

XXI Verzernte Kurven¹

XXIa Flicker

XXIa.1 Einführung

Schwankungen der Netzspannung nennt man „Flicker“. Diese periodischen Einbrüche der Netzspannung werden im Allgemeinen durch elektrische Geräte in der Industrie, aber auch im Haushalt erzeugt. Hierbei kann es zur Störung anderer elektrischer Geräte und zur Irritation des Menschen durch Lichtflackern kommen. Daher war es nötig Grenzwerte einzuführen:

EN 61000-3-3: „Grenzwerte - Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungs-Versorgungsnetzen (kleiner 16 A je Leiter)“

Flicker wird dort folgendermaßen definiert:

„Flicker = Eindruck der Unstetigkeit visueller Empfindungen, durch Lichtreize mit zeitlicher Schwankung der Leuchtdichte oder spektralen Verteilung“.

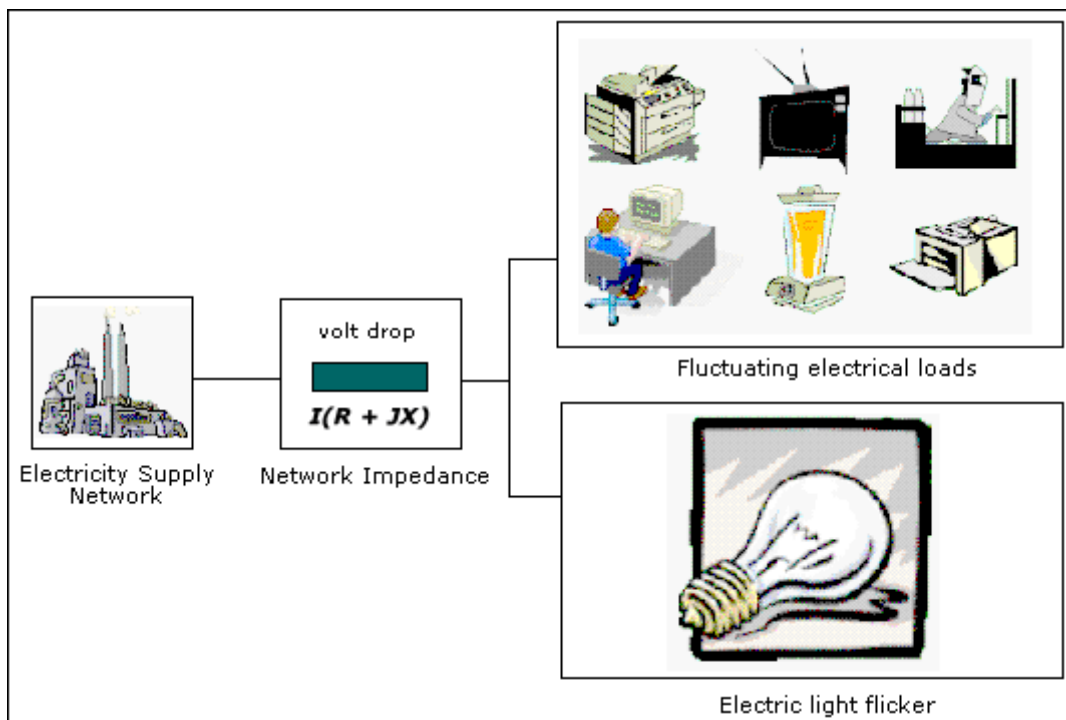


Bild XXIa.1: Flicker

Um Flicker qualitativ zu bewerten wurde der P_{st} -Wert eingeführt, dieser ist abhängig von Häufigkeit, Dauer und Höhe der Spannungsänderung und versucht die Wahrnehmung des menschlichen Auges analytisch zu erfassen.

Als Bezugspunkt dient der Wert $P_{st}=1$. Werte kleiner Eins können vom Menschen nicht wahrgenommen werden und sind daher unproblematisch. Werte größer Eins sind wahrnehmbar.

Die Flickermessung kann analytisch erfolgen (sehr aufwendig) oder mit Hilfe eines Flickermeter oder Poweranalyser mit Flickeroption.

Zur Kalibrierung dieser Flickermeter steht das Netzleistungsnormale Fluke 6100A zur Verfügung, welches Sinus- und Rechteckförmigen-Flicker erzeugen kann.

¹ Ergebnisse Studienkooperation TU-München, Lehrstuhl für Signaldarstellung, im Auftrag der esz AG

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.44	von: AB am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzernte Kurven	1

XXIa.2 Kalibrierung der Flickeroption des Netzleistungsnormal Fluke 6100A

XXIa.2.1 Das Kalibrierverfahren

Für die Flickermessung, und daher auch bei der Kalibrierung, ist der Bezugspunkt $P_{st} = 1$ ausschlaggebend. Hierfür wird ein Grundsignal von 120 V bzw. 230 V bei 50 Hz bzw. 60 Hz rechteckmoduliert. Folgende Messpunkte müssen überprüft werden:

Rechteckförmige Änderungen je Minute	Spannungsänderungen $\Delta U/U$			
	%			
	120-V-Lampe 50-Hz-Netz	120-V-Lampe 60-Hz-Netz	230-V-Lampe 50-Hz-Netz	230-V-Lampe 60-Hz-Netz
1	3,178	3,181	2,715	2,719
2	2,561	2,564	2,191	2,194
7	1,694	1,694	1,450	1,450
39	1,045	1,040	0,894	0,895
110	0,844	0,844	0,722	0,723
1 620	0,545	0,548	0,407	0,409
4 000	3,426	Prüfung nicht erforderlich	2,343	Prüfung nicht erforderlich
4 800	Prüfung nicht erforderlich	4,837	Prüfung nicht erforderlich	3,263

ANMERKUNG 1 1 620 rechteckförmige Änderungen je Minute entsprechen einer Frequenz der rechteckförmigen Modulation von 13,5 Hz.

ANMERKUNG 2 Für Prüfungen nach dieser Tabelle wird die erste Spannungsänderung innerhalb von 5 s nach dem Beginn der P_{st} -Wert-Ermittlung angewendet. Flickermeter, die eine Vorlaufzeit zum Einschwingen der Filter benötigen, sollten den Start der P_{st} -Wert-Ermittlung anzeigen, so dass die Prüfperson in der Lage ist, den Start der rechteckförmigen Modulationsspannung zu bestimmen.

Tabelle XXIa.1: Tabelle 5 aus EN 61000-4-15:2011 mit den Messpunkten für die Kalibrierung. Für alle Werte gilt $P_{st} = 1$.

Die Flickerfrequenz errechnet sich aus den rechteckförmigen Änderungen je Minute (CPM) dann zu:

$$f = \frac{CPM}{120 \text{ s}}$$

Ausgabe: DMS.44	erstellt von: AB am:s.DMS	geprüft/genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	Seite 2
---------------------------	----------------------------------------	-------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------	-------------------

Damit ergeben sich:

Rechteckförmige Änderung je Minute	Flickerfrequenz in Hz
1	0,00833
2	0,01667
7	0,05833
39	0,32500
110	0,91667
1620	13,50000
4000	33,33333
4800	40,00000

Tabelle XXIa.2: Flickerfrequenz abhängig von der Anzahl der rechteckförmigen Änderungen je Minute

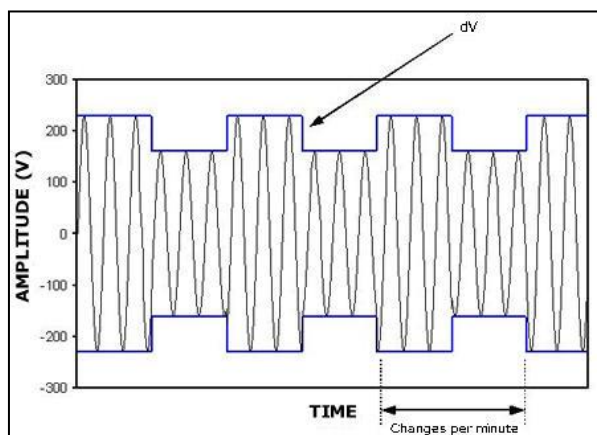


Bild XXIa.2: Rechteckmodulierter-Flicker

Für die Kalibrierung wird angenommen, dass eine getrennte Überprüfung der Amplitudenabweichung ($\Delta U/U$) und der Frequenzabweichung ausreichend ist. Dabei wird zum einen die Amplitudenabweichung bei 13,5 Hz im Frequenzspektrum überprüft, Frequenzabweichungen werden bei 10 V (RMS) kalibriert.

XXIa.2.1.1 Überprüfung der Spannungsänderung

Zur Überprüfung der Amplitudenabweichung wurde unter LabView eine Kalibriersoftware entwickelt, mit deren Hilfe die Vermessung der Spannungseinbrüche automatisiert durchgeführt werden kann. Die verwendeten Geräte Fluke 6100A und ein Abtastvoltmeter der Serie Hewlett Packard / Agilent / Keysight 3458A (HP 3458A) werden über GPIB gesteuert. Eine Validierung der Software wurde von Ludwig Schaidhammer im März/April 2017 durchgeführt : [T:\Weller\Fluke_6100A_CPM_\(Verifiziert_04.10.2017\)\Validierung\Bericht_Verifikation_Kalibrierung_Fluke_6100.dotx.docx](T:\Weller\Fluke_6100A_CPM_(Verifiziert_04.10.2017)\Validierung\Bericht_Verifikation_Kalibrierung_Fluke_6100.dotx.docx)

Folgende Schritte werden vom Programm durchgeführt:

Zunächst werden aus der vom User erstellten .txt –Datei die zu vermessenen Punkte ausgelesen. Die Messungen werden nacheinander durchgeführt:

Für eine Messung wird mit dem Präzisionsmultimeter HP 3458A der Signalverlauf im Abtastverfahren gemessen. Dann wird durch eine diskrete FFT (Fast-Fourier-Transformation) das zeitdiskrete Signal in den Frequenzbereich transformiert.

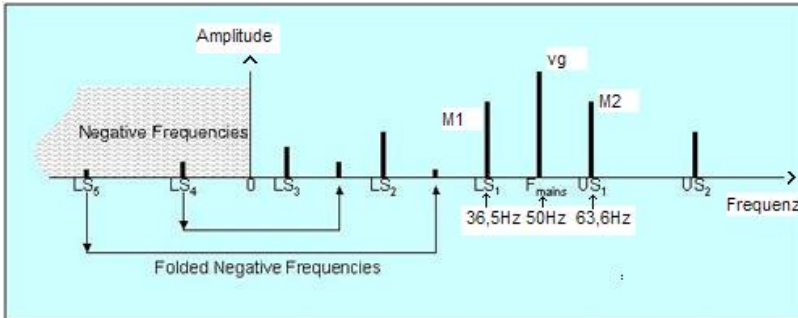
Um eine hohe Amplitudengenauigkeit zu erreichen haben sich folgende Abtasteinstellungen als signaltheoretisch sinnvoll erwiesen und sich auch in der Praxis bewährt:

- Abtastrate: $4 \cdot 10^{-4}$ s (das Nyquist-Abtasttheorem ist erfüllt)
- Aperturzeit: $2 \cdot 10^{-4}$ s;
- Anzahl der Samples: 5000 (dies ist die maximale Anzahl die sich durch den verfügbaren Speicher des Abtastvoltmeters 20480 byte und den Speicherbedarf eines Messwertes 4 byte ergibt);

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.44	von: AB am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	3

Der Triggerzeitpunkt wird willkürlich gewählt und spielt keine Rolle da nur das Betragsspektrum von Interesse ist, dieses erfährt jedoch keine Änderung durch die „freilaufende“ Triggerung.

Um den spektralen Leckeffekt gering zu halten wurde die Abtastfrequenz genau so gewählt dass das diskrete Frequenzspektrum exakt die Frequenzwerte aufweist, welche zur Berechnung des Flickers benötigt werden. Zusätzlich wurde ein Hanning-Filter verwendet um den Leckeffekt weiter abzuschwächen.



Berechnung von $\Delta U/U$ aus dem Frequenzspektrum:

$$\frac{\Delta U}{U} = 100 \cdot \pi \cdot \frac{M1 + M2}{2 \cdot vg}$$

Bild XXIa.3: Frequenzspektrum der rechteckmodulierten Sinusfunktion

Aus dem so erhaltenen Frequenzspektrum können die Amplituden der einzelnen Sinusschwingungen abgelesen werden. Hieraus wiederum wird die Modulationstiefe $\Delta U/U$ berechnet und die Ergebnisse wieder als .txt-Datei abgespeichert.

XXIa.2.1.2 Frequenzabweichung

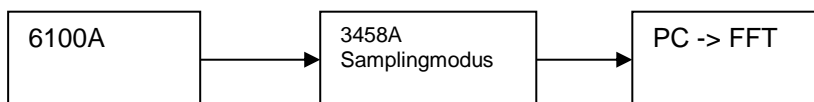
Um die Frequenzgenauigkeit zu überprüfen wird ein Hochleistungs-Oszilloskop wie z.B. infiniium 54854A von Agilent mit Tastkopf (Teiler) benutzt. Hierbei wird mit der Cursor-Funktion die Periodendauer des Flickers per Hand vermessen. Um eindeutig die Sprünge des rechteckmodulierten Signals zu erkennen wird am Prüfling (6100A) folgende Einstellung vorgenommen:

- 50 Hz Sinusschwingung mit 10V (RMS)
- Flicker mit der jeweils zu vermessenen Frequenz und dem maximal möglichen Modulationstiefe -> $\Delta U/U = 30\%_{\Delta U/U}$

XXIa.2.2 Messunsicherheitsbilanz

XXIa.2.2.1 Amplitudenunsicherheit

Skizze des Messverfahrens:



Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

$\Delta U_{rel, gemessen}$ Durch die Software bestimmte Höhe der relativen Spannungsänderung bei rechteckigem Flicker.

Gesuchte Größe:

$\Delta U_{rel, 6100A}$ Gesuchte relative Spannungsänderung

Einflussgrößen:

δU_{lin} Linearitätsabweichung der Messung. Der Wert wird maximal zu 10 $\mu V/V$ durch Messung mit Abtastverfahren von reinen Sinusschwingungen bei 50 Hz, 36,5 Hz und 63,5 Hz, welche synthetisiert einen Teil des rechteckmodulierten Flicker-Signals ergeben, abgeschätzt. Die Kalibriersoftware verwendet diese Grundwellen der

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.44	von: AB am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	4

verzerrten Kurvenform zur Bestimmung der relativen Spannungsänderung $\delta U/U$.

δU_{WH} Reproduktionsabweichung, welche anhand der vergangener Kalibrierungen und Vergleich der Abweichung des Nominalwertes des Netzleitungsnoomals mit maximaler Abweichung von 10 $\mu V/V$ ermittelt wurde. Höhere Beiträge sind im Rahmen eines Mehrfachwesswertes und dessen empirischer Standardabweichung des Mittelwertes zu erfassen (Typ-A- Unsicherheit)

δU_{Verf} Weitere zusätzliche Abweichungen, beispielsweise durch Instabilität der Quelle, Triggerjitter, Störspannungen, Rundungsabweichungen etc. können vernachlässigt werden.

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich folgende Modellgleich:

$$\delta U_{rel,6100} = \delta U_{rel,gemessen} + \delta U_{lin} + \delta U_{WH} + \delta U_{Verf}$$

Messunsicherheitsbilanz:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\delta U_{rel,6100}) = u^2(\delta U_{lin}) + u^2(\delta U_{WH}) + u^2(\delta U_{Verf})$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivität skoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
x_i	x_i	a		$u(x_i)$	$ c_i $	$u_i(y)$
$\delta U_{gemessen}$	g					
δU_{lin}	0	a_{lin}	Rechteck	$u(\delta U_{lin}) = \frac{a_{lin}}{\sqrt{3}}$	1	u_{lin}
δU_{WH}	0	a_{WH}	Rechteck	$u(\delta U_{WH}) = \frac{a_{WH}}{\sqrt{3}}$	1	u_{WH}
δU_{Verf}	0	a_{Verf}	Rechteck	$u(\delta U_{Verf}) = \frac{a_{Verf}}{\sqrt{3}}$	1	u_{Verf}
δU_{6100A}		g		$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$		$u(y)$
	rel. erweiterte Messunsicherheit ($k=2$)			$U(y) = k \cdot u(y)$		$U(y)$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz (mit Werten in %_{deltaU/U}):

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
x_i	x_i	a		$u(x_i)$	$ c_i $	$u_i(y)$
$\delta U_{gemessen}$	g					
δU_{lin}	0	10 $\mu V/V$	Rechteck	$u(\delta U_{lin}) = \frac{10 \mu V/V}{\sqrt{3}}$	1	5,8 $\mu V/V$
δU_{WH}	0	10 $\mu V/V$	Rechteck	$u(\delta U_{lin}) = \frac{10 \mu V/V}{\sqrt{3}}$	1	5,8 $\mu V/V$
δU_{Verf}	0	-	Rechteck	$u(\delta U_{Verf}) \approx \frac{0,0}{\sqrt{3}}$	1	0
δU_{6100A}	g			$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$		8,2 $\mu V/V$
	rel. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$U(y) = 2 \cdot u(y)$		16 $\mu V/V$ ≈ 0,0016 %

XXIa.2.2.2 Frequenzunsicherheit

Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

$f_{gemessen}$ Mit Oszilloskop gemessene Frequenz des Flickers

Gesuchte Größe:

f_{6100A} Gesuchte Flicker-Frequenz.

Einflussgrößen:

Ableseunschärfe: Im schlechtesten Fall ergibt sich am Umschaltzeitpunkt (sichtbar bei 0,05 Hz bis 40 Hz) ein Ableseintervall von 0,03 ms (Halbbreite 0,03 ms / 2 = 0,015 ms), das mit beiden Markern erfasst wird. Werden mehr als 5 Perioden gemessen ergibt sich bezogen auf 40 Hz ein maximales Unsicherheitsintervall von

$$\delta f_{Ablese} \Delta_{cursor} = \frac{0,015ms}{5} \cdot 40Hz = 0,012\%$$

Bei kleineren Frequenzen bis 1 Spannungsänderung pro Minute (0,00833 Hz) kann der exakte Umschaltzeitpunkt zwar nur noch auf etwa eine halbe Periodendauer (10 ms) bestimmt werden, dennoch ergibt sich keine höhere Unsicherheit als der „worst case“ bei 40 Hz.

δf_{Oszi} Abweichung Referenzoszillator des Oszilloskops. Aus der Messung der Oszillatorfrequenz, dem Kalibrierschein und den Herstellerangaben wird angenommen, dass die Frequenzabweichung maximal $1 \cdot 10^{-6}$ abweicht. Eine Synchronisation des Oszillators mit der 10 MHz-Referenzzeitbasis könnte diese Abweichung weiter verringern, doch trägt diese nur unwesentlich zur Gesamtunsicherheit bei.

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich folgende Modellgleichung:

$$f_{6100} = f_{gemessen} + \delta f_{Ablese} + \delta f_{Oszi}$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.44	von: AB am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	6

Messunsicherheitsbilanz:

Für die dem Ergebnis beizuordnende relative Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$w^2(f_{6100}) = w^2(\delta f_{gemessen}) + w^2(\delta f_{Ablese}) + w^2(\delta f_{Oszi})$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $w(x_i)$	Sensitivitätskoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)$
$f_{gemessen}$	g					
δf_{Ablese}	0	a_{Ablese}	Rechteck	$w(\delta f_{Ablese}) = \frac{a_{Ablese}}{\sqrt{3}}$	1	W_{Ablese}
δf_{Oszi}	0	a_{Oszi}	Rechteck	$w(\delta f_{Oszi}) = \frac{a_{Oszi}}{\sqrt{3}}$	1	W_{Oszi}
f_{6100A}	g			$w(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(y)}$		$w(y)$
	rel. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(y) = k \cdot w(y)$		$W(y)$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz (mit Werten):

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $w(x_i)$	Sensitivitätskoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)$
$f_{gemessen}$	g					
δf_{Ablese}	0	$1,2 \cdot 10^{-4}$	Rechteck	$w(\delta f_{Ablese}) = \frac{1,2 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{3}}$	1	$6,9 \cdot 10^{-5}$
δf_{Oszi}	0	$1 \cdot 10^{-6}$	Rechteck	$w(\delta f_{Oszi}) = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}}$	1	$0,57 \cdot 10^{-7}$
f_{6100A}	g			$w(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(y)}$		$6,9 \cdot 10^{-5}$
	rel. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(y) = 2 \cdot w(y)$		$1,4 \cdot 10^{-4}$

XXIa.3 Kalibrierung von Flickermessgeräten

XXIa.3.1 Spannungsänderung und Frequenz

Da das Netzleistungsnormal Fluke 6100A v.a. bei der Kalibrierung von Flickermessgeräten zum Einsatz kommt wird die Gesamtunsicherheit der Flickersynthese aus der unter Abs. XXIa.2.2.1 genannten Unsicherheit der Kalibrierung $u_{Kalibrierung}$ der Flickeroption und dessen Beitrag der Spezifikation u_{Spez} (enthält Nominalabweichung und Drift) als

$$u_{Flickersynthese}^2 = u_{Kalibrierung}^2 + u_{Spez}^2 \approx u_{Spez}^2$$

$$U_{Flickersynthese} \approx 0,025\% \frac{\Delta U}{U}$$

mit Hilfe der vom Hersteller angegebenen Spezifikation U_{Spez} abgeschätzt. Wird das Normal (Fluke 6100A) vor Verwendung eingemessen oder dessen Anzeigewerte korrigiert gilt

$$U_{\text{Flicker synthese}} \approx U_{\text{Kalibrierung}} = 0,001 \% \frac{\Delta U}{U}$$

XXIa.3.2 P_{st} -Wert

Mit den Angaben des Herstellers wird angenommen, dass v.a. die Unsicherheit der relativen Spannungsänderung zur Unsicherheit des Kurzzeitflickerwertes P_{st} beiträgt. Dabei wird gemäß den Herstellerangaben des Netzkleinstnormals Fluke 6100A angenommen, dass ein Beitrag von $0,1 \% \cdot \Delta U/U$ einer Abweichung des P_{st} -Wertes von ca. 1 % entspricht. Somit gilt für dessen relative erweiterte Unsicherheit (bei Einmessen vor der Verwendung)

$$W_{P_{st}} \approx 10 \cdot U_{\text{Flicker synthese}} \cdot P_{st} = 0,01 \% \cdot P_{st} \quad \text{bzw. bei Verwendung der Spezifikation des Normals}$$

$$W_{P_{st, Spez}} = 0,25 \% \cdot P_{st}$$

XXIb Spannungs-Oberwellen

XXIb.1 Einführung

Induktivitäten und Kapazitäten sowie Ein- und Ausschaltvorgänge elektrischer Maschinen im Haushalt und in der Industrie stören das Stromnetz. Es kommt zu Verzerrungen der eigentlich sinusförmigen Spannung (siehe Bild XXIb.1.1). Im allgemeinen gilt, je weniger die Kurve verzerrt ist umso besser ist dies für die Netzbetreiber und für den Kunden. Durch zu starke Verzerrungen können Geräte gestört werden, was sogar zum Ausfall empfindlicher Elektronik führen kann.

Das Maß der Verzerrung wird hier bestimmt in dem die einzelnen Oberwellen der 50 Hz (oder 60 Hz) Grundschwingung des Signals betrachtet werden. Die n-te Oberwelle ist dabei definiert als eine der Grundwelle überlagerten Sinusschwingung mit (n+1)-facher Frequenz der Grundwelle (n ist ganzzahlig).

Fouriertransformiert man ein Signal, welches aus einer Grundwelle und mehreren Oberwellen besteht, bekommt man ein Spektrum vergleichbar mit dem in Bild XXIb.1.2. Anhand solch eines Frequenzspektrums kann eine Überprüfung des Oberwellenanteils stattfinden, durch Messung der Amplitudenwerte der einzelnen Peaks.

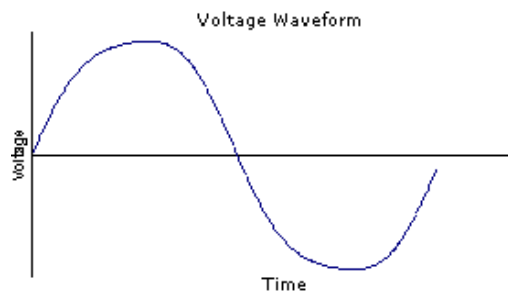


Bild XXIb.1.1 verzerrte Sinuskurve

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.44	von: AB am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	8

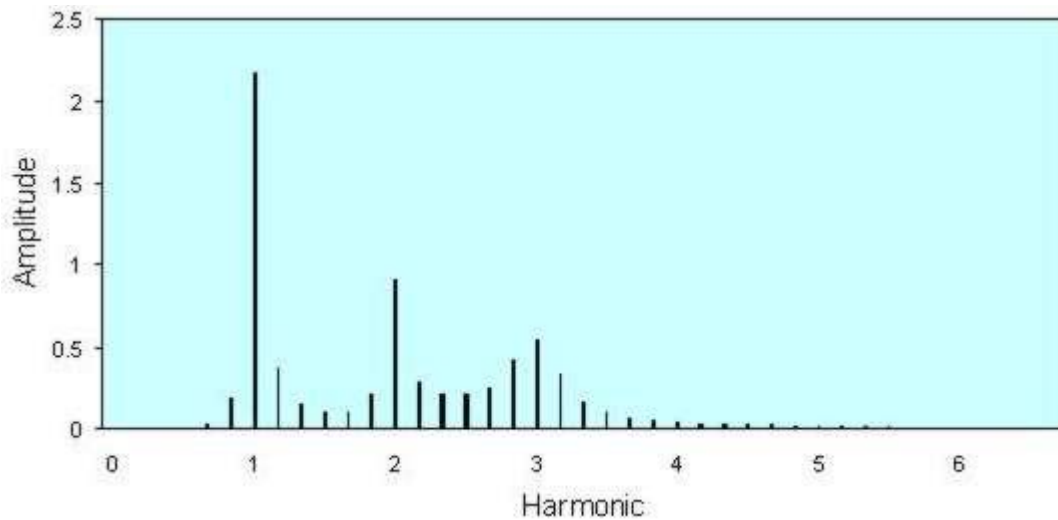


Bild XXIb.1.2 Frequenzspektrum mit Oberwellen

XXIb.2 Kalibrierung der Spannungs-Oberwellenoption des Normals Fluke 6100A

XXIb.2.1 Das Kalibrierverfahren

Um Abweichungen des Netzleistungsnormals Fluke 6100A im Bereich der Spannungs-Oberwellen festzustellen wurde theoretisch und empirisch ein Messverfahren entwickelt welches ermöglicht Oberwellen zu messen.

Hierzu wird das am Kalibrator ausgegebene Signal mit Hilfe des hochpräzisen Abtastmultimeters erfasst, so dass dann nach einer Fouriertransformation eine quantitative Aussage über die Abweichung gemacht werden kann. Um zusätzlich die Messunsicherheit gering zu halten wird eine Substitutionsmessung durchgeführt. Die Oberwellenanteile werden getrennt (als reine Sinusschwingungen) am Referenzkalibrator Fluke 5700A erzeugt und dann über das identische Abtastverfahren mit Fouriertransformation wie im synthetisierten Fall gemessen.

Diese recht aufwendige Messprozedur wurde automatisiert mit Hilfe einer gesteuerten Umschaltbox und durch ein in LabView geschriebenes Programm, welche alle Schritte selbstständig durchführt.

Um eine hohe Amplitudengenauigkeit zu erreichen haben sich folgende Abtasteinstellungen als signaltheoretisch sinnvoll erwiesen und sich auch in der Praxis bewährt:

- Abtastrate: $2 \cdot 10^{-5}$ s (das Nyquist-Abtasttheorem ist erfüllt)
- Aperturzeit: $1 \cdot 10^{-5}$ s;
- Anzahl der Samples: 5000 (ist die maximale Anzahl die sich ergibt durch den verfügbaren Speicher des Abtastvoltmeter 20480 byte und den Speicherbedarf eines Messwertes 4 byte);

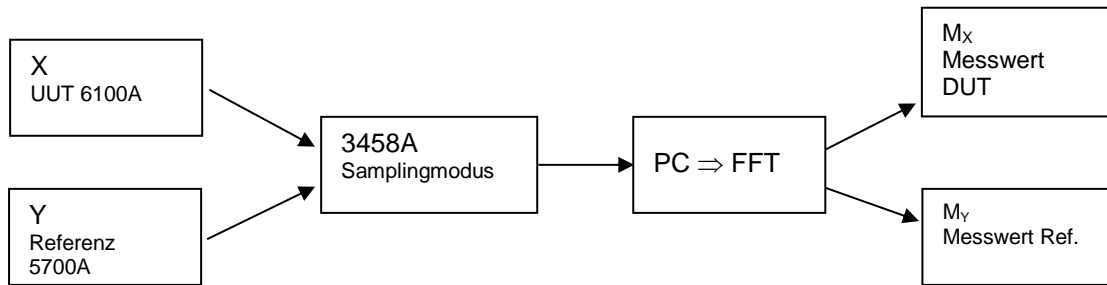
Der Triggerzeitpunkt wird willkürlich gewählt und spielt keine Rolle da nur das Betragsspektrum von Interesse ist, dieses erfährt jedoch keine Änderung durch die „freilaufende“ Triggerung.

Um den spektralen Leckeffekt gering zu halten wurde die Abtastfrequenz genau so gewählt dass das diskrete Frequenzspektrum exakt die Frequenzwerte der Grundwelle und damit den Oberwellen aufweist. Zusätzlich wurde ein Hanning-Filter verwendet um den Leckeffekt weiter abzuschwächen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.44	von: AB am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	9

XXIb.2.2 Messunsicherheitsbilanz

Skizze des Messverfahrens:



Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

- Y Eingestellter Wert am Referenzkalibrator (als reine Sinusschwingungen der zu erwartenden Grund- und Oberwellen)
- M_x Ermittelter Wert am Messgerät bei Messung des unbekanntes Wertes am Kalibriergegenstand (synthetisierte Schwingung)
- M_y Gemessener Wert bei Messung der einzelnen Sinussignale am Referenzkalibrator

Gesuchte Größe:

- X Gesuchte effektive Spannung der Oberwelle bei Messung des synthetisierten Signal aus Grund- und Oberwelle.

Einflussgrößen:

- δU_{Rep} Reproduktionsabweichung der Messung, welche empirisch mit einer Stichprobenlänge von $n \geq 10$, mit Abweichungen von maximal $6 \cdot 10^{-5}$ ermittelt wurde.
- δU_{Ref} Abweichung des Referenznormals Fluke 5700A welche bei Einhaltung der Spezifikationen zu Null mit der aus dem Kalibrierschein entnehmbaren Unsicherheit angenommen wird.
- δU_{Drift} Drift des Referenznormals Fluke 5700A vom Nominalwert. Das Unsicherheitsintervall ergibt sich aus den Herstellerspezifikationen und der Historie.

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich folgende Modellgleich:

$$X = Y - M_y + M_x + \delta U_{Rep} + \delta U_{Ref} + \delta U_{Drift}$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.44	von: AB am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	10

Messunsicherheitsbilanz:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(X) = u_{Rep}^2 + u_{Ref}^2 + u_{Drift}^2$$

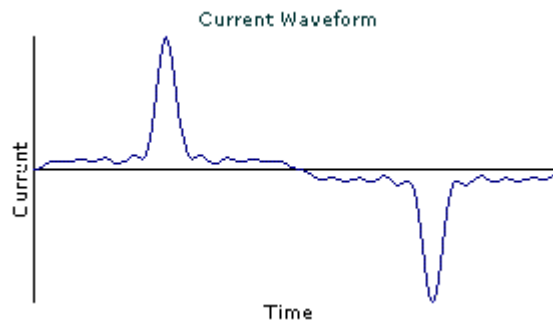
Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivität skoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
Y_i	y_i	a		$u(y_i)$	$ c_i $	$u_i(y)$
Y	g					
M_Y	g_Y					
M_X	g_X					
δU_{Rep}	0	a_{Rep}	Rechteck	$u(\delta U_{Rep}) = \frac{a_{Rep}}{\sqrt{3}}$	1	u_{Rep}
δU_{Ref}	0	a_{Ref}	Normal	$u(\delta U_{Ref}) = \frac{a_{Ref}}{2}$	1	u_{Ref}
δU_{Drift}	0	a_{Drift}	Rechteck	$u(\delta U_{Drift}) = \frac{a_{Drift}}{\sqrt{3}}$	1	u_{Drift}
X	$g - g_Y + g_X$			$u(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$		$u(X)$
	rel. erweiterte Messunsicherheit ($k=2$)			$U(X) = k \cdot u(X) / X$		$U(X)$

XXIc Stromstärke-Oberwellen

XXIc.1 Einführung

Viele Verbraucher im Netz haben eine Stromverbrauchskurve wie in Bild XXIc.1.1, d.h. die eigentliche (50Hz) Grundwelle wird von Oberwellen überlagert. Um die Amplituden der Oberwellen zu bestimmen, kann über einen Shunt die am Widerstand abfallende Spannung abgetastet werden und dann durch eine FFT die Oberwellenanteile errechnet werden.



XXIc.2 Kalibrierung der Strom-Oberwellenoption des Normals Fluke 6100A

XXIc.2.1 Das Kalibrierverfahren

Um Abweichungen des Netzleistungsnormals Fluke 6100A im Bereich der Strom-Oberwellen festzustellen wurde theoretisch und empirisch ein Messverfahren entwickelt welches ermöglicht Oberwellen zu messen.

Die Quelle wird dazu an einen Widerstand-Shunt angeschlossen, dessen DC-Werte bekannt sind bzw. dessen AC-Verhalten bis 2 kHz gemäß Kapitel XI im Lindeck-Rothe-Verfahren bei Sinussignalen untersucht wurde. Systematische Messabweichungen durch das Abtastverfahren werden vor der Messung durch ein „einkalibrieren“ des Messshunts eliminiert: Dazu wird zuerst der AC-Widerstandwert der entsprechenden Messfrequenz unter Abtastbedingungen bei bekannter sinusförmiger Stromstärke ermittelt. Das Signal des Spannungspfad des Shunts bei verzerrter

Stromstärke des Kalibriergegenstandes wird danach genauso mit Hilfe des Abtastmultimeters erfasst, so dass dann nach einer Fouriertransformation und über die ohmsche Beziehung eine quantitative Aussage über die Abweichung der Quelle gemacht werden kann.

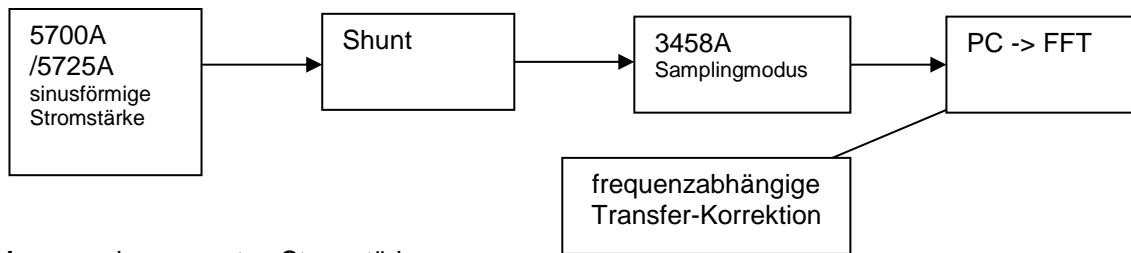
Für das Kalibrierverfahren wurde eine Software unter LabView geschrieben, welche die Messung automatisiert durchführt. Die Abtasteinstellungen des Voltmeters sind gewählt wie in Kapitel XXIb.2.1.

XXIc.2.2 Messunsicherheitsbilanz

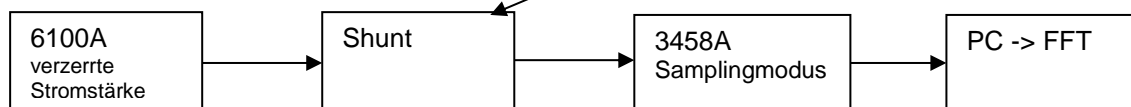
Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

Skizze des Messverfahrens:

1: Bestimmung des Shunt-Wertes unter Abtastbedingungen



2: Messung der verzerrten Stromstärke



Da auch in diesem Aufbau in Substitution gegen die bekannte AC-Stromquelle kalibriert wird kann das Modell aus Abs. XXIb.2.2 verwendet werden. Die Unsicherheit ist daher nur Abhängig vom zur Substitution verwendeten Normal.

XXIc.2.3 Ergebnisse

Es lässt sich zeigen, dass die Anwendung der Spezifikation (z.B. 90 Tage, 95 % Confidence Level) oder Unsicherheit des zur Substitution bzw. Transfer eingesetzten Normals den dominierenden Anteil der Gesamtunsicherheit darstellt (k=2).

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

- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XXI-Verzerrte-Kurven.xls>

zu entnehmen, die Ergebnisse werden im Leistungsnachweis aufgeführt.

XXIc.2.4 Kalibrierung von Oberwellen-Messgeräten

Wird das Netzleistungsnormal Fluke 6100A vor Gebrauch eingemessen können dieselben Unsicherheiten wie beim Einmessen verwendet werden, da das Gerät dann lediglich zum Transfer eingesetzt wird. Ansonsten lässt sich die Gesamtunsicherheit bei regelmäßiger Kalibrierung der Ausgangsparameter „erweiterte Spezifikation“ formulieren:

$$W_{\text{Oberwelle-Synthese}}^2 = W_{\text{Kalibrierung}}^2 + W_{\text{Spez}}^2$$

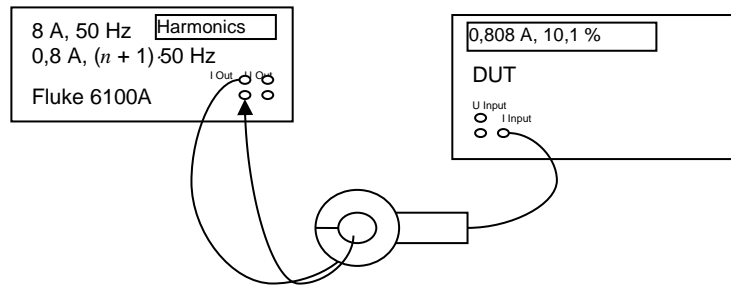
mit W_{Spez} als die vom Hersteller spezifizierte Unsicherheit (Annahme k=2) des eingestellten Wertes und $W_{\text{Kalibrierung}}$ als die Unsicherheit der Kalibrierung gemäß Abs. XXIb.2.

XXIc.2.4.1 Kalibrierung von (Stromstärke-)Oberwellen-Messgeräten über Leitungswicklungen passender Windungszahl

Werden Leistungsanalytoren oder Messgeräte mit Stromzangen betrieben und kalibriert so lässt sich die Oberschwingungssynthese über den Strompfad an Leitungswicklungen passender

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.44	von: AB am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	12

Windungszahl N durchführen (vgl. Kapitel XIX). Die Stromstärke-Messbereiche erweitern sich damit um den Faktor N der verwendeten Windungen (z.B. bis 60fach).



Die Messunsicherheit ist für dieses Verfahren im Wesentlichen durch den Strompfad und den Abgriff über die Zange beeinflusst, wodurch die Gesamtmessunsicherheit nach Kapitel XIX bestimmbar ist.

XXIc.2.4.2 Kalibrierung von Oberschwingungs-Quellen in Direktmessung an einem Netzleistungsanalysator

Ein nach XXIc.2.4 kalibrierter Leistungsanalysator oder -Messgerät kann im Direktmessverfahren anlehnd an Kapitel IV als Normal genutzt werden um Spannungs-, Strom- oder Leistungsquellen zu charakterisieren.

Die Messunsicherheit ist für dieses Verfahren gemäß den Modellen aus IV.5 errechenbar. Die Anteile hieraus können vereinfacht werden zu

- δX_i Maximale spezifizierte/ akzeptierte Abweichung der Oberschwingungsanalyse des Normals zwischen den Kalibrierintervallen (aus den Angaben des Herstellers oder dem Kalibrierschein entnehmbar)
- $U(\Delta X_K)$ Kalibrierunsicherheit bzw. Unsicherheit der Bewertung der Spezifikation gemäß den Berechnungen und Ergebnissen aus XXIc.2.4. Sofern der Nachweisführung der Konformitätsbewertung unsicher ist muss die Unsicherheit der Kalibrierung im Budget berücksichtigt werden.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.44	von: AB am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	13

XXId Kalibrierung von NF-Klirranalysatoren bis 30 kHz

XXId.1 Kalibrierverfahren

Die elektrischen Grundsignale werden an einem oder zwei² klirrfarmen Kalibratoren bereitgestellt. Beide Signale werden an einem geschirmten Widerstandssplitter gemischt. Kalibriert wird der Anteil der Oberwelle(n) im Verhältnis zur Grundwelle. Da neben dem nativen Klirrfaktor des Messobjekts der Generator der Grundwelle einen wesentlichen Beitrag zum gemessenen Klirrfaktor spielt ist für Messunsicherheiten <0,5 % v.M. sicherzustellen, dass der Klirrfaktor des Messaufbaus (Eigenklirrfaktor) mindestens um den Faktor 10 (etwa 20 dB) unter dem kleinsten synthetisierten Klirrfaktor liegt. Dies kann durch eine vorangehende Messung des ungemischten Grundsignals verifiziert werden. Mit einem der klirrfarmen Generatoren wie Fluke 5700A oder Fluke 5520A können Werte bis 0,01 % (-80 dB bzw. typisch sogar 0,007%) gut erreicht werden, so dass die Synthese bis 0,100 % keine Probleme darstellt.

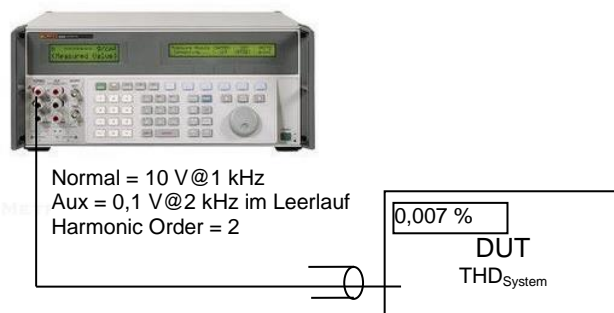


Bild XXId.1.1: Messung des „Systemklirrens“ (Eigenklirren des Messaufbaus)

Um die Belastung der Quelle unter den verschiedenen Impedanzbedingungen zu bestimmen werden am resistiven Netzwerk zuvor Messungen der ungemischten Anteile durchgeführt

- Spannung U_{Gen1} am gemischten Ausgang parallel Messobjekt mit Grundwelle alleine (Mischereingang „2“ ist kurzgeschlossen für Signale >330 mV bzw. mit 50 Ohm abgeschlossen für Spannungen der Oberwelle unterhalb oder gleich 330 mV und bildet damit die Quellimpedanz des Generators „2“=AUX nach)

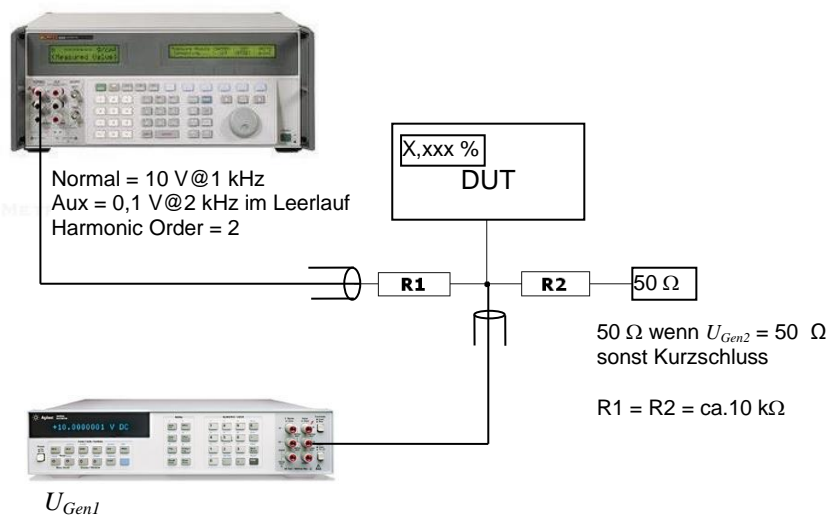


Bild XXId.1.2: Messung der Grundwelle alleine

² Werden zwei Kalibratoren verwendet müssen ggf. mit geeigneten Methoden die Phasen der Signale starr gekoppelt werden (Phase Lock)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.44	von: AB am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	14

- Spannung U_{Gen2} am gemischten Ausgang parallel Messobjekt mit Oberwelle alleine (Mischereingang „1“ ist kurzgeschlossen und bildet die Quellimpedanz des Generators „1“=NORMAL nach)

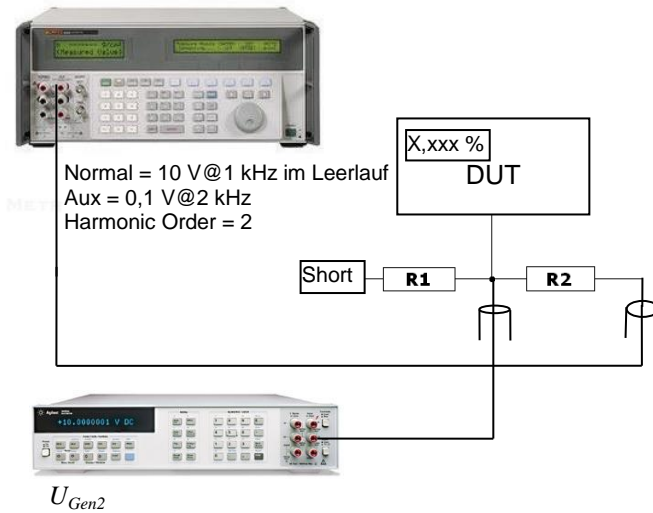


Bild XXI d.1.3: Messung der Oberschwingung alleine

Nach Bestimmung der ungemischten Anteile wird der zu erwartende Klirrfaktor oder die harmonische Verzerrung rechnerisch ermittelt, beide Signale U_{Gen1} und U_{Gen2} gekoppelt und die Ergebnisse mit den Werten des Messobjekts verglichen.

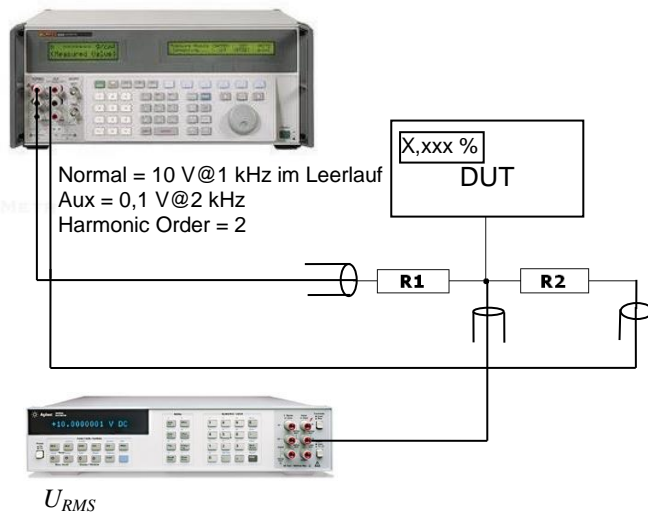


Bild 4: Kopplung der Oberschwingung und Grundschwingung

Der Klirrfaktor ist bei der Berechnung ohne Berücksichtigung des Eigenklirrens der verwendeten Quellen definiert als

$$k_{Klirr} = \sqrt{\frac{U_{Gen2}^2}{U_{Gen1}^2 + U_{Gen2}^2}}$$

Die gesamte harmonische Verzerrung (**Total Harmonic Distortion, THD**) ist im Gegensatz dazu definiert als

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.44	von: AB am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	15

$$k_{THD} = \frac{U_{Gen2}}{U_{Gen1}}$$

Beispiele

Grundwelle 1 kHz	Oberwelle 2 kHz	Klirrfaktor	Klirrfaktor in dB	THD	THD in dB
10 V	3 V	28,73 %	-10,83 dB	30 %	-10,46 dB
10 V	1 V	9,95%	-20,04 dB	10 %	-20 dB
10 V	0,1 V	0,99995 %	-40 dB	1 %	-40 dB
10 V	0,01 V	0,09999995 %	-60 dB	0,1 %	-60 dB
10 V	0,001 V	0,01 %	-80 dB	0,01 %	-80 dB

XXId.2 Modellgleichung

$$k_{Klirr} = \sqrt{\frac{U_{Gen2}^2 \cdot KU_{Gen2}^2 \cdot KU_{Gen2,match}^2 + \delta U_{Gen2,klirr}^2 + \delta U_{DUT}^2}{U_{Gen1}^2 \cdot KU_{Gen1}^2 + \delta U_{Gen1,klirr}^2 + U_{Gen2}^2 \cdot KU_{Gen2}^2 \cdot KU_{Gen2,match}^2 + \delta U_{DUT}^2}} \quad (1)$$

bzw.

$$k_{THD} = \frac{\sqrt{U_{Gen2}^2 \cdot KU_{Gen2}^2 \cdot KU_{Gen2,match}^2 + \delta U_{Gen1,System}^2 + \delta U_{Gen2,klirr}^2}}{U_{Gen1} \cdot KU_{Gen1}} \quad (2)$$

mit

U_{Gen1}	Spannung der Grundwelle an Generator 1
KU_{Gen1}	Korrektur durch die Unsicherheit der Spannung an Generator 1. Im Bereich bis 1 kHz beträgt dieses Intervall bei 10 V z.B. maximal 0,009% (k=2). Der korrespondierende Anteil ist jeweils der Spezifikation des Multimeters entnehmbar (z.B. HP 3458A, AC-Volt Sync)
$\delta U_{Gen1,System}$	Korrektur durch den Eigenklirrfaktor des Generators 1 und des Messobjekts. Dieser wird maximal zu $0,01\% \cdot U_{Gen1}$ angenommen.
U_{Gen2}	Spannung der Oberschwingung an Generator 2
KU_{Gen2}	Korrektur durch die Unsicherheit der Spannung an Generator 2. Spannungen von 10 mV bis 20 kHz können z.B. mit Unsicherheiten kleiner 0,04 % hergestellt werden. Der korrespondierende Anteil ist jeweils der Spezifikation des verwendeten Generators entnehmbar (z.B. HP 3458A, AC-Volt Sync)
$KU_{Gen2,match}$	In den Bereichen ≤ 220 mV beträgt die Quellimpedanz des zweiten Generators 50 Ω , Generator 1 arbeitet hingegen mit Lastregelung und niederohmiger Quellimpedanz. Durch diese Impedanzverschiebung ergibt sich ein systematisches Abweichungsintervall von maximal 0,005 %.
$\delta U_{Gen2,klirr}$	Korrektur durch den Eigenklirrfaktor des Generators 2 wird maximal zu $0,07\% \cdot U_{Gen2}$ bis 10 kHz, darüber zu maximal $0,1\% \cdot U_{Gen2}$ angenommen
$\delta U_{Gen1,klirr}$	Abweichung der Generatorspannung durch die Summe der harmonischen Verzerrungen an Generator 1
$\delta U_{Gen2,klirr}$	Abweichung der Generatorspannung durch die Summe der harmonischen Verzerrungen an Generator 2
δU_{DUT}	Abweichung durch die harmonischen Verzerrungen bedingt durch das Messobjekt (Eigenklirren)

Vereinfacht mit

$$\delta U_{Gen1,klirr}^2 + \delta U_{DUT}^2 = \delta U_{Klirr,System}^2 = (k_{System} \cdot U_{Gen1})^2 \text{ und}$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.44	von: AB am:s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	16

$$\delta U_{Gen2}^2 + \delta U_{DUT}^2 < \delta U_{Klirr, System}^2$$

ergibt sich

$$k_{Klirr} \approx \sqrt{\frac{U_{Gen2}^2 \cdot KU_{Gen2}^2 \cdot KU_{Gen2, match}^2 + k_{System}^2 \cdot U_{Gen1}^2}{U_{Gen1}^2 \cdot KU_{Gen1}^2 + k_{System}^2 \cdot U_{Gen1}^2 + U_{Gen2}^2 \cdot KU_{Gen2}^2 \cdot KU_{Gen2, match}^2}}$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz für k_{THD}^3 mit Frequenz $f \leq 5$ kHz:

Größe x_i	Schätzwert t x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $w(x_i)$	Sensitivitätskoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)$
U_{Gen1}	10 V					
U_{Gen2}	0,1 V					
KU_{Gen1}	1	0,009 %	Normal	0,009 % / 2	1	0,005 %
$KU_{Gen1, System}$	1	$0,01\% \cdot U_{Gen1}$	Rechteck	$0,01\% \cdot U_{Gen1} / \sqrt{3}$	$1/U_{Gen2}$	0,577 %
KU_{Gen2}	1	0,016 %	Normal	0,016 % / 2	1	0,008 %
$KU_{Gen2, match}$	1	0,005 %	u-verteilt	$0,005\% / \sqrt{2}$	1	0,004 %
$KU_{Gen2, klirr}$	1	$0,07\% \cdot U_{Gen2}$	Rechteck	$0,07\% \cdot U_{Gen2} / \sqrt{3}$	$1/U_{Gen2}$	0,040 %
k_{THD}	$k_{THD} = \frac{0,1V}{10V}$			$w(k_{THD}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(k_{THD})}$		0,579 %
k_{THD}	rel. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(k_{THD}) = 2 \cdot w(k_{THD})$		1,2 %

Interpoliert ergibt sich etwa

$$U(k_{THD}) \approx U(k_{klirr}) \approx$$

$$0,012\%_{klirr} + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot k_{klirr} \quad (45 \text{ Hz bis } 5 \text{ kHz})$$

$$\text{und } 0,012\%_{klirr} + 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot k_{klirr} \quad (>5 \text{ kHz bis } 30 \text{ kHz})$$

XXId.3 Klirrfaktormessung

Ein nach den og. Verfahren kalibrierter Klirranalysator kann im Direktmessverfahren eingesetzt werden um den Klirrfaktor von NF-Signalen zu messen und zu kalibrieren (vgl. VDI/ VDE DGQ DKD 2622-Blatt5:2014-Abs.3.2.5

Das Modell für die Messunsicherheit wir hierbei formuliert zu

$$k_{Signal} = k_{gemessen} + \delta k_{nom} + \delta k_{Kal}$$

mit

k_{Signal} gesuchter Klirrfaktor des Signals

$k_{gemessener}$ gemessener Klirrfaktor am Klirranalysator

δk_{nom} Einfluss der Unsicherheit der Klirrfaktormessung am Normal. Die maximale Abweichung des Klirranalysators kann dem Kalibrierschein

³ Es kann gezeigt werden, dass die Unsicherheit für den Klirrfaktor etwa ebenfalls der der gesamten harmonischen Verzerrung entspricht

entnommen werden. Alternativ kann das Akzeptanzintervall der Abweichung der Wellenlängenmessung des Normals (Spezifikation) von z.B. $\pm(3 \%v.E.+0,03\%_{klirr}^4)$ verwendet werden, das im Rahmen der regelmäßigen Kalibrierung kalibriert, bestätigt und rückgeführt wird.

δk_{Kal}

Die Kalibrierunsicherheit kann bei der Bewertung der Lage innerhalb des Akzeptanzkriteriums (Lage im Toleranzfeld) eine Rolle spielen und wird entsprechend berücksichtigt.

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz für Frequenzen $f \leq 5$ kHz im Messbereich 0,3 %

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivitätskoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$
$k_{gemessen}$	0,15 %					
δk_{nom}	1	0,009%+0,03%	Rechteck	$\frac{0,039 \%}{\sqrt{3}}$	1	0,023 %
δk_{Kal}	1	0,012%+0,0075%	Normal	$\frac{0,019 \%}{2}$	1	0,010 %
k_{Signal}	0,15 %			$u(k_{Signal}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2 (k_{Signal})}$		0,025 %
	erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$U(k_{Signal}) = 2 \cdot w(k_{Signal})$		0,05 %

Für den Klirranalysator HP 334A ergibt sich dann beispielsweise im Bereich bis 30%

$$U_{334A} = 0,022 \cdot k + 0,012 \%$$

⁴ Errechnet aus Eigenklirrfaktor „noise“ von -70 dB



© 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.44	von: AB am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XXI Verzerrte Kurven	19