringern (s.XXII.2.3).

#### Thermoelementsimulation

Die Unsicherheit bei Simulation von Thermoelementen der gebräuchlichsten Typen (z.B. K, NiCr-Ni) wird aus der elektrischen Unsicherheit im 330 mV Bereich abgeleitet. Dies gilt zunächst falls keine Vergleichsstellenkompensation (CJC) verwendet wird, oder diese sowohl am Kalibriergegenstand als auch am Kalibrator ausgeschaltet wird (Anschluss über Kupfer, s. Bild XVI.2).

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: SF am: 08.01.2009	XXII Mobile Kalibrierung	6 von 6

Mini-TC-Port	Temperatur T	DC-U(T)	MU(DC-U)	MU(T)
CJC OFF Typ-K via Kupfer	-200 °C	-5891 µV	5 µV	0,4 K
	-100 °C	-3554 µV	5 µV	0,17 K
	0 °C	0 µV	5 µV	0,13 K
	100 °C	4096 µV	6 µV	0,12 K
	300 °C	12209 µV	6 µV	0,14 K
	600 °C	24905 µV	6 µV	0,15 K
	900 °C	37326 µV	7 µV	0,17 K
	1350 °C	54138 µV	8 µV	0,24 K

Sofern die Vergleichsstellenkompensation verwendet wird, muss neben einer Thermodrahtverbindung die interne Vergleichsstelle (Pt100, RJ intern) des Fluke 5520A aktiviert werden.

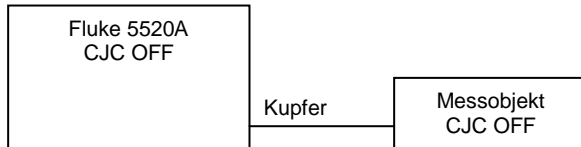


Bild XXII.2a Kalibrierung ohne Vergleichsstelle

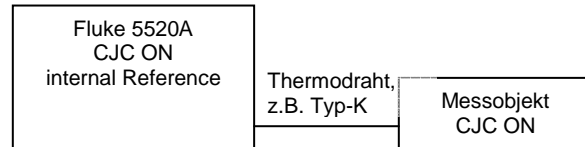


Bild XXII.2b Kalibrierung mit Vergleichsstelle

Dadurch formuliert sich die Modellgleichung zu

$$Y_{TC} - \Delta Y_{TC} + \delta Y_{TC,Res} = X_{TC} + \delta X_{TC} + \delta X_{RJ} + \delta X_{Verfahren}$$

und dem **Messunsicherheitsbudget**:

$$u^2(\Delta Y_{TC}) = u^2(\delta Y_{TC,Res}) + u^2(\delta X_{DC-U}) + u^2(\delta X_{RJ}) + u^2(\delta X_{Anschluss})$$

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis  $\Delta Y$  beizuordnende erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ ) die **absolute erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ )**:

$$U_{abs}(\Delta Y) = 2u(\Delta Y)$$

Identische Betrachtungen können für weitere Thermoelementtypen gemacht werden und sind in den mitgeltenden Messunsicherheitstabellen hinterlegt.

### XXII.3.3 Temperatursimulatoren

Das eingebaute „Measure“-Modul für Thermopaare erlaubt die Messung von Temperatursimulatoren am Mini-TC Eingang. Unter der Annahme, dass die Jahresspezifikationen erfüllt (Konformitätsnachweis der Kalibrierung) oder diese im Vergleich mit dem Präzisionsmultimeter HP 3458A vor der Messung validiert werden sind analog als Obergrenze die aus XXII.3.2 berechneten Werte zu erwarten.

### XXII.3.4 Gleichstromleistung / Wechselstromwirkleistung (s.a. Kapitel X)

Bei Entnahme von Gleichstromleistung im kombinierten Betrieb von Spannungs- und Stromausgang ergibt sich die Gesamtunsicherheit als Wurzel der quadratische Summe der relativen Einzelanteile („worst case“-bei überschneidenden Bereichen) zu

$$w^2(P) = w^2(U_{Out}) + w^2(I_{Out})$$

Dass diese Annahme auch im Wechselstromwirkleistungsbetrieb (Leistungsfaktor  $\cos\phi = 1$ , 45 Hz bis 60 Hz) bei Leistungsynthese mit Phasenkopplung Gültigkeit findet, wird durch die regelmäßige Kalibrierung des Leistungsnormal im Labor (ebenfalls Fluke 5520A) bestätigt, dessen tatsächlich gemessenen Abweichungen vom richtigen Wert nur einen Bruchteil der quadrierten Gesamtunsicherheit gemäß Konformität der Spezifikation aufweisen. Die Phasenkopplung (Phasensynchronisation) selbst wird im dualen Spannungsbetrieb darüber hinaus regelmäßig im Rahmen der Kalibrierung an einem zeitbasisstabilisierten Zähler durch Zeitintervallmessung verifiziert.

### XXII.3.5 Stromzangen / Zangenmultimeter

Für die Kalibrierung von Stromzangen und Zangenmultimeter finden die Verfahren und Angaben aus Kapitel XIX Anwendung. Über entsprechende Leitungswicklungen kann der am Kalibrator erzeugte Strom bei Zangenmessungen „vervielfacht“ werden. Demnach ergibt sich mit einer 50fachen Wicklung der Einsatzbereich von etwa

- 0,5 mA bis 550 A (DC) und
- 1 mA bis 550 A (AC, 50 Hz)

über Stromzangen, sofern die maximale induktive bzw. resistive Last des Kalibrators nicht überschritten wird. Mit dem zusätzlichen Anteil

$K_p$  Korrektionsfaktor durch das Streufeld der verwendeten Stromleitung bzw. Stromwicklung (max. 0,8 %)

und damit

$$w^2(I_{Clamp}) = w^2(I_{Out}) + w^2(K_p) = w^2(I_{Out}) + \left(\frac{0,8\%}{\sqrt{3}}\right)^2$$

ergibt sich eine Gesamtunsicherheit ( $k=2$ ) von etwa 1% in den meisten Bereichen.

### XXII.3.6 Oszilloskope – Vertikalablenkung (Amplitude)

Entsprechend Kapitel IX<sup>1</sup>, bzw. DKD 2622-4 erfolgt am Oszilloskopausgang des Kalibrators eine Kalibrierung aller Verstärkereinstellungen jeden Kanals (i.d.R. in 1 M $\Omega$ ) mit Aussteuerungen von 70 bis 80 % des Bildschirms. Ein zusätzlicher Abschluss mit 50  $\Omega$  des Eingangsmesskreises wird mindestens in einer Verstärkerstellung geprüft (z.B. 100 mV/ DIV, Aussteuerung).

<sup>1</sup> siehe auch Veröffentlichung esz-Weka: „Der Mess- und Prüfmittelbeauftragte“ Kapitel 5.2.2.2

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: SF am: 08.01.2009	XXII Mobile Kalibrierung	8 von 8

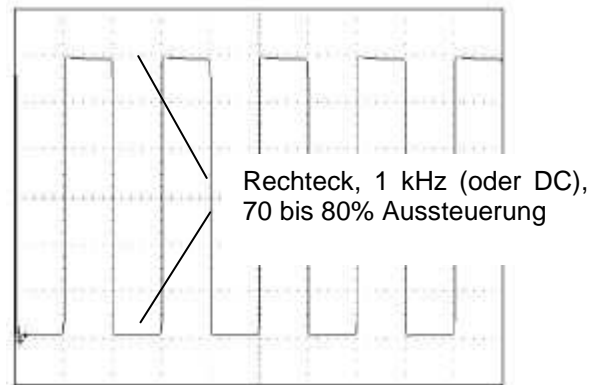
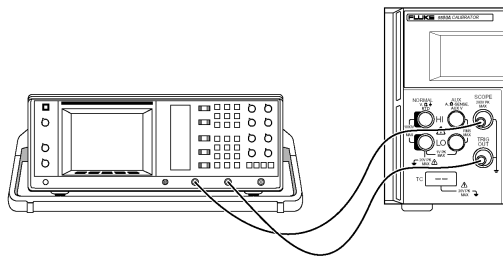


Bild XXII.3 Kalibrierung der Vertikalablenkung

Zur Bestimmung der Messunsicherheit formuliert sich entsprechend den Größen aus XXII.3.1 die **Modellgleichung** als

$$Y - \Delta Y + \delta Y_{Res} = X + \delta X_{Res} + \delta X_{Drift} + \delta X_{Kal} + \delta X_{Verfahren} + \delta X_{Mismatch}$$

**Messunsicherheitsbudget:**

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich mit allen Sensitivitätskoeffizienten  $|c_i|=1$  und  $\delta X_{Res}=0$  daraus:

$$u^2(\Delta Y) = u^2(Y) + u^2(\delta Y_{Res}) + u^2(\delta X_{Drift}) + u^2(\delta X_{Kal}) + u^2(\delta X_{Verfahren}) + u^2(\delta X_{Mismatch})$$

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis  $\Delta Y$ beizuordnende erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ ) die **relative erweiterte Messunsicherheit (k=2)**:

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

**XXII.3.7 Oszilloskope – Horizontalablenkung (Zeitbasis)**

Der Kalibrator stellt hierzu Zeitmarker im Abstand der gewählten Ablenkungsgeschwindigkeit her. Es erfolgt eine Ablesung am Oszilloskop über ebenfalls 70 bis 80 % horizontaler Aussteuerung (z.B. 8 Skalenteile) und Ermittlung der Abweichung gegenüber dem Referenzsignal über das Bildschirmgitter, Marker, Cursor oder „Measurement“-Funktion.

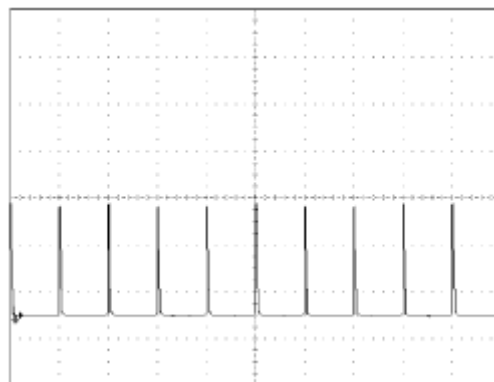


Bild XXII.4 Kalibrierung der Horizontalablenkung

Für die Ermittlung der Messunsicherheit kann die **Modellgleichung aus XXII.3.6** verwendet werden. Jitter- und Trigger-Abweichungen ( $\delta X_{Verfahren}$ ) bewegen sich bei guten Sampling-Oszilloskopen oft unterhalb von 1 ppm und werden daher gegenüber der Ableseschärfe vernachlässigt. Durch die Digitalisierung des Signals mit mindestens 1 GS/s ergibt sich allerdings eine Verfahrensabhängiger Abweichung von  $\pm(0,5ns/8 DIV)=63ps$ .

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.2009	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: SF am: 08.01.2009	<b>Kapitel</b> XXII Mobile Kalibrierung	<b>Seite</b> 9 von 9
---------------------------	--	--	--	-------------------------

### XXII.3.8 Oszilloskope – Frequenzgang und Bandbreite

Zur Kalibrierung des Frequenzganges und der Bandbreite von Oszilloskopen besitzt der Kalibrator einen intern geregelten Sinusgenerator („leveled sine“) bis 300 MHz. Der Frequenzgang wird vom NF-Betrieb ausgehend (50 kHz) an ausgewählten Punkten im Betriebsbereich des Kalibriergegenstandes bis zur nominellen Grenzfrequenz aufgenommen. Die Grenzfrequenz (-3dB-Bandbreite) bestimmt sich aus dem Abfall des Anzeigewertes bei konstanter Eingangsspannung auf 70,7% vom Referenzwert, z.B. 3,54 Skalenteile bei einer anfänglichen Aussteuerung von fünf Skalenteilen.

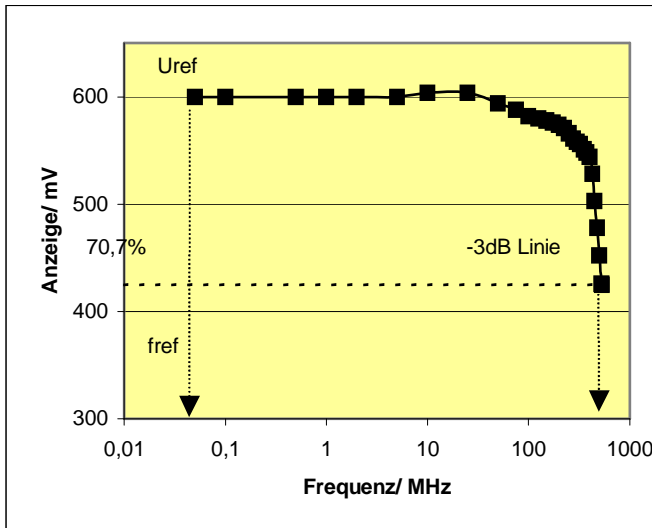


Bild XXII.5a typischer Anzeigeverlauf bei Frequenzgangmessung am Oszilloskop

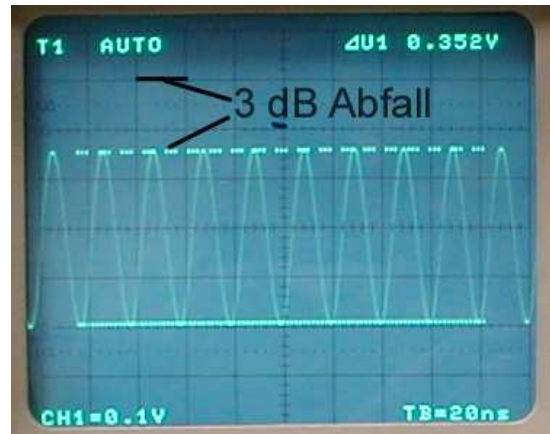


Bild XXII.5b Anzeige bei Grenzfrequenz -3dB

Ähnlich wie in XXII.3.6 formuliert sich die **Modellgleichung** bei Frequenzgangmessung

$$Y - \Delta Y + \delta Y_{Res} = X + \delta X_{Res} + \delta X_{Drift} + \delta X_{Kal} + \delta X_{Verfahren} + \delta X_{Mismatch}$$

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.2009	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: SF am: 08.01.2009	<b>Kapitel</b> XXII Mobile Kalibrierung	<b>Seite</b> 10 von 10
---------------------------	--	--	--	---------------------------

**Messunsicherheitsbudget:**

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich mit allen Sensitivitätskoeffizienten  $|c_i|=1$  und  $\delta X_{Res}=0$  daraus:

$$u^2(\Delta Y) = u^2(Y) + u^2(\delta Y_{Res}) + u^2(\delta X_{Drift}) + u^2(\delta X_{Kal}) + u^2(\delta X_{Verfahren}) + u^2(\delta X_{Mismatch})$$

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis  $\Delta Y$  beizuordnende erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ ) die **relative erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ ):**

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

**XXII.3.9 Widerstände – indirekt (vgl. Kapitel VII)**

Über die indirekte Messung von Widerständen im Konstantstromverfahren bei Messung des Spannungsabfalls am Multimeter lässt sich die relative Gesamtunsicherheit durch die Einzelanteile von Stromerzeugung und Spannungsmessung ausdrücken:

$$W^2(R_{U/I}) = W_U^2 + W_I^2$$

Offsetabweichungen werden dabei minimiert, indem mehrere Messungen wechselnder Polarität durchgeführt werden und deren Mittelwert gebildet wird. Thermische Effekte lassen sich dementsprechend durch die Standardunsicherheit der Mittelwertbildung zusätzlich berücksichtigen, finden für die kleinste angebbare Messunsicherheit im idealen Fall zunächst keine Anwendung.

Werden darüberhinaus Festwiderstände (Burster 1284) auf diese Weise eingemessen, so sind diese Unsicherheiten ebenfalls bei der Kalibrierung von Messgeräten anwendbar, unter der Annahme, dass Kurzzeitstabilität und Thermoelektrische Effekte vernachlässigbar klein bleiben.

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.2009	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: SF am: 08.01.2009	<b>Kapitel</b> XXII Mobile Kalibrierung	<b>Seite</b> 11 von 11
---------------------------	--	--	--	---------------------------

## XXII.4 Direkte Messung am Oszilloskop Tektronix TDS 3052B

### XXII.4.1 Ablenkung (horizontal / vertikal)

In Sonderfällen oder zur Bestimmung von Kurvenformen kann es nötig sein Signale direkt am Oszilloskop (500 MHz, 5 GS/s) zu bestimmen (s.a. IX.3.1). Unter Berücksichtigung der Anzeigeunschärfe und möglichen Fehlanpassungen am Eingang (s.a. XII.3.8) kann modifiziert die **Modellgleichung aus XII.2.2** verwendet werden.

$$Y - \Delta Y + \delta Y_{Res} = X + \delta X_{Res} + \delta X_{Spez} + \delta X_{Konf} + \delta X_{Verfahren} + \delta X_{Mismatch}$$

#### Messunsicherheitsbudget:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich mit allen Sensitivitätskoeffizienten  $|c_i|=1$  und  $\delta Y_{Res}=0$  daraus:

$$u^2(\Delta Y) = u^2(Y) + u^2(\delta X_{Res}) + u^2(\delta X_{Drift}) + u^2(\delta X_{Kal}) + u^2(\delta X_{Verfahren}) + u^2(\delta X_{Mismatch})$$

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.2009	<b>geprüft/genehmigt</b> von: SF am: 08.01.2009	<b>Kapitel</b> XXII Mobile Kalibrierung	<b>Seite</b> 12 von 12
---------------------------	--	---	--	---------------------------

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis  $\Delta Y$  beizuordnende erweiterte Messunsicherheit (k=2) die **relative erweiterte Messunsicherheit (k=2)**:

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

## XXII.4.2 Anstiegszeit

Die Anstiegszeit eines Rechtecksignals charakterisiert die Zeit, die ein Impuls benötigt um von 10 % auf 90 % des Maximalwertes anzusteigen. Die Messung erfolgt direkt am Oszilloskop, bei hoher horizontaler Auflösung und kann bereits direkt über die „Measurement“-Funktion angezeigt werden. Um Triggerabweichungen zu minimieren sollte im Idealfall mit externem Trigger oder über mehrere Messungen im Betrieb „Single“ gemittelt werden.

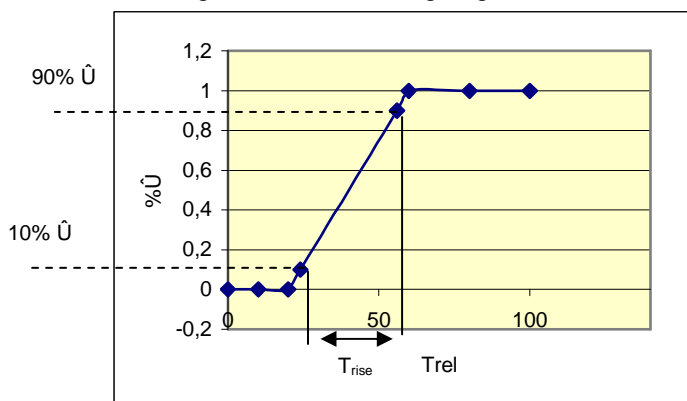


Bild XXII.6a Anstiegszeit

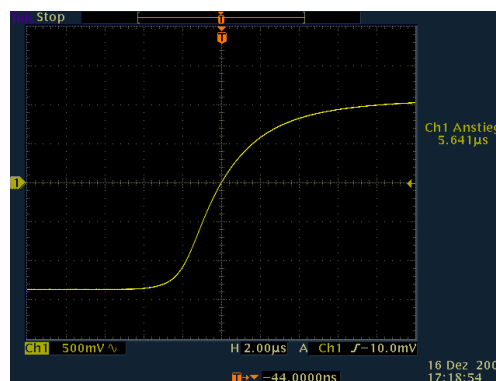


Bild XXII.6 Anstiegszeit am Oszilloskop

Die Modellgleichung bei Anstiegszeitmessung wird formuliert als

$$T_{gemessen} = T_{Signal} + \delta T_{Res} + \delta T_{System} + \delta T_{Amplitude} + \delta T_{TB} + \delta T_{Trigger} + \delta T_{Sample}$$

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis  $\Delta Y$  beizuordnende erweiterte Messunsicherheit (k=2) die **relative erweiterte Messunsicherheit (k=2)**:

$$W_{rel}(T_{Signal}) = 2 \frac{u(T_{Signal})}{T_{Signal}}$$

## XXII.5 Frequenzsynthese und Messung (s.a. Kapitel XIII)

### XXII.5.1 Messunsicherheit Frequenzsynthese

Zur Synthese von elektrischen Frequenzen stehen vor Ort die zwei Generatoren Rohde&Schwarz SME 03 und HP 8672A bis 3 GHz bzw. 18 GHz zur Verfügung. Der SME03 verfügt darüberhinaus über einen NF-Generator (Option B2), so dass der gesamte Frequenzbereich von 0,01 Hz bis 18 GHz beispielsweise für die Kalibrierung von Zählern abgedeckt werden kann. Die Synchronisation erfolgt dabei immer über die 10 MHz-Referenzzeitbasis des SME03.

Da bekannt ist, dass die digitale Frequenzsynthese neben den Abweichungen der Referenzfrequenz und Triggerunsicherheit am Kalibriergegenstand keine weiteren Anteile liefern kann die Modellgleichung als

$$f_{gemessen} + \Delta f = f_{eingestellt} + \delta f_{Res} + \delta f_{Trigger} + \delta f_{TB} + \delta f_{Kal} + \delta f_{aging}$$

formuliert werden.

#### Messunsicherheitsbudget:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich mit allen Sensitivitätskoeffizienten  $|c_i|=1$  und  $\delta X_{Res}=0$  daraus:

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: SF am: 08.01.2009	XXII Mobile Kalibrierung	13 von 13

$$u^2(\Delta f) = u^2(\delta_{Res}^*) + u^2(\delta_{Trigger}^*) + u^2(\delta_{TB}^*) + u^2(\delta_{Kal}^*) + u^2(\delta_{aging}^*)$$

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis  $\Delta f$  beizuordnende erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ ) die **relative erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ ):**

$$W_{rel}(\Delta f) = 2 \frac{u(\Delta f)}{f_{eingestellt}}$$

## XXII.5.2 Messunsicherheit Frequenzmessung

Bei Synchronisation des Zählers über den Ofenquarz des SME03 muss die in XXII.5.1 bestimmte Messunsicherheit lediglich um die Ableseunschärfe und Triggerabweichungen am Zähler ergänzt werden:

$$u^2(\Delta f_{Zählmessung}^*) = u^2(\Delta f_{Synthese}^*) + u^2(\delta_{Res}^*) + u^2(\delta_{Trigger}^*)$$

Da diese Anteile gegenüber der ermittelten Unsicherheit aus XXII.5.1 hinreichend klein ist ergibt sich im Frequenzbereich bis 1,5 GHz ein identisches Ergebnis. Die ermittelte Messunsicherheit ist darüberhinaus für die Periodendauermessung übertragbar.

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.2009	<b>geprüft/genehmigt</b> von: SF am: 08.01.2009	<b>Kapitel</b> XXII Mobile Kalibrierung	<b>Seite</b> 14 von 14
---------------------------	--	---	--	---------------------------

## XXII.6 Kalibrierung von HF-Leistungsquellen

### XII.6.1 Direkte Messung von HF-Leistung

Zur Kalibrierung von HF-Leistungsquellen steht ein Leistungsmesssystem bestehend aus

- Anzeigegerät Rohde & Schwarz NRVS
- thermischer Leistungssensor Rohde & Schwarz NRV-Z51
- Dioden-Leistungssensor Rohde & Schwarz NRV-Z1

zu Verfügung, das gegen die Primärnormale Rohde & Schwarz NRVC (NRV-Z1/Z51) des permanenten Labors (s Kapitel XIII.2) kalibriert ist. Vor-Ort wird dieses System für die Kalibrierung von Quellen bis 6 GHz eingesetzt (vgl. XIII.1). Um den Transport der Gebrauchsnormale und einen möglichen Einfluss auf die Kalibrierung bewerten zu können unterliegen die Sensoren der regelmäßigen Zwischenprüfung gegen das Referenzsystem R&S NRVC/ Z1/ Z51. Bisher sind Auswirkungen auf die Messergebnisse durch den Transport nicht beobachtet worden.

Kalibriert und im Kalibrierschein dokumentiert wird der Kalibrierungsfaktor  $K_2$  der Leistungsquelle (siehe Kapitel XIII.1) bezogen auf die abgegebene Leistung. Bei Abschluss mit  $Z_0=50 \Omega$  gilt.

$$K_2 = \frac{P_{ind}}{P_{Z_0}} \text{ mit}$$

$P_{ind}$ : am Generator angezeigte (indicated ind.) oder eingestellte Leistung

$P_{Z_0}$ : Ausgangsleistung des Generators oder Quelle bei Abschluss mit  $Z_0$  (Frequenzgang-korrigierte Anzeige in Watt am NRVS) zu

$$P_{Z_0} = \frac{P_{ind,NRVS} - \delta P_{ind,NRVS} - \delta P_{Offset} - \delta P_{ind,noise}}{\eta_N \cdot p_\eta} \cdot P_{Drift} \cdot P_{Lin} \cdot P_{Linf} \cdot P_{Temp} \cdot P_{mismatch} \cdot P_{Harm} \cdot P_{GG} \cdot P_{Kal,GG} \cdot P_{Conn}$$

### XII.6.2 HF-Spannung

Gemäß den Betrachtungen aus XIII.1.6 kann die Unsicherheit bei Umrechnung der gemessenen Leistung bei Annahme idealen  $Z_0=50\Omega$  in HF-Spannung als

$$\frac{U(U_{Z_0})}{U_{Z_0}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U(P_{Z_0})}{P_{Z_0}} = \frac{W(K_2)}{2}$$

aus der Unsicherheit der Leistungsmessung formuliert werden.

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.2009	<b>geprüft/genehmigt</b> von: SF am: 08.01.2009	<b>Kapitel</b> XXII Mobile Kalibrierung	<b>Seite</b> 15 von 15
---------------------------	--	---	--	---------------------------

## XII.7 Ergebnisse

Die exakten Berechnungen und deren zahlenmäßigen Ergebnisse werden in der mitgeltenden Excel-Tabelle

### „Messunsicherheiten XXII – vor-Ort.xls“

ermittelt und dokumentiert. Die Ergebnisse werden als Obergrenze oder interpoliert formuliert und daneben im Leistungsnachweis des Laboratoriums geführt.

Messgröße / Kalibriergegenstand	Messbereich / Messspanne	Messbedingungen / Verfahren	kleinste angebbare Messunsicherheit	Bemerkungen
Gleichspannung Quellen	0 V	nach Kurzschluss	3,5 $\mu$ V	mit HP 3458A
	>0 V bis 250 mV		5 $\mu$ V	
	>250 mV bis 1 V		$1,1 \cdot 10^{-5} \cdot U + 2 \mu$ V	
	>1 V bis 11 V		$1,5 \cdot 10^{-5} \cdot U$	
	>11 V bis 110 V		$2,1 \cdot 10^{-5} \cdot U$	
Funktionsgeneratoren	>110 V bis 1000 V		$3,4 \cdot 10^{-5} \cdot U$	mit HP 3458A in 50 $\Omega$
	>5 mV bis 110 mV		$3,1 \cdot 10^{-4} \cdot U + 2 \mu$ V	
Messgeräte	>110 mV bis 11 V		$3,3 \cdot 10^{-4} \cdot U$	mit Fluke 5520A
	0 V bis 10 mV		5 $\mu$ V	
	>10 mV bis 33 mV		7 $\mu$ V	
	>33 mV bis 330 mV		$6,9 \cdot 10^{-5} \cdot U + 4,5 \mu$ V	
	>330 mV bis 3,3 V		$3,7 \cdot 10^{-6} \cdot U + 63 \mu$ V	
	>3,3 V bis 33 V		$6,7 \cdot 10^{-6} \cdot U + 0,14$ mV	
Gleichstromstärke Quellen	>33 V bis 330 V		$1,6 \cdot 10^{-5} \cdot U + 1,2$ mV	mit HP 3458A
	>330 V bis 1020 V		$3,9 \cdot 10^{-5} \cdot U$	
	0 A		1 nA	
	1 $\mu$ A bis <10 $\mu$ A		$9,7 \cdot 10^{-4} \cdot I + 0,23$ nA	
	10 $\mu$ A bis 110 $\mu$ A		$1,4 \cdot 10^{-4} \cdot I + 3,7$ nA	
	>110 $\mu$ A bis 1,1 mA		$1,3 \cdot 10^{-5} \cdot I + 35$ nA	
	>1,1 mA bis 11 mA		$6,1 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0,3 \mu$ A	
Messgeräte	>11 mA bis 110 mA		$9,9 \cdot 10^{-5} \cdot I + 2,7 \mu$ A	mit Fluke 5520A
	>110 mA bis 1 A		$1,6 \cdot 10^{-4} \cdot I + 28 \mu$ A	
	>1 A bis 20 A	über Shunt	$1,3 \cdot 10^{-3} \cdot I$	
	0 A bis <300 $\mu$ A		100 nA	
	300 $\mu$ A bis 3,3 mA		$1,6 \cdot 10^{-4} \cdot I + 60$ nA	
	>3,3 mA bis 33 mA		$2,2 \cdot 10^{-4} \cdot I$	
Stromzangen	>33 mA bis 330 mA		$2,5 \cdot 10^{-4} \cdot I$	mit Fluke 5520A
	>330 mA bis 2,2 A		$5,3 \cdot 10^{-4} \cdot I$	
Gleichstromwiderstand	>2,2 A bis 11 A		$1,0 \cdot 10^{-3} \cdot I$	
Widerstände	300 $\mu$ A bis 550 A		1 % · I	HP 3458A
	0 $\Omega$		1 m $\Omega$	Konstantstrom- verfahren
	0 $\Omega$ bis <1 m $\Omega$	I konst. 10 A	1 $\mu$ $\Omega$	
	1 m $\Omega$ bis <10 m $\Omega$	I konst. 1 A bis 10 A	$9,3 \cdot 10^{-4} \cdot R$	
	10 m $\Omega$ bis 1 $\Omega$	I konst. 1 A	$5,5 \cdot 10^{-4} \cdot R$	
	>1 $\Omega$ bis 10 $\Omega$		$2,0 \cdot 10^{-5} \cdot R + 0,4$ m $\Omega$	
	>10 $\Omega$ bis 110 $\Omega$		$1,2 \cdot 10^{-5} \cdot R + 3,4$ m $\Omega$	
	>110 $\Omega$ bis 11 k $\Omega$		$4,1 \cdot 10^{-5} \cdot R$	
	>11 k $\Omega$ bis 110 k $\Omega$		$3,2 \cdot 10^{-5} \cdot R$	
	>110 k $\Omega$ bis 1,1 M $\Omega$		$1,1 \cdot 10^{-4} \cdot R$	
>1,1 M $\Omega$ bis 11 M $\Omega$		$2,8 \cdot 10^{-4} \cdot R$		
Messgeräte	>11 M $\Omega$ bis 110 M $\Omega$		$8,5 \cdot 10^{-4} \cdot R$	HP 3458A
	1 m $\Omega$		$9,3 \cdot 10^{-4} \cdot R$	
	10 m $\Omega$		$5,5 \cdot 10^{-4} \cdot R$	
	100 m $\Omega$		$4,3 \cdot 10^{-4} \cdot R$	
	1 $\Omega$		$4,3 \cdot 10^{-4} \cdot R$	
	0 $\Omega$ bis 10 $\Omega$		8,5 m $\Omega$	
	>10 $\Omega$ bis 110 $\Omega$		$1,0 \cdot 10^{-4} \cdot R + 12$ m $\Omega$	
	>110 $\Omega$ bis 330 $\Omega$		$2,1 \cdot 10^{-4} \cdot R$	
	>330 $\Omega$ bis 3,3 k $\Omega$		$1,0 \cdot 10^{-4} \cdot R + 69$ m $\Omega$	
	>3,3 k $\Omega$ bis 11 k $\Omega$		$1,1 \cdot 10^{-4} \cdot R + 0,7 \mu$ $\Omega$	
	>11 k $\Omega$ bis 33 k $\Omega$		$2,9 \cdot 10^{-4} \cdot R$	
	>33 k $\Omega$ bis 330 k $\Omega$		$1,4 \cdot 10^{-4} \cdot R + 6,5 \mu$ $\Omega$	
	>330 k $\Omega$ bis 3,3 M $\Omega$		$2,0 \cdot 10^{-4} \cdot R + 66 \mu$ $\Omega$	
	>3,3 M $\Omega$ bis 33 M $\Omega$		$1,4 \cdot 10^{-3} \cdot R$	
Messgeräte	>33 M $\Omega$ bis 110 M $\Omega$		$6,0 \cdot 10^{-3} \cdot R$	Fluke 5520A
	1 $\Omega$ bis 10 $\Omega$		$1,2 \cdot 10^{-5} \cdot R + 0,7 \mu$ $\Omega$	

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.2009	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: SF am: 08.01.2009	<b>Kapitel</b> XXII Mobile Kalibrierung	<b>Seite</b> 16 von 16
---------------------------	--	--	--	---------------------------

Messgröße / Kalibriergegenstand	Messbereich / Messspanne	Messbedingungen / Verfahren	kleinste angebbare Messunsicherheit	Bemerkungen	
	>10 Ω bis 110 Ω		$6,9 \cdot 10^{-6} \cdot R + 6,9 \text{ m}\Omega$	eingemessene Dekade	
	>110 Ω bis 1,1 kΩ		$1,8 \cdot 10^{-5} \cdot R + 5,5 \text{ m}\Omega$		
	>1,1 kΩ bis 11 kΩ		$1,7 \cdot 10^{-5} \cdot R + 56 \text{ m}\Omega$		
	>11 kΩ bis 110 kΩ		$3,4 \cdot 10^{-5} \cdot R$		
Wechselspannung Quellen	10 mV bis 110 mV	40 Hz bis 1 kHz	$1,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 69 \mu\text{V}$	HP 3458A in 1 MΩ	
		>1 kHz bis 20 kHz	$1,7 \cdot 10^{-4} \cdot U + 69 \mu\text{V}$		
		>20 kHz bis 50 kHz	$3,4 \cdot 10^{-4} \cdot U + 67 \mu\text{V}$		
		>50 kHz bis 100 kHz	$1,2 \cdot 10^{-3} \cdot U + 60 \mu\text{V}$		
		>100 kHz bis 300 kHz	$3,5 \cdot 10^{-3} \cdot U + 50 \mu\text{V}$		
		>300 kHz bis 1 MHz	$1,5\% \cdot U$		
	>110 mV bis 1,1 V	40 Hz bis 1 kHz	$1,7 \cdot 10^{-4} \cdot U + 18 \mu\text{V}$		
		>1 kHz bis 20 kHz	$2,2 \cdot 10^{-4} \cdot U + 21 \mu\text{V}$		
		>20 kHz bis 50 kHz	$4,0 \cdot 10^{-4} \cdot U + 22 \mu\text{V}$		
		>50 kHz bis 100 kHz	$1,2 \cdot 10^{-3} \cdot U$		
		>100 kHz bis 300 kHz	$4,6 \cdot 10^{-3} \cdot U$		
		>300 kHz bis 1 MHz	$1,3\% \cdot U$		
	>1,1 V bis 11 V	40 Hz bis 1 kHz	$1,7 \cdot 10^{-4} \cdot U + 18 \mu\text{V}$		
		>1 kHz bis 20 kHz	$2,2 \cdot 10^{-4} \cdot U + 21 \mu\text{V}$		
		>20 kHz bis 50 kHz	$6,7 \cdot 10^{-4} \cdot U$		
		>50 kHz bis 100 kHz	$1,6 \cdot 10^{-3} \cdot U$		
>100 kHz bis 300 kHz		$4,7 \cdot 10^{-3} \cdot U$			
>300 kHz bis 1 MHz		$1,3\% \cdot U$			
>11 V bis 110 V	40 Hz bis 1 kHz	$2,8 \cdot 10^{-4} \cdot U + 2,2 \text{ mV}$			
	>1 kHz bis 20 kHz	$4,8 \cdot 10^{-4} \cdot U$			
	>20 kHz bis 50 kHz	$7,0 \cdot 10^{-4} \cdot U$			
	>50 kHz bis 100 kHz	$1,7 \cdot 10^{-3} \cdot U$			
	>100 kHz bis 300 kHz	$1,7 \cdot 10^{-3} \cdot U$			
	>300 kHz bis 1 MHz	$1,7 \cdot 10^{-3} \cdot U$			
>110 V bis 700 V	40 Hz bis 1 kHz	$7,0 \cdot 10^{-4} \cdot U$			
	>1 kHz bis 20 kHz	$9,2 \cdot 10^{-4} \cdot U$			
Funktionsgeneratoren Sinus RMS	10 mV bis 110 mV	40 Hz bis 1 kHz	$2,2 \cdot 10^{-4} \cdot U + 68 \mu\text{V}$	HP 3458A in 50 Ω	
		>1 kHz bis 20 kHz	$2,4 \cdot 10^{-4} \cdot U + 68 \mu\text{V}$		
		>20 kHz bis 50 kHz	$3,9 \cdot 10^{-4} \cdot U + 69 \mu\text{V}$		
		>50 kHz bis 100 kHz	$1,3 \cdot 10^{-3} \cdot U + 60 \mu\text{V}$		
		>100 kHz bis 300 kHz	$3,5 \cdot 10^{-3} \cdot U + 50 \mu\text{V}$		
		>300 kHz bis 1 MHz	$1,5\% \cdot U$		
	>110 mV bis 1,1 V	40 Hz bis 1 kHz	$4,7 \cdot 10^{-4} \cdot U$		
		>1 kHz bis 20 kHz	$5,2 \cdot 10^{-4} \cdot U$		
		>20 kHz bis 50 kHz	$6,8 \cdot 10^{-4} \cdot U$		
		>50 kHz bis 100 kHz	$1,2 \cdot 10^{-3} \cdot U$		
		>100 kHz bis 300 kHz	$4,6 \cdot 10^{-3} \cdot U$		
		>300 kHz bis 1 MHz	$1,3\% \cdot U$		
	>1,1 V bis 7 V	40 Hz bis 1 kHz	$4,7 \cdot 10^{-4} \cdot U$		
		>1 kHz bis 20 kHz	$5,2 \cdot 10^{-4} \cdot U$		
		>20 kHz bis 50 kHz	$7,4 \cdot 10^{-4} \cdot U$		
		>50 kHz bis 100 kHz	$1,6 \cdot 10^{-3} \cdot U$		
		>100 kHz bis 300 kHz	$4,7 \cdot 10^{-3} \cdot U$		
		>300 kHz bis 1 MHz	$1,3\% \cdot U$		
5 mV bis 50 mV	10 MHz bis 800 MHz	$1,6\% \cdot U$	R&S NRV-Z1 BNC-Konnektor, $Z_0=50\Omega$		
	>800 MHz bis 2 GHz	$3,6\% \cdot U$			
	>10 MHz bis 2 GHz	$1,5\% \cdot U$		N-Konnektor	
	>2 GHz bis 4 GHz	$2,3\% \cdot U$			
	>50 mV bis 2 V	>4 GHz bis 6 GHz	$4,2\% \cdot U$	R&S NRV-Z51, BNC- Konnektor $Z_0=50\Omega$ ,	
		>300 kHz bis 350 MHz	$1,2\% \cdot U$		
		>350 MHz bis 800 MHz	$1,3\% \cdot U$		
		>350 MHz bis 2 GHz	$1,5\% \cdot U$		
		DC bis 2 GHz	$1,2\% \cdot U$		N-Konnektor $r_G \leq 0,2$
		>2 GHz bis 4 GHz	$1,5\% \cdot U$		$r_G \leq 0,3$
Kurvenform	5 mV bis 100 V	DC bis 10 MHz	$2,5\% \cdot U + 0,7 \mu\text{V}$	Tektronix TDS3052B	
		>10 MHz bis 200 MHz	$6\% \cdot U + 0,3 \mu\text{V}$		
Zeitintervall	10 ns bis 100 s		$0,6\% \cdot T + 70\text{ps}$		
Anstiegszeit	2 ns bis 10 ms		$3\% \cdot T + 150 \text{ps}$		
Wechselspannung	33 mV bis 330 mV	10 Hz bis <45 Hz	$5,6 \cdot 10^{-3} \cdot U$	Fluke 5520A	

Messgröße / Kalibriergegenstand	Messbereich / Messspanne	Messbedingungen / Verfahren	kleinste angebbare Messunsicherheit	Bemerkungen		
Messgeräte		45 Hz bis 10 kHz	$4,6 \cdot 10^{-4} \cdot U + 97 \mu\text{V}$			
		>10 kHz bis 20 kHz	$1,0 \cdot 10^{-3} \cdot U + 87 \mu\text{V}$			
		>20 kHz bis 50 kHz	$1,8 \cdot 10^{-3} \cdot U + 91 \mu\text{V}$			
		>50 kHz bis 100 kHz	$3,0 \cdot 10^{-3} \cdot U + 0,2 \text{ mV}$			
		>100 kHz bis 500 kHz	$8,4 \cdot 10^{-3} \cdot U + 0,4 \text{ mV}$			
	>330 mV bis 3,3 V	10 Hz bis <45 Hz	$2,7 \cdot 10^{-3} \cdot U$			
		45 Hz bis 10 kHz	$3,4 \cdot 10^{-4} \cdot U + 0,2 \text{ mV}$			
		>10 kHz bis 20 kHz	$9,1 \cdot 10^{-4} \cdot U + 0,1 \text{ mV}$			
		>20 kHz bis 50 kHz	$1,6 \cdot 10^{-3} \cdot U + 0,4 \text{ mV}$			
		>50 kHz bis 100 kHz	$2,8 \cdot 10^{-3} \cdot U + 2 \text{ mV}$			
	>3,3 V bis 33 V	10 Hz bis <45 Hz	$2,7 \cdot 10^{-3} \cdot U$			
		45 Hz bis 10 kHz	$4,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 1,7 \text{ mV}$			
		>10 kHz bis 20 kHz	$9,2 \cdot 10^{-4} \cdot U + 3,5 \text{ mV}$			
		>20 kHz bis 50 kHz	$2,2 \cdot 10^{-3} \cdot U + 6 \text{ mV}$			
		>50 kHz bis 100 kHz	$3,0 \cdot 10^{-3} \cdot U + 19 \text{ mV}$			
	>33 V bis 330 V	45 Hz bis 1 kHz	$5,8 \cdot 10^{-4} \cdot U + 10 \text{ mV}$			
		>1 kHz bis 10 kHz	$9,3 \cdot 10^{-4} \cdot U + 19 \text{ mV}$			
		>10 kHz bis 20 kHz	$1,0 \cdot 10^{-3} \cdot U + 39 \text{ mV}$			
	>330 V bis 1020 V	45 Hz bis 1 kHz	$8,7 \cdot 10^{-4} \cdot U$			
		>1 kHz bis 5 kHz	$2,7 \cdot 10^{-3} \cdot U$			
Wechselstromstärke Quellen	10 $\mu\text{A}$ bis 110 $\mu\text{A}$	20 Hz bis <45 Hz	$1,9 \cdot 10^{-3} \cdot I + 34 \text{ nA}$	HP 3458A		
		45 Hz bis 1 kHz	$7,9 \cdot 10^{-4} \cdot I + 34 \text{ nA}$			
	>110 $\mu\text{A}$ bis 1,1 mA	20 Hz bis <45 Hz	$3,9 \cdot 10^{-3} \cdot I$			
		45 Hz bis <100 Hz	$3,6 \cdot 10^{-3} \cdot I$			
		100 Hz bis 5 kHz	$3,4 \cdot 10^{-3} \cdot I$			
		>5 kHz bis 20 kHz	$1,5 \cdot 10^{-3} \cdot I + 0,2 \mu\text{A}$			
	>1,1 mA bis 11 mA	20 Hz bis <45 Hz	$3,9 \cdot 10^{-3} \cdot I$			
		45 Hz bis <100 Hz	$7,4 \cdot 10^{-4} \cdot I + 2,3 \mu\text{A}$			
		100 Hz bis 5 kHz	$4,0 \cdot 10^{-4} \cdot I + 2,3 \mu\text{A}$			
		>5 kHz bis 20 kHz	$4,0 \cdot 10^{-3} \cdot I$			
	>11 mA bis 110 mA	20 Hz bis <45 Hz	$1,8 \cdot 10^{-3} \cdot I + 23 \mu\text{A}$			
		45 Hz bis <100 Hz	$7,4 \cdot 10^{-4} \cdot I + 23 \mu\text{A}$			
		100 Hz bis 5 kHz	$4,0 \cdot 10^{-4} \cdot I + 23 \mu\text{A}$			
		>5 kHz bis 20 kHz	$4,0 \cdot 10^{-3} \cdot I$			
	>110 mA bis 1 A	20 Hz bis <45 Hz	$2,1 \cdot 10^{-3} \cdot I$			
		45 Hz bis 100 Hz	$1,4 \cdot 10^{-3} \cdot I$			
		>100 Hz bis 5 kHz	$1,6 \cdot 10^{-3} \cdot I$			
	>1 A bis 20 A		45 Hz bis 65 Hz		$1,6 \cdot 10^{-3} \cdot I$	über Shunt

Messgröße / Kalibriergegenstand	Messbereich / Messspanne	Messbedingungen / Verfahren	kleinste angebbare Messunsicherheit	Bemerkungen	
Messgeräte	33 µA bis 330 µA	20 Hz bis <45 Hz	$1,1 \cdot 10^{-3} \cdot I + 1,1 \mu A$	Fluke 5520A	
		45 Hz bis 1 kHz	$7,7 \cdot 10^{-4} \cdot I + 1,2 \mu A$		
		>1 kHz bis 5 kHz	$3,0 \cdot 10^{-3} \cdot I + 1,1 \mu A$		
	>330 µA bis 3,3 mA	20 Hz bis <45 Hz	$2,0 \cdot 10^{-3} \cdot I + 1,3 \mu A$		
		45 Hz bis 1 kHz	$1,0 \cdot 10^{-3} \cdot I + 1,6 \mu A$		
		>1 kHz bis 5 kHz	$2,1 \cdot 10^{-3} \cdot I + 1,4 \mu A$		
	>3,3 mA bis 33 mA	>5 kHz bis 10 kHz	$9,6 \cdot 10^{-3} \cdot I$		
		20 Hz bis <45 Hz	$1,2 \cdot 10^{-3} \cdot I + 35 \mu A$		
		45 Hz bis 1 kHz	$1,1 \cdot 10^{-3} \cdot I + 35 \mu A$		
	>33 mA bis 330 mA	>1 kHz bis 5 kHz	$2,5 \cdot 10^{-3} \cdot I + 35 \mu A$		
		>5 kHz bis 10 kHz	$7,5 \cdot 10^{-3} \cdot I + 34 \mu A$		
		20 Hz bis <45 Hz	$1,1 \cdot 10^{-3} \cdot I + 56 \mu A$		
		45 Hz bis 1 kHz	$1,0 \cdot 10^{-3} \cdot I + 57 \mu A$		
		>1 kHz bis 5 kHz	$4,0 \cdot 10^{-3} \cdot I$		
		>5 kHz bis 10 kHz	$8,4 \cdot 10^{-3} \cdot I$		
	>330 mA bis 2,2 A	10 Hz bis <45 Hz	$3,9 \cdot 10^{-3} \cdot I$		
		45 Hz bis 1 kHz	$2,9 \cdot 10^{-3} \cdot I$		
		>1 kHz bis 5 kHz	$9,9 \cdot 10^{-3} \cdot I$		
>2,2 A bis 11 A	45 Hz bis 65 Hz	$4,4 \cdot 10^{-3} \cdot I$			
	>65 Hz bis 500 Hz	$7,6 \cdot 10^{-4} \cdot I + 5,5 \text{ mA}$			
>500 Hz bis 1 kHz	$6,8 \cdot 10^{-4} \cdot I + 7,3 \text{ mA}$				
Stromzangen	330 µA bis 550 A	45 Hz bis 65 Hz	$1\% \cdot I$		
Gleichstromleistung Messgeräte	110 µW bis 330 W	33 mV bis 1020 V		Fluke 5520A	
		3,3 mA bis 330 mA	$3,2 \cdot 10^{-4} \cdot P$		
	11 mW bis 2,2 kW	>330 mA bis 2,2 A	$5,7 \cdot 10^{-4} \cdot P$		
	75 mW bis 11 kW	>2,2 A bis 11 A	$1,0 \cdot 10^{-3} \cdot P$		
Wechselstromwirk- leistung Messgeräte	110 µW bis 10 W	33 mV bis 1020 V		45 Hz bis 65 Hz, PF=1	
		3,3 mA bis 10 mA	$1,2\% \cdot P$		
		10 mA bis 11 A	$0,6\% \cdot P$		
Temperatursimulation und -anzeige Pt100	-200 °C bis 0 °C	DKD-R 5-5	0,06 K	Fluke 5520A Temperaturskala nach DIN 60751	
	>0 °C bis 300 °C		0,1 K		
	>300 °C bis 600 °C		0,14 K		
	>600 °C bis 800 °C		0,4 K		
	-100 °C bis 300 °C		0,024 K		HP 3458A
>300 °C bis 800 °C	0,04K				
Thermoelemente Typ K, J, E, N, T Typ R, S, B	-200 °C bis <0 °C	DKD-R 5-5	0,6 K	Fluke 5520A Temperaturskala nach DIN 60584	
	0°C bis 1350 °C		0,25 K		
	0 °C bis <600 °C		1 K		
	600 °C bis 1800 °C		0,7 K		
Oszilloskop, vertikal	5 mV bis 20 mV	DC bis 10 kHz	$5,5 \cdot 10^{-3} \cdot U + 0,1 \text{ mV}$	Fluke 5520A Rechtecksignale in 1 MΩ oder 50 Ω	
	>20 mV bis 200 mV		$8,0 \cdot 10^{-3} \cdot U$		
	>200 mV bis 100 V		$6,6 \cdot 10^{-3} \cdot U$		
horizontal	2 ns bis 10 ns		0,1 ns	Fluke 5520A	
	>10 ns bis 50 ns		$5,1 \cdot 10^{-3} \cdot t + 41 \text{ ps}$		
	>50 ns bis 1 s		$6,0 \cdot 10^{-3} \cdot t$		
	>1 s bis 5 s		$8,2 \cdot 10^{-3} \cdot t$		
Bandbreite	50 kHz	$U_{RMS} \geq 100 \text{ mV}$	3 % (0,26 dB)		
	>50 kHz bis 50 MHz		5 % (0,42 dB)		
	>50 MHz bis 100 MHz		5,5% (0,5 dB)		
	>100 MHz bis 200 MHz		7 % (0,6 dB)		
	>200 MHz bis 300 MHz		8 % (0,7 dB)		
Frequenzsynthese	0,01 Hz bis 18 GHz		$1,3 \cdot 10^{-7}$	TB <sub>Ref</sub> via R&S SME03	
Frequenzmessung	0,01 Hz bis 1,5 GHz		$1,3 \cdot 10^{-7}$		
HF-Leistung Quellen, Kalibrierungsfaktor und Ausgangsleistung	100 nW bis 100 µW	10 MHz bis 2 GHz	3,1 %	R&S NRV-Z1/Z51 N-Konnektor $r_G \leq 2$ $r_G \leq 0,3$ für $f > 2 \text{ GHz}$	
		>2 GHz bis 4 GHz	4,5 %		
		>4 GHz bis 6 GHz	8,3 %		
	100 µW bis 80 mW	DC bis 2 GHz	2,4 %		
		>2 GHz bis 4 GHz	2,9 %		
>4 GHz bis 6 GHz	4,8 %				