



LMG600 Series Applikation: Transformatoren

ZES ZIMMER – THE EXPERTS IN PRECISION POWER ANALYSIS

v1.0

Prüfung von Leistungstransformatoren mit dem LMG671 – Präzise Messtechnik für Typen- und Abnahmeprüfungen

Die Effizienz von Leistungstransformatoren ist ein zentraler Faktor für die Reduzierung von Energieverlusten im Versorgungsnetz, ganz zu schweigen von der Einhaltung zunehmend strenger regulatorischer Vorgaben durch verbrauchende Einrichtungen wie Rechenzentren. Ineffizienz in der Leistungsübertragung resultiert in finanziellen Verlusten und erhöhte Treibhausgasemission. Beides ist zu vermeiden. Im Rahmen von Typen- und Abnahmeprüfungen werden Leistungstransformatoren sowohl in deren wesentlichen elektrischen Parametern spezifiziert, als auch schließlich auf Einhaltung dieser und weiterer regulatorischer Anforderungen geprüft und zertifiziert. Hohe angestrebte Effizienz und Konformität ist das Ziel. Die zu prüfenden elektrischen Leistungsparameter müssen mit hierbei mit höchster Präzision ermittelt und analysiert werden. Ergänzend sind Hersteller gefordert für modernste Anwendungsfelder spezielle Sonderprüfungen durchzuführen.

Typenprüfung

- **Vor der Serienproduktion**
- Beurteilung der Eignung des Transformator-Modells für vorgesehene Anwendungen
- Umfasst mechanische und **elektrische Prüfung**, Isolations- und Wärmeprüfung, u.v.a.

Abnahmeprüfung

- **Nach der Herstellung**
- Vor Ort oder im Prüfinstitut
- Beurteilung der Gewährleistung der Qualität und Zuverlässigkeit
- Einhaltung normativer/regulatorischer Forderungen¹
- Umfasst Sichtprüfung, **elektrische Prüfung**, Funktionsprüfung, u.v.a.



Themen

- Warum sind Leistungsmessgeräte besonders geeignet?
- Welche Normen sind zu berücksichtigen?
- Welche elektrischen Parameter werden gemessen?
- Welche Verlustanteile besitzt ein Transformator?
- Was ist der K-Faktor?
- Wie wird die „korrigierte“ Leistung gemessen?
- Wie hilft der LMG671 interne Skripteditor?
- Wie können Messbereiche erweitert werden?
- Welche Parameter eines Leistungsmessgeräts sind zu berücksichtigen?

¹ Normen und Regularien, welche präzise Messungen zur Gewährleistung von Qualität, Sicherheit und Normkonformität fordern, sind z.B.:

- **EU-Verordnung 548/2014:** Energieeffizienzgrenzwerte (Leerlauf- und Lastverluste).
- **IEC 60076-1:** Internationale Prüfverfahren und Toleranzen z.B. für Verluste, Spannungen, Temperaturen.
- **IEEE C57.12:** Nordamerikanische Prüfstandards und -methoden.

Eine Schlüsselstellung bei der elektrischen Prüfung nimmt die genaue Messung von Leerlauf- und Kurzschlussverlusten, sowie weiteren relevanten Größen wie Wirk- und Blindleistung, Oberschwingungsanteilen, Phasenverschiebung, Leistungsfaktor, u.v.w. Sowohl Hersteller als auch Prüfinstitute stehen im Rahmen der elektrischen Prüfung bestimmten Herausforderungen gegenüber, für jene der Einsatz von **Präzisions-Leistungsmessgeräten wie dem ZES ZIMMER LMG671** entsprechende anwenderorientierte Lösungen bietet.

Herausforderungen für Hersteller und Prüfinstitute Lösung durch Präzisions-Leistungsmessung mit LMG671	
Ermittlung aller erforderlichen elektrischen Parameter <ul style="list-style-type: none"> ▪ Umfangreiche Messung von direkten und abgleitenden elektrischen Messgrößen ▪ Synchronisierte Mehrkanalmessung für besondere Prüfanforderungen ▪ Normgerechte Messungen nach bspw. IEC 60076-1, IEEE C57.12² 	Verlässliche Präzision ermittelter elektrischer Parameter <ul style="list-style-type: none"> ▪ Höchste Genauigkeit auch bei geringen Leistungen oder Strömen ▪ Systemische Temperaturkompensation und geringe Langzeitdrift ▪ Rückführbares Kalibrierzertifikat für auditsichere Prüfprotokolle
Anwendungsorientierte und bedienoptimierte Funktionalität <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorkonfigurierbare Messprofile für Leerlauf- und Kurzschlussprüfungen ▪ FFT-Analyse, K-Faktor-Berechnung, Leistungskorrektur, kundenspezifische Messmenüs ▪ Flexible Kanaluordnung für unterschiedliche Transformatorbauformen 	Integration und Fernsteuerung eingesetzter Prüfmittel <ul style="list-style-type: none"> ▪ Standardisierte Schnittstellen: Ethernet, RS232 ▪ Vollständig fernsteuerbar für automatisierte Prüfabläufe (SCPI-Kommandos) ▪ Datenexport direkt aus dem Messgerät

Tabelle 1: Prüfherausforderungen und Messlösungen durch Präzisions-Leistungsmessgerät LMG671

Der folgende Bericht schildert die zentrale Bedeutung des LMG671 Präzisions-Leistungsmessgeräts in Rahmen der Prüfung von Leistungstransformatoren und wie obige Lösungen praktisch zur Anwendung kommen. Die exemplarisch dargestellten Messungen treten sowohl verpflichtend in Typen- und Abnahmeprüfungen, als auch ergänzend in partikulären Prüfungen für spezielle Anwendungen auf.



Erkenntnis

Die Effizienz von Leistungstransformatoren ist zentral für Energieeinsparung und Normkonformität. Typen- und Abnahmeprüfungen erfordern höchste Messpräzision für elektrische Parameter, wie unter anderem Leerlauf- und Kurzschlussverluste und resultierende Effizienz. Das LMG671 Präzisions-Leistungsmessgerät von ZES ZIMMER bietet hierfür mit hoher Genauigkeit, flexibler Mehrkanalmessung und normgerechter Datenerfassung eine optimale Prüflösung, sowohl für Hersteller als auch Prüfinstitute. Zuverlässige Verlustmessung mit geringer Unsicherheit schafft Vertrauen und reduziert Diskussionen.

² Alle elektrischen Messgrößen, wie Spannung, Strom, Leistung, Phasenwinkel, Verlustleistung und Oberschwingungen, müssen mit normativ definierter Messgenauigkeit, unter definierten Prüfbedingungen, über geeignete Zeiträume (Stabilitätsfenster) und mit nachweisbarer Rückführbarkeit erfasst und dokumentiert werden.

Wirkungsgrad- und Verlustmessung – Präzise Mehrkanalmessung an dreiphasigen Transformatoren

Eisen- und Kupferverluste bilden womöglich die zentralen Verlustkomponenten eines Transformators. Die präzise Messung dieser Verluste ist elementarer Bestandteil jeder Typen- und Abnahmeprüfung und liefert die theoretische Grundlage der Aufteilung und physikalisch nachvollziehbare Zuordnung der Verlustmechanismen, gemäß Ersatzschaltbild in Abbildung 1. Durch jenes Ersatzmodell gestützt, werden beide Verlustkomponenten durch Leerlauf- und Kurzschlussprüfungen³ ermittelt. Das LMG671 ermöglicht beide Verlustmechanismen hochgenau, normkonform und vollständig zu messen und zu analysieren.

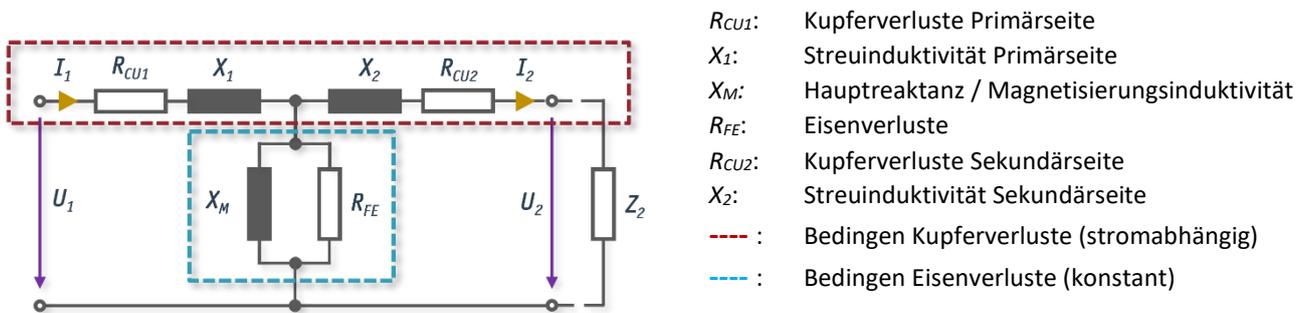


Abbildung 1: Reduziertes Ersatzschaltung des belasteten Transformators

Mit bis zu 7, durch Leistungsmesskanäle⁴ und/oder Prozess-Signal-Schnittstellen, bestückbaren Messeinschüben, wird die vollständige Anschaltung der zu messenden Leistungen aller Phasen und ergänzenden Sensorsignalen an das Messgerät ermöglicht, wie in Abbildung 2 illustriert. Die Bestückung mit einer Prozess-Signal-Schnittstelle (PSI) ergänzt das parallele Erfassen von weiteren, für den jeweiligen Betriebspunkt relevanten, analogen und/oder digitalen Signalen, wie bspw. Umgebungs- und Prüfobjektbedingungen, sprich Temperaturen, Luftfeuchtigkeit, Vibration, etc. Ausdrücklich für die Leistungsverteilung und Schalldämmung in Gebäuden (bspw. Rechenzentren) ist die, für den Lastbetriebspunkt korrespondierende, Vibration, sprich der Schallpegel, von Bedeutung.

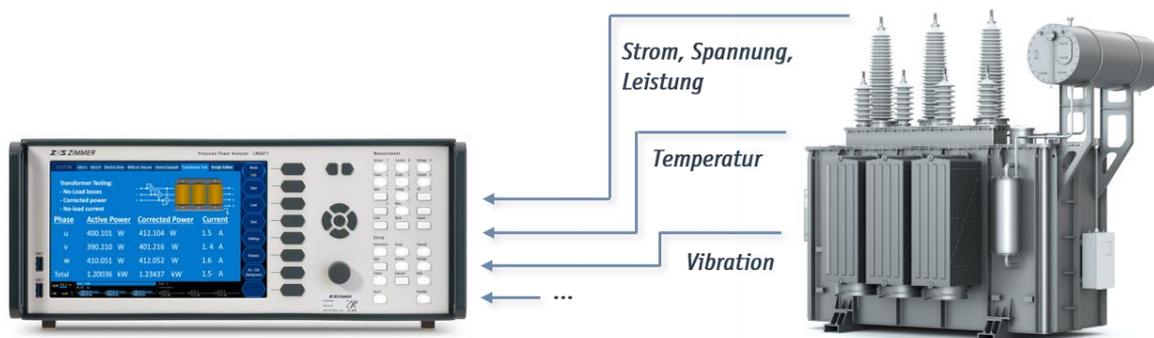


Abbildung 2: Erfassung aller relevanten Parameter mit LMG671 für Leistungs- und Wirkungsgradprüfungen

Insbesondere für normativ bedingte Korrekturen gemessener elektrischer Größen, welche durch Abweichungen zwischen tatsächlichen Prüfbedingungen und spezifizierter Nennwerte entstehen, kann die Messung der Umgebungs- und Wicklungstemperatur wichtig sein. Eine Berechnung der korrigierten Kurzschlussleistung⁵ kann aufgrund der temperaturabhängigen Kupferverluste bei signifikantem Temperaturhub sinnvoll sein. Eine vollumfängliche Anschaltung der Ein- und Ausgangsphasen befähigt die direkte Messung des lastabhängigen

³ Relativ geringe Stromaufnahme im Leerlauf ermöglicht die Vernachlässigung der Wicklungs-/Kupferverluste. Äquivalent können im Kurzschluss die Eisenverluste vernachlässigt werden, da die Spannung relativ gering ist.

⁴ Leistungsmesskanal: Bestehend aus jeweils Strom- und Spannungsmesseingängen, auf geringsten Zeitversatz justiert.

⁵ Die korrigierte Verlustleistung eines Transformators ist eine rechnerisch normierte Größe, die oft zur Standardisierung der Verlustbewertung auf Referenzbedingungen dient (typischerweise auf eine Referenztemperatur z.B. 75 °C gemäß IEC 60076). Sie ist besonders relevant für Kupfer-/Kurzschlussverluste, da diese temperaturabhängig sind.

Wirkungsgrads, welcher schließlich und zusätzlich zu den Resultaten der Verlustleistungsprüfungen dargestellt werden kann, wie in Abbildung 11 illustriert.

Leerlaufprüfung – Messung der Eisenverluste, Leerlaufstroms und korrigierten Leistung

Die Leerlaufprüfung erfolgt realitätsnah unter Messung der drei Phasenleistungen auf der Primärseite des Transformators, sprich hier auf der Hochspannungsseite, mit der Bedingung der offenen Sekundärseite, siehe Abbildung 3.

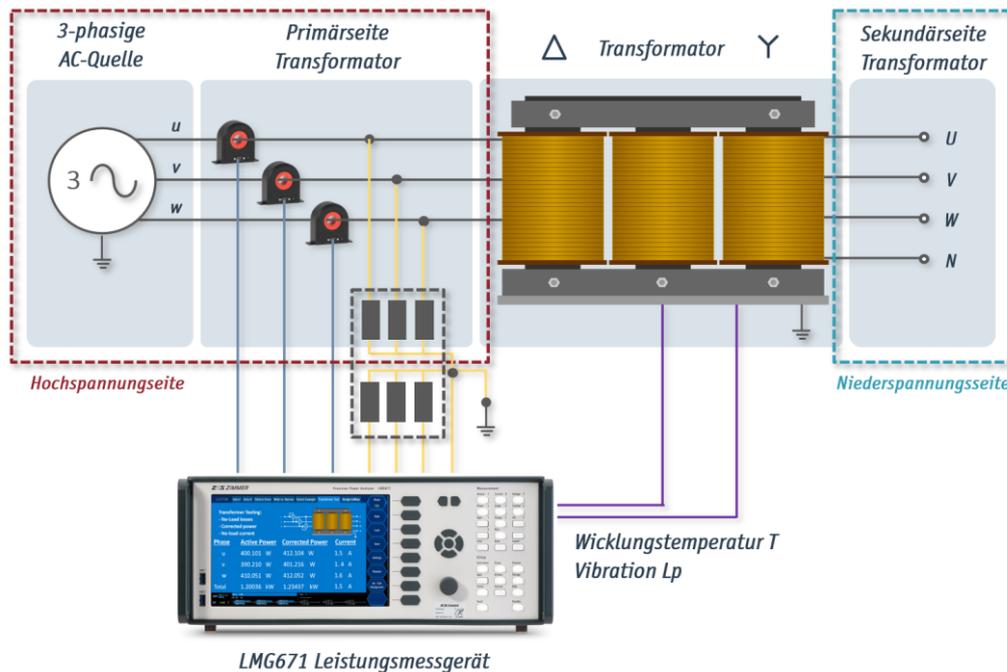


Abbildung 3: Transformator-Leerlaufprüfung und Anschluss an das Leistungsmessgerät LMG671

Hier gehen wir von einem Dreieck-Stern-Transformator aus, wie es typisch für Transformatoren für Rechenzentren oder Gebäudeversorgungen ist. Primärseitig messen wir die verketteten Spannungen (Leiter-Leiter-Spannungen), die Ströme direkt in der Phase. Für die Umrechnung in korrekte Einzelphasenleistungen⁶ bietet das LMG671 eine entsprechende und direkte Umrechnung im Gerät an (Softwareoption L6-OPT-SDC).

Wir messen somit in einem Zuge direkt für die einzelnen Phasen und das Gesamtsystem:

- **Leistungen:** Messung der Leerlaufleistung resp. Leerlauf- bzw. Eisenverluste
- **Ströme:** Messung des Magnetisierungsstroms
- **Spannungen:** Kontrolle der Prüfbedingungen im Nennspannungsbetrieb
- **Frequenz:** Messung der Frequenz im Betriebspunkt der Prüfung

Besonders während Leerlaufprüfungen ergeben sich geringe Leistungsfaktoren, die Leistungsmessgeräte, sowie externe Stromsensoren, mit höchster Phasengenauigkeit erfordern. Amplitudengenauigkeit des Messsystems ist sehr wichtig, Phasengenauigkeit unverzichtbar!

Typischerweise bewegt man sich bei Leerlauf-Leistungsfaktoren im Bereich von 0.1 - 0.4 (Blechkpaket z.B. M4 oder M5). Mit zunehmender Leistungsklasse des zu prüfenden Transformators und auch bei verlustoptimierten Kernblechdesigns (Hocheffizienz-Transformatoren; amorphes Blechkpaketdesign), ergeben sich Leistungsfaktoren von bspw. 0.008, siehe exemplarische Abhängigkeit in Abbildung 4.

⁶ Bedingt durch den Amplitudenfaktor $\sqrt{3}$ (ideal) und eine 30°-Phasenverschiebung zwischen Stern- und Dreieckspannung, muss hier eine Umrechnung zum Sternsystem erfolgen, um mit dem Phasenstrom eine korrekte Phasenleistung zu erhalten.

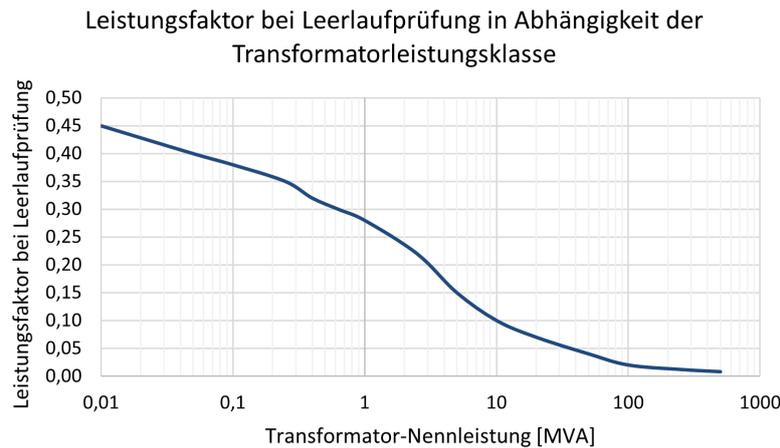


Abbildung 4: Leistungsfaktoren bei Leerlaufprüfungen in Abhängigkeit der Transformatorleistungsklasse



Erkenntnis

Neben der Amplitudengenauigkeit stellt gerade bei Leerlaufprüfungen, mit teilweise sehr kleinen Leistungsfaktoren, die Phasengenauigkeit der Leistungsmessung eine wichtige Rolle dar. Der von Haus aus genaueste, im Nanosekundenbereich, justierte Laufzeitabgleich von Strom- und Spannungsmessung der LMG671 Messkanäle, lässt zweifelsfreie und präzise Leistungsmessungen bei selbst geringsten Leistungsfaktoren von ≤ 0.001 zu. Anwenderorientiert sind Messtoleranzen der Leistung für Leistungsfaktoren (PF) $0 \leq PF \leq 1$ spezifiziert und birken keine Stolperfallen, wie bspw. durch zusätzliche komplizierte Zusatzfehlertherme.



Hinweis

Messsysteme, welche eine flexible Verknüpfung von Spannungs- und Strommesseingänge ermöglichen, können hier bedenkliche Phasenfehler einbringen und sollten, gegenüber dedizierten Leistungsmessgeräten mit festen kombinierten Spannungs- und Strommesseingängen (LMG-Serie), sowie kalibrierter Leistungsfaktorgenauigkeit, eher kritisch erachtet werden.

Korrigierte Leistung

Um genormte⁷ Vergleichswerte zu erhalten, ist es notwendig die Einflüsse der Messumgebung sowie nicht zu den spezifizierten Nennwerten exakte Versorgungsbedingungen zu berücksichtigen. Dies erfolgt in einer sogenannten korrigierten Leistung $P_{0,corr}$. Die in der Leerlaufprüfung ermittelte Leerlaufleistung, sprich die Eisenverluste bestehend aus Hysterese- und Wirbelstromverlusten, sind nicht linear abhängig von Spannung und Frequenz. Insbesondere sind Wirbelstromverluste proportional zum Spannungsquadrat. In der Regel wird für Werksabnahme, Typenprüfungen und Konformitätsnachweise zur Berechnung nachstehende Formel gem. IEC 60076-19-1 angewendet:

$$P_{0,corr} = P_0 \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1,N}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_N}{f} \right)^{1.5}$$

P_0 :	Gemessene Leerlaufverluste (Wirkleistung in W)
U_1 :	Effektive Primärspannung während der Messung
$U_{1,N}$:	Nennspannung des Transformators
f :	Frequenz bei der Messung
f_N :	Nennfrequenz (meist 50 oder 60 Hz)

⁷ Normative Grundlagen für die korrigierte Leistung: IEC 60076 und EU-Verordnung 548/2014

Die Frequenzkorrektur basiert hier auf empirischer Näherung (Hysterese $\sim f^{1.5}$). Das Leistungsmessgerät LMG671 bietet hier mit dem integrierten Skripteditor die direkte Berechnung dieser korrigierten Leistung an, siehe Abbildung 5. Alle Messgrößen und Messwerte für die Leerlaufprüfung können in einem an die jeweiligen Bedürfnisse anwendererstellbare Messmenü auf einem Blick klar zusammengetragen werden, wie in den Abbildung 6 dargestellt.

```

CUSTOM Intro I Intro II Electric Drive Wide vs. Narrow Device Example Transformer Test Script Editor
1 def{
2 Pcorr1 = "W"
3 Pcorr2 = "W"
4 Pcorr3 = "W"
5 Pcorrsum = "W"
6 }
7 |
8 Pcorr1 = p1121?*(1+(udc1121?-
  utrms1121?)/udc1121?)
9 Pcorr2 = p1221?*(1+(udc1221?-
  utrms1221?)/udc1221?)
10 Pcorr3 = p1321?*(1+(udc1321?-
  utrms1321?)/udc1321?)
11 Pcorrsum = Pcorr1+Pcorr2+Pcorr3
12

```

Abbildung 5: LMG671 Skripteditor zur Berechnung der korrigierten Leerlaufleistung

Transformer Testing:
 - No-Load losses
 - Corrected power
 - No-load current

Phase	Active Power	Corrected Power	Current
u	400.101 W	412.104 W	1.5 A
v	390.210 W	401.216 W	1.4 A
w	410.051 W	412.052 W	1.6 A
Total	1.20036 kW	1.23437 kW	1.5 A

Additional info: Cycle: 500.0 ms, Grp.: 1 File, 49.95 Hz, Grp.: 2, Ctrl: Local

Abbildung 6: Exemplarisches LMG671 „Custom Menu“ für die Leerlaufprüfung

Kurzschlussprüfung – Messung der Kupferverluste und komplexen Kurzschlussimpedanz

Anreihend an die Leerlaufprüfung erfolgt die Kurzschlussprüfung, welche von der Vorgehensweise im Prinzip umgekehrt zur Leerlaufprüfung erfolgt. Somit ergibt sich äquivalente Anschaltung an das Leistungsmessgerät der Primärseite, wobei die Sekundärseite (alle Phasen) des Transformators kurzgeschlossen wird.

Wir messen somit in einem Zuge direkt für die einzelnen Phasen und das Gesamtsystem:

- **Leistungen:** Messung der Kurzschlussleistung resp. Kurzschluss- bzw. Kupferverluste
- **Ströme:** Messung der Sollströme (Erreichen des Nennstroms)
- **Spannungen:** Messung zur Kontrolle bis zum Erreichen des Nennstroms
- **Impedanz:** Messung der komplexen Gesamtimpedanz

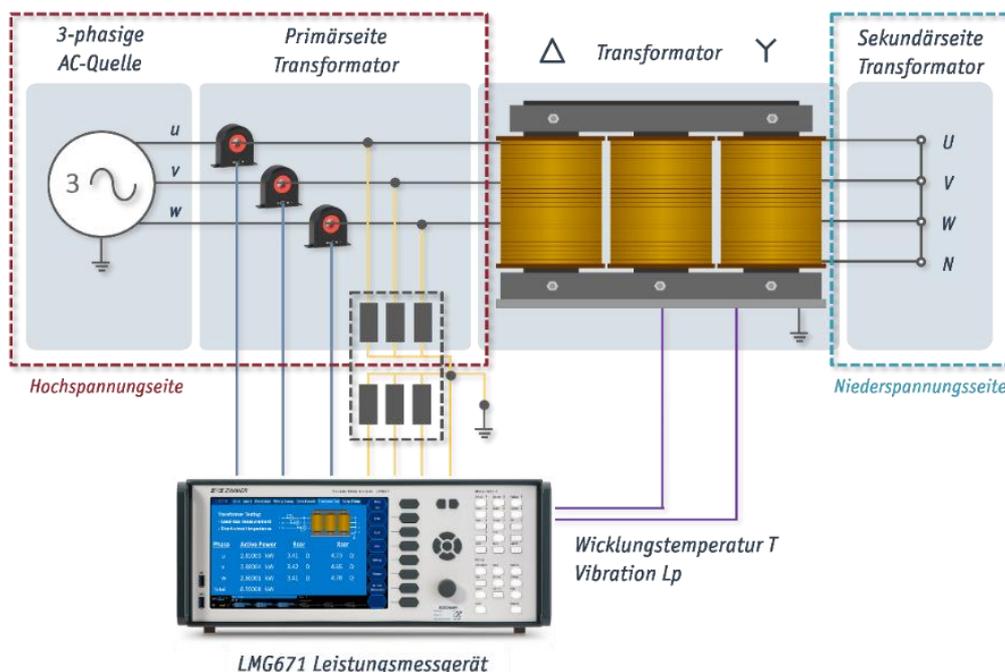


Abbildung 7: Transformator-Kurzschlussprüfung und Anschluss an das Leistungsmessgerät LMG671

Kurzschlussimpedanz

Weiterer Vorteil der Anwendung von modernen Leistungsmessgeräten für Transformatorprüfungen sind die umfangreichen Messwerte, welche im Zuge der Kurzschlussprüfung die zeitgleiche Messung und Prüfung der Einzelphasen- und Gesamtimpedanz ermöglicht. Die gemessene Kompleximpedanz wird für die Ermittlung der seriellen Wicklungswirkwiderstände und Wicklungsstreureaktanzen im Ersatzschaltbild, siehe rote Markierung in Abbildung 1, für die Transformatorcharakteristik herangezogen, wie bspw. die Kurzschlussstromberechnung zur Dimensionierung von Sicherungen, Leistungsschaltern, unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) und Schutzeinrichtungen. Die Norm IEC 60076 gibt Mindest- und Maximalwerte für jene Impedanz an.

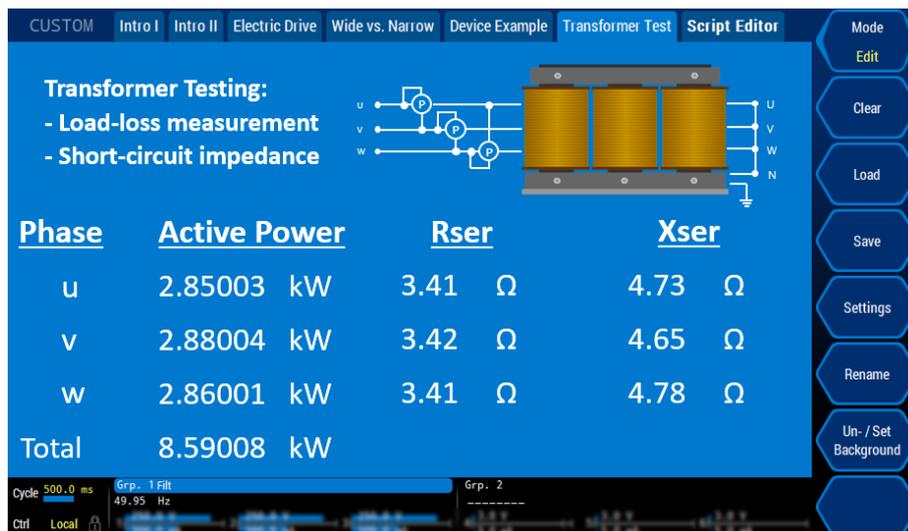


Abbildung 8: Exemplarisches LMG671 „Custom Menu“ für die Kurzschlussprüfung

Praktisch erfolgt gleiche Messung auch parallel in der Leerlaufprüfung, wobei die Kompleximpedanz und resistiver, sowie reaktiver Anteil den Parallelzweig des Ersatzschaltbilds ergeben, siehe blaue Markierung in Abbildung 1.

Auch für die Kurzschlussprüfung können alle relevanten Messgrößen und Messwerte in einem dedizierten Messmenü zugänglich angezeigt werden, wie in den Abbildung 8 dargestellt.

Effizienzprüfung – Direkte Messung des lastabhängigen Wirkungsgrads und abgeleitete Prüfungen

Wirkungsgradmessung

Oft wird der lastabhängige Wirkungsgrad eines Transformators aus den, in diesem Falle, vorausgehenden Verlustanteilen aus Leerlauf- und Kurzschlussprüfung, gemäß nachstehender Formel, ermittelt, wobei die Berechnung auf der Nennscheinleistung gestützt ist, welche jedoch auch Blindanteile beinhaltet. Die Verlustanteile in Scheinleistung ausgedrückt wurden dank des Leistungsmessgeräts begleitend mitgemessen.

$$\eta = \frac{S_N - (S_0 - S_{KS})}{S_N}$$

S_N : Nennscheinleistung
 S_0 : Gemessene Leerlaufscheinleistung
 S_{KS} : Gemessene Kurzschlusscheinleistung

Die Schwierigkeit und der Nachteil dieser Ermittlungsmethode ist, dass wir in diesem Fall von exakt gleichem Messpunkt. Es sollten äquivalente Umgebungsbedingungen (Temperatur) und idealerweise geringster Varianz zwischen gemessenen Wert im Betriebspunkt und spezifiziertem Nennwert vorausgesetzt sein, um einen plausiblen und präzisen berechneten Wirkungsgrad zu erhalten. Zusätzlich wollen wir eine lastabhängige Wirkungsgradkennlinie erhalten, was vorig beschriebene Voraussetzung noch hürdenreicher darstellt. Das ist nur schwer zu bewerkstelligen.

Lösung: Besser ist die direkte Messung der tatsächlich, für die Energieumwandlung wirksame, Wirkleistung auf Primär- und Sekundärseite, wobei, durch Anschluss einer sekundärseitigen 3-phasigen Last⁸, ein Durchlauf für verschiedene Lastbereiche die vollständige Kennlinie gemessen werden kann. Hierfür bedarf es eines Leistungsmessgeräts, welches sowohl primär- als auch sekundärseitig eine gruppenseparierte Leistungsmessung (2x 3-Phasen-Gruppen) mit demnach 6 Leistungsmesskanälen ermöglicht. In beschriebenen Prüflingsfall kommt hier auch wieder die Stern-Dreieck-Umschaltung zu tragen, da wir primärseitig in Dreieck und sekundärseitig in Stern oder auch alternativ in Dreieck messen, wobei es für das Heranziehen der Gesamtsystemleistungen unerheblich ist, ob eine Umrechnung des Systems (Dreieck-zu-Stern, Stern-zu-Dreieck) erfolgt.

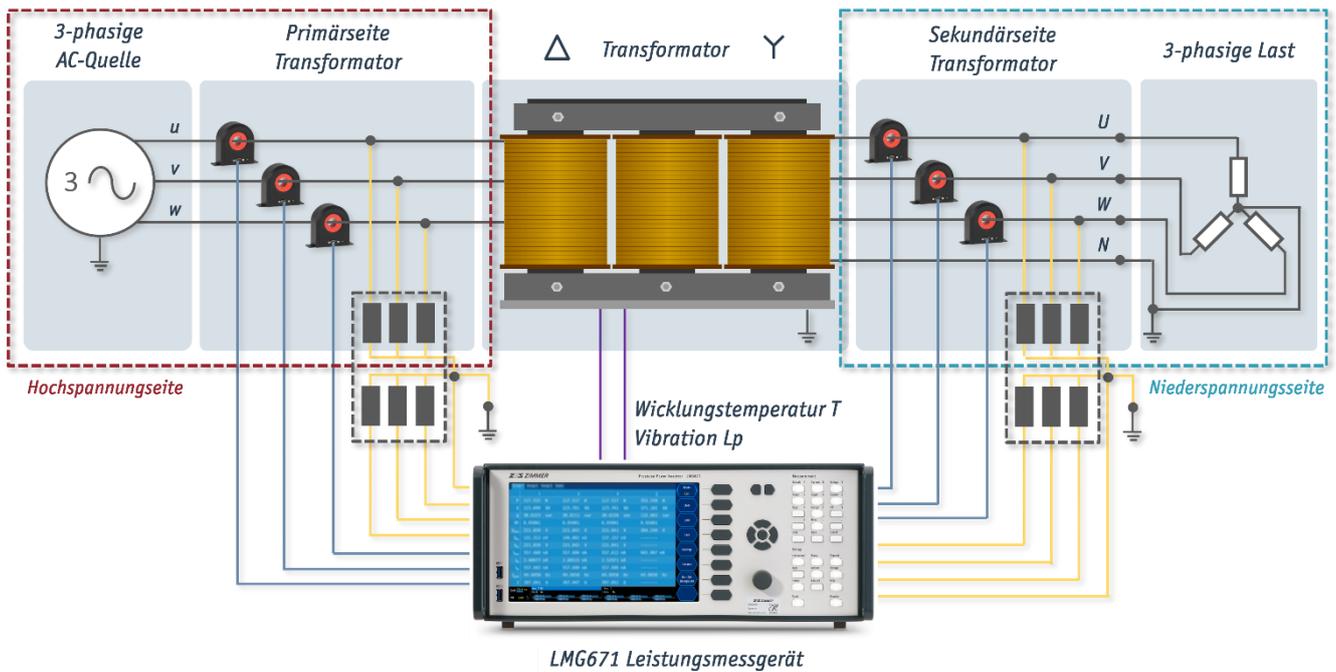


Abbildung 9: Transformator-Effizienzprüfung und Anschluss an das Leistungsmessgerät LMG671

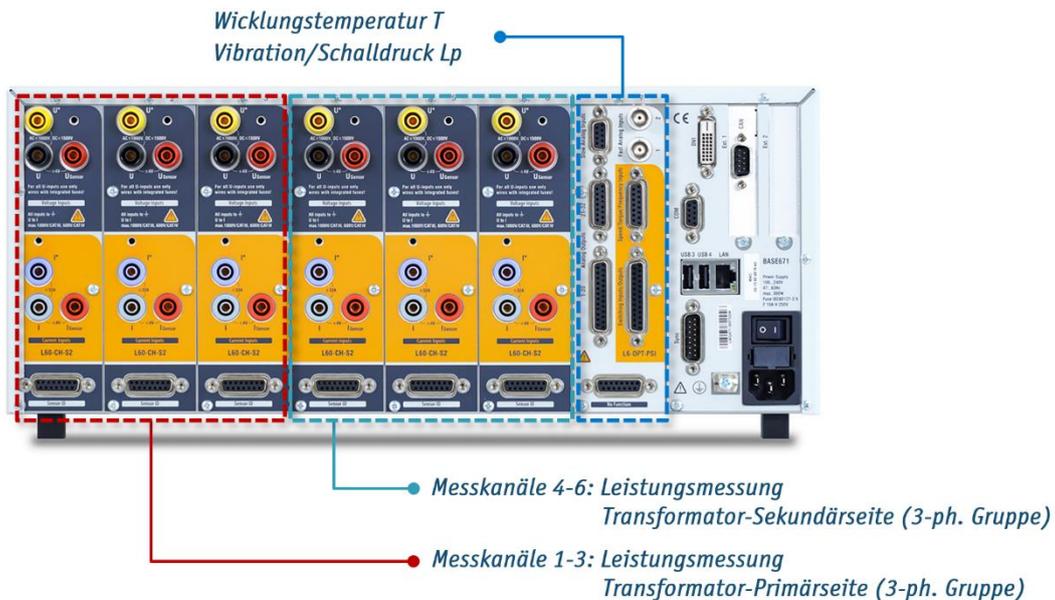


Abbildung 10: Anschaltung Transformator-Primär- und Sekundärseite an das LMG671

⁸ Als 3-phasige Last kann ein Widerstandslastbank (gleichmäßige ohmsche Last, einfach steuerbar) oder elektronische Last (Einstellbare Strom-/Leistungsregelung, ggf. Phasenverschiebung) verwendet werden. Erdenklich bei programmierbaren elektronischen Lasten ist auch eine realitätsnahe Rechenzentrumssimulation (3+N Verbraucher).

Wir messen, gemäß Anschaltung in Abbildung 9 und Abbildung 10, somit in einem Zuge direkt für die einzelnen Phasen und die Gesamtsysteme:

- **Leistungen:** Messung der Primär- und Sekundärleistung
- **Ströme:** Messung der Primär- und Sekundärströme
- **Spannungen:** Messung der Primär- und Sekundärspannungen
- **Frequenzen:** Messung der Primär- und Sekundärgrundschwingungsfrequenzen
- **Harmonische:** Messung der Harmonischen und Bestimmung von Harmonischenverzerrung (THD, ableitend TDD), Verzerrungsleistung D, Phasenverschiebung (Phase-Displacement), Phasensymmetrie

Schließlich erhalten wir aus der Messung obiger Größen direkt, als bereits im LMG671 zyklisch ermittelten, die Messgrößen Leistungsverluste und den Wirkungsgrad. Vorteil ist das Einhalten exakt gleicher Messbedingungen für den jeweiligen Lastbetriebspunkt, in diesem alle Verlustmechanismen prinzipbedingt inkludiert sind. Wir erhalten eine wesentlich plausiblere und präzisere Messung, welche, insbesondere bei immer zunehmender normativer Energieeffizianzforderungen, eine zweifelsfrei verlässliche Aussage über Einhaltung von Limits oder Mindestwerte zulässt. Eine typische gemessene Wirkungsgradkennlinie eines Leistungstransformators ist exemplarisch in Abbildung 11 illustriert, welche zusätzlich zur Verdeutlichung der Verlusteinflüsse die sowohl Kupfer (Kurzschluss)- und Eisenverluste (Leerlauf) aufzeigt. Selbstverständlich kann auch für diese Messung mit dem LMG671 CUSTOM Menü ein für diese Wirkungsgradmessung dediziertes Anzeigeoberfläche kreiert werden.

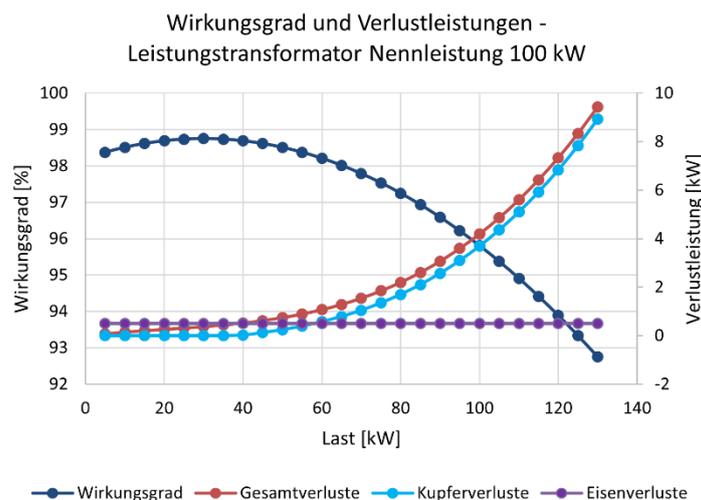


Abbildung 11: Typische Wirkungsgradkennlinie eines Transformators

Verifikation der Phasensymmetrie

Das LMG671 offeriert über die Messung der Strom-, Spannungs-, Leistungsharmonischen in Effektivwert und Phase die numerische Anzeige, zusätzlich und eleganter die direkte graphisch Anzeige der Spannungen und Ströme als Vektordiagramm für die jeweilige Ordnung, hier wichtig die Grundschwingung.

U_{ind}	53.068 %	I_{ind}	12.654 %	P_{h}	3.5031 W
Q_{h}	11.1997 var	Q_{tot}	13.1767 var	D	6.94208 var
S_{h}	13.6344 VA	φ_{fund}	73.4930 °	f_{h}	49.9555 Hz
f_{h}	49.9555 Hz				

	U_{T}	I_{T}	P_{T}
0	0.210 V	0.424 mA	0.0000 W
1	128.230 V	93.177 mA	3.3948 W
2	0.341 V	0.271 mA	-0.0000 W
3	0.165 V	0.116 mA	-0.0000 W
4	0.185 V	0.130 mA	0.0000 W
5	0.206 V	0.224 mA	-0.0000 W

Präsenzzeit wichtigster Messwerte:

Harmonischenverzerrung, Verzerrungsleistung, Phasenverschiebung, Harmonischenleistungen, Harmonischenphase, ...

Auflistung der Harmonischen:

Harmonischeneffektivwerte von Strom, Spannung, Leistung

Abbildung 12: Beispielanzeige Harmonischenmesswerte LMG671



Abbildung 13: Vektordiagramm – Auszug LMG671 Scope-Menü zur Prüfung der Phasensymmetrie

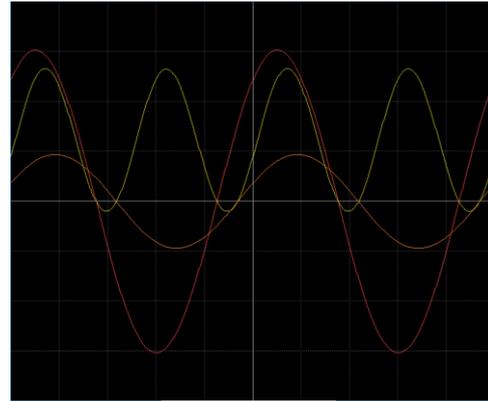


Abbildung 14: Messsignale einer Phase – Auszug LMG671 Scope-Menü zur Prüfung der Signalqualität



Erkenntnis

Das Messen der Effizienz von Leistungstransformatoren ist gegenüber konsekutiver Berechnung aus Einzelverlustmessungen vorzuziehen und mit dem LMG671 und dessen Mehrkanalmessung hürdenfrei möglich. Dies ermöglicht eine direkte durchgängige Messung des Wirkungsgrad über verschiedene Lastbetriebspunkte, mit der Wahrung gleicher Mess-, Prüfbjunkt- und Umgebungsbedingungen zur Abbildung der gesamten Wirkungsgradkennlinie. Zusätzlich erhalten wir aus jener vollumfänglichen Messung über integrierte Visualisierung der Signale (Scope) und Phasenlagen (Vektordiagramm) die direkte und parallele Verifikation der Phasenqualität -und symmetrie.

Weitere Prüfungen und Sondermessungen

Bestimmung der Phase-Displacement - Phasenverschiebung zwischen Sekundär- zu Primärwicklung

Die Phasenverschiebung (Eng.: Phase-Displacement) bei Transformatoren bezieht sich auf die Differenz im Phasenwinkel zwischen der Sekundär- zu Primärspannung bzw. -strom. Diese wird ebenfalls als verbindlicher Teil der Typen- (IEC 60076-1, Abschnitt: Vector group) und (in vereinfachter Form) Abnahmeprüfung (IEC 60076-1, Routine tests) verifiziert.

Der jeweilige Phasenwinkel (z.B. 30° , 150° oder 330°) ergibt sich aus der Wicklungsverschaltung (z.B. Dreieck-Stern oder Stern-Dreieck) und deren relativen Lagen im Kern. Im vorigen Beispieltransformator, mit primärseitig Dreieck- und sekundärseitig Sternschaltung + Neutralleiter als Sternpunkt, ergäbe sich die Bezeichnung Dyn11⁹. Diese Phasenverschiebung von demnach 330° (Sekundärspannung eilt der Primärspannung um 330° nach) ist der Teil der Spezifikation und zu verifizieren, damit der Transformator schließlich korrekt in die Anwendung bzw. das Versorgungsnetz integriert werden kann.

Prinzipbedingt synchronisiert ein Leistungsmessgerät auf eine Spannung oder einen Strom der drei Phasen der jeweiligen Messgruppe, unabhängig voneinander. Daraus resultiert, dass Grundschwungsphasenlagen der gewählten Phasenreferenz, für sowohl Primärwicklung als auch Sekundärwicklung in ihrer individuellen Messgruppe, mit Phasenlage 0° definiert werden. Sprich, eine Differenzbildung zur Ermittlung der Phasenlage wäre ggf. mit herkömmlichen Leistungsmessgeräten nicht direkt möglich.

Das LMG671 bietet für den Anwender zwei direkte Messlösungen:

- **Messlösung 1: 6-Kanal-Messgruppe:**

Im Rahmen der vorig beschriebenen direkten Wirkungsgradmessung (gleichzeitige Messung der elektrischen Primär- und Sekundärgrößen) kann die Gruppierung der Messkanäle in der Benutzeroberfläche so konfiguriert werden, dass alle 6 Leistungsmessungen als ein 6-Phasen-System gruppiert sind, siehe Abbildung

15. Demnach kann über die Harmonischenanalyse, mit Primärspannung Phase 1 (Kanal 1u) als Referenz (Phasenlage = 0°), die absolute Phasenverschiebung der Sekundärspannung Phase 1 (Kanal 4 U) zu Kanal 1 (Referenz) bestimmt werden.

$$\Delta\varphi_{ps} = \varphi_{u4} - \varphi_{u1}$$

$\Delta\varphi_{ps}$: Phasenverschiebung sekundär zu primär
 φ_{u1} : Gemessene Phasenlage Primärspannung u
 φ_{u4} : Gemessene Phasenlage Sekundärspannung U

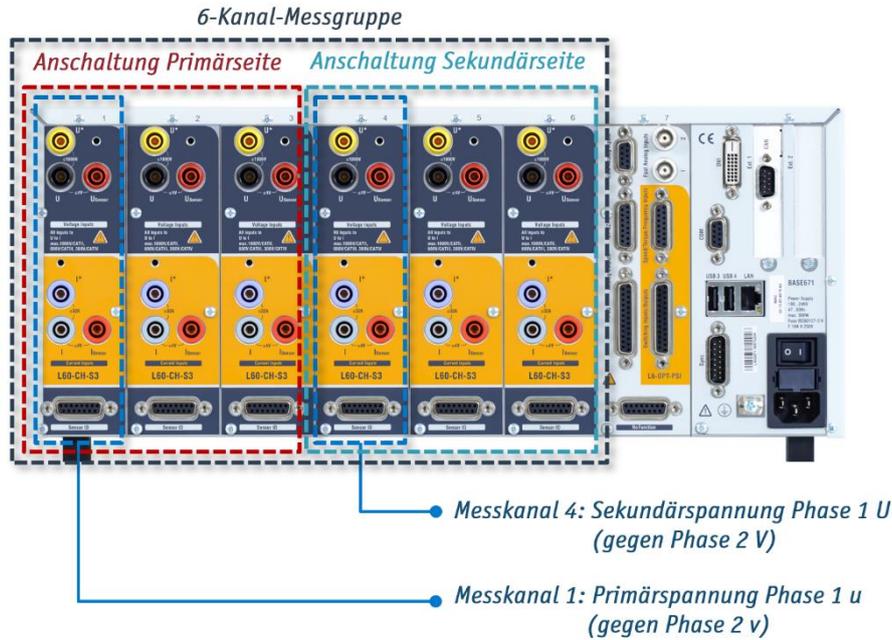


Abbildung 15: Anschaltung und Gruppierung Messlösung 1 zur Prüfung der Phasenverschiebung

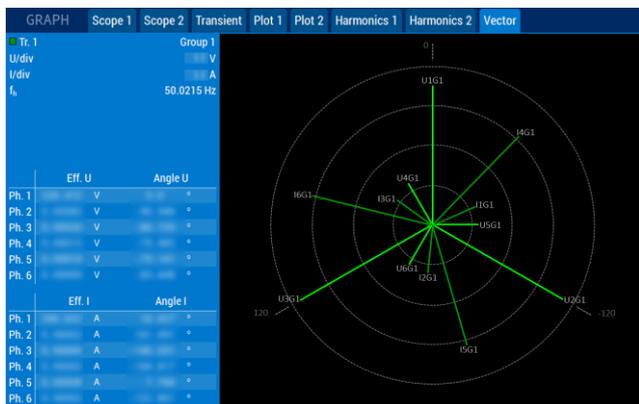


Abbildung 16: Vektordiagramm - Phase-Displacement
Messlösung mit 6-Kanal-Messgruppe

```

CUSTOM Intro I Intro II PFC Converter Wide vs. Narrow Transformer Freq. Inverter Script Samples
1 //Calculating phase displacement
2 //Grouping Transformer Prim + Sec in 2-Channel-Group
3 //Defining variable units
4 def{
5     Phi_u1 = ""
6     Phi_u4 = ""
7     deltaPhi_ps = ""
8 }
9
10 //Calculating phases and displacement btw sec to prim
11 Phi_u1 = buph1111?[1] //phase voltage channel 1
12 Phi_u4 = buph1411?[1] //phase voltage channel 2
13 deltaPhi_ps = Phi_u4 - Phi_u1 //phase displacement
14
15
16
17
    
```

Abbildung 17: Berechnung Phase-Displacement Messlösung mit 6-Kanal-Messgruppe mit Skripteditor

▪ **Messlösung 2: 2-Kanal-Messgruppe:**

Primärspannung der Phase 1 (u) und Sekundärspannung der Phase 1 (U) werden am LMG671 auf 2 konsekutive Kanäle geschaltet und als 2-Kanal-Messgruppe definiert, siehe Abbildung 18. Messkanal 1 bildet die Referenz der Synchronisation und ermittelt in der Harmonischenanalyse für Messkanal 2 (Sekundärspannung Phase 1 U) die entsprechend zu Messkanal 1 (Primärspannung Phase 1 u) verschobene

⁹ Dyn11: D (Dreieckschaltung primär), y (Sternschaltung sekundär), n (Neutralleiter sekundärseitig als Sternpunkt herausgeführt), 11 (Faktor Phasenverschiebung sekundär nachteilend zu primär: 11 * 30° = 330°).

Phasenlage als numerische und auch graphische Ausgabe. Mittels des Skripteditors wird die Differenz berechnet und als abgeleiteter Messwert dem Anwender zur Verfügung gestellt.

$$\Delta\varphi_{ps} = \varphi_{u2} - \varphi_{u1}$$

$\Delta\varphi_{ps}$: Phasenverschiebung sekundär zu primär
 φ_{u1} : Gemessene Phasenlage Primärspannung u
 φ_{u2} : Gemessene Phasenlage Sekundärspannung U

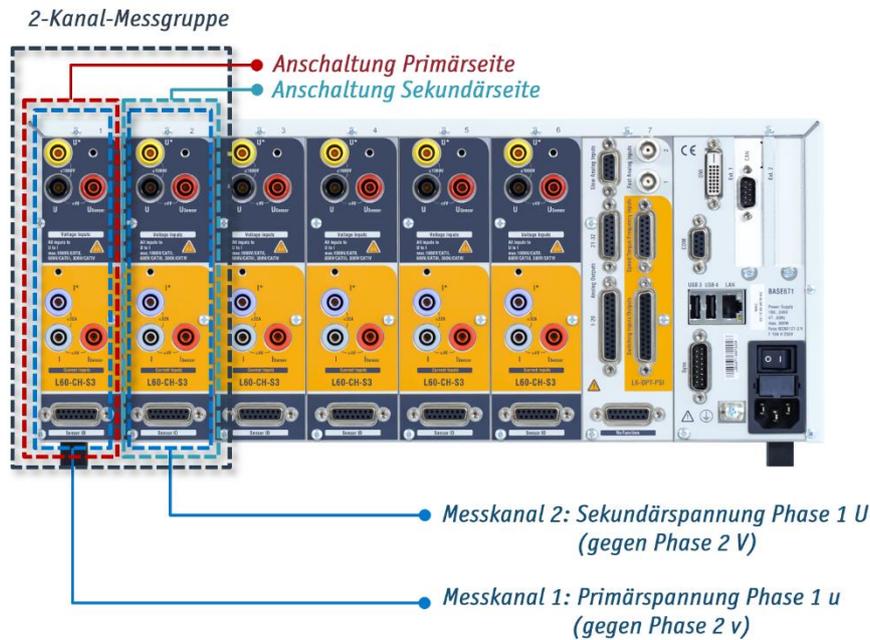


Abbildung 18: Anschaltung und Gruppierung Messlösung 2 zur Prüfung der Phasenverschiebung

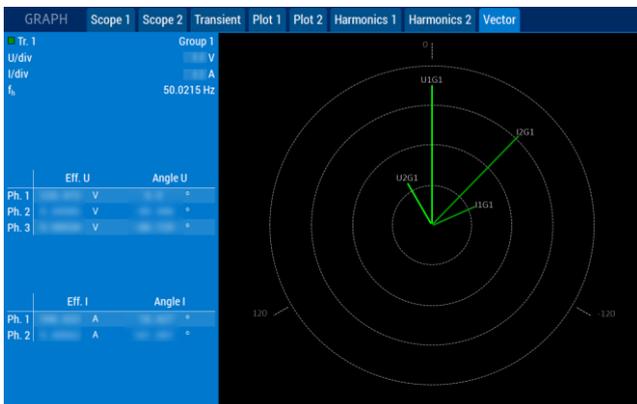


Abbildung 19: Vektordiagramm - Phase-Displacement
Messlösung mit 2-Kanal-Messgruppe

```

CUSTOM Intro I Intro II PFC Converter Wide vs. Narrow Transformer Freq. Inverter Script Samples
1 //Calculating phase displacement
2 //Grouping Transformer Prim + Sec in 2-Channel-Group
3 //Defining variable units
4 def{
5     Phi_u1 = ""
6     Phi_u2 = ""
7     deltaPhi_ps = ""
8 }
9
10 //Calculating phases and displacement btw sec to prim
11 Phi_u1 = buph1111?[1] //phase voltage channel 1
12 Phi_u2 = buph1211?[1] //phase voltage channel 2
13 deltaPhi_ps = Phi_u2 - Phi_u1 //phase displacement
14
15
16
17
    
```

Abbildung 20: Berechnung Phase-Displacement Messlösung mit 2-Kanal-Messgruppe mit Skripteditor

Erkenntnis

Phasenverschiebungen zwischen Primär- und Sekundärwicklung, deren Verifikation durch Typen- und Abnahmeprüfungen normativ gefordert sind, kann mit dem LMG671 im Zuge der direkten vollumfänglichen Wirkungsgradmessung mit 6 Leistungsmesskanälen erfolgen, ohne eine Umverkabelung vornehmen zu müssen. Der einzigartige integrierte Skripteditor befähigt hier die direkte Berechnung aus den Grundschwingungsphasenwinkeln der Harmonischenanalyse.



Hinweis

Messlösung 1 ist hier der Messlösung 2 vorzuziehen, da sie die Differenzbildung von allen Phasen gegeneinander, sprich Primärspannung Phase 2 v (Kanal 2) zu Sekundärspannung Phase 2 V (Kanal 5) usw., zulässt und direkte Aufschlüsse über Symmetrie gibt.

Direkte Messung des K-Faktors – Beurteilung der Widerstandsfähigkeit gegen Stromharmonische

Der K-Faktor (Belastungsfaktor) von insbesondere Hocheffizienz-Transformatoren, ist besonders im Kontext von nicht-linearen Lasten (z.B. Rechenzentren, Datenserver, USVs) wichtig, jedoch wird dieser nicht im Rahmen der klassischen Typenprüfungen (Leerlauf- oder Kurzschlussprüfung) gemessen.

Trotz dessen ist dieser gerade in modernen Anwendungsfeldern bedeutsam. Allerdings wird der Faktor nicht bei der Werksprüfung, sondern im Betrieb, in einer Simulation/Lastprüfung mit Oberschwingungen, einem dedizierten Spezial-Prüfaufbau oder mit geeigneten Leistungsquellen ermittelt.

Der K-Faktor ist ein Maß für die thermische Belastung eines Transformators durch Oberschwingungen im Strom. Er wurde eingeführt, um die erhöhte Erwärmung durch hochfrequente Anteile im Laststrom zu bewerten. Wie prägend verschiedenen Harmonischenanteile zum K-Faktor sein können, ist exemplarisch in Abbildung 21 dargestellt. Transformatoren mit hohem K-Faktor können somit, trotz einkoppelnder Stromharmonischen, im hocheffizienten, sprich energieeffizienten, Lastbereich weiterbetrieben werden.

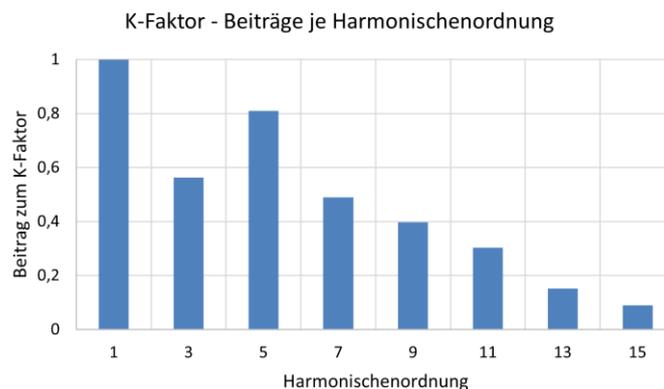


Abbildung 21: Diagramm der Beiträge je Oberschwingung zum K-Faktor von ca. 3.8

K-Faktoren für hochverzerrte Lastbedingungen liegen hier typischerweise bei:

- 13 (K-13): Für Lasten mit höheren Oberschwingungsanteilen (z.B. Serverräume, Rechenzentren).
- 20 (K-20): Für Lasten mit sehr hohen Oberschwingungsanteilen (z.B. Industrieanlagen mit vielen Frequenzumrichtern).

Dem K-Faktor zugrunde liegt die nachstehende Formel, gem. IEEE C57.110, IEC 60076-1 :

$$K = \sum_{n=1}^N \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \cdot n^2$$

I_n :	Strom der n-ten Oberschwingung
I_1 :	Grundsicherungsstrom (bspw. 50 Hz)
n :	Oberschwingungsordnung (z.B. n = 3 -> 150 Hz)

```

CUSTOM Intro I Intro II PFC Converter Wide vs. Narrow Transformer Test Freq. Inverter Script Samples
2 //Cyclic calculation based on current harmonics
3
4 $sum = 0
5
6 for($i = 0; $i <= 40; $i = $i + 1){
7   $sum = $sum + pow(($biam1111?[$i]/$biam1111?[1])*$i
8   2)
9 }
10 K = $sum //Cyclic K factor of transformer

```

Abbildung 22: Berechnung des K-Faktors mittels des integrierten Skripteditors

Das LMG671 bietet mit der Harmonischenanalyse bis zur 2000. Ordnung (respektive bis 150 kHz) ein sehr breites Spektrum zur direkten Messung der Stromharmonischen mittels FFT. Durch ergänzende Anwendung des internen Skripteditors ist die direkte, synchron zur zyklischen Messung, Berechnung des K-Faktors möglich, wie in Abbildung 22 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.illustriert.



Erkenntnis

Das LMG671 bietet mit der Harmonischenanalyse bis zur 2000. Ordnung (respektive bis 150 kHz) ein sehr breites Spektrum zur direkten Messung der Stromharmonischen mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT). Durch ergänzende Anwendung des internen Skripteditors ist die direkte, synchron zur zyklischen Messung, Berechnung und Ausgabe des K-Faktors ermöglicht.

LMG671 als Messlösung - Typische Gerätekonfiguration, kalibrierte Mesgenauigkeit und empfohlenes Zubehör

LMG671 Präzisions-Leistungsmessgerät - Typische Konfiguration für Transformatorprüfungen



Für genaueste, vollumfängliche und zeiteffiziente Prüfung von Leistungstransformatoren empfehlen wir unser Präzisions-Leistungsmessgerät LMG671 mit nachstehender Konfiguration:

- **3 bis 6x L60-CH-S:** Highend-Leistungsmesskanal Typ S (Anzahl gem. zu messenden Phasen)
- **1x L6-OPT-PSI:** Prozess-Signal-Schnittstelle
- **1x L6-OPT-SDC:** Stern-Dreieck-Umrechnung
- **1x L6-OPT-HRM:** Harmonischenanalyse bis 150kHz (2000. Ordnung)
- **1x L6-OPT-EVT:** Transienten-Trigger und Recorder

Die sehr hohe Strommessbereichsdynamik des LMG671 mit dem S-Kanal ermöglicht Messungen bei sowohl sehr kleinen Strömen (Leerlaufprüfung) und hoher Strombelastung (Kurzschlussprüfung), ohne sich für das ein oder andere entscheiden zu müssen.

Das bietet der LMG671 Leistungsmesskanal Typ S

Elektrische Spezifikation für höchste Ansprüche:

- **Bandbreite:** DC, 0.05 Hz ... 10 MHz
- **AC-Leistungsgenauigkeit (45 Hz...65 Hz):** $\pm (0.015\% \text{ v. Messwert} + 0.01\% \text{ v. Messbereich})$
- **Spannungseingänge:** 300 mV – 1000 V direkt
- **Stromeingänge:** 500 μ A – 32 A direkt

Hervorragende AC-Strommessbereichsdynamik:

- **Messbereiche:** 500 μ A bis 32 A in 14 Messbereichen
- **Crest-Faktoren:** Faktoren bis zu 28 (Effektiv- zu Spitzenwert)
- **Messbereichserweiterung:** Erweiterung auf bis zu 10 kA mit Präzisions-Stromwandler der PCT-/Dx-Serie oder Präzisions-Wechselstromwandler der LMG-Z5x2 Serie, ohne Kompromisse in Amplituden- und Phasengenauigkeit

Prüfstandsintegration und automatisierte Fernsteuerung:

- **Fernsteuer-Schnittstellen:** Gigabit-Ethern, RS232, CAN
- **Datenlogging und -export:** 8GB interne SSD oder auf ext. USB-Massenspeicher
- **Software:** LMG600 Control PC-Software mit Plugin-Tools LMG600 Remote (GUI-Fernsteuerung, kostenfrei) und LMG600 SampleVision (Abtastwertanalyse, optional)

Strommessbereichserweiterung

In professionellen Messumgebungen, speziell für Typ- und Abnahmeprüfungen gemäß IEC 60076, verdrängen Fluxgate-Stromsensoren zunehmend klassische Stromwandler zur Messbereichserweiterung, besonders im Bereich:

- **Niedriger Ströme:** z.B. Leerlaufprüfung bei lediglich ca. 1 – 10 % des Transformatornennstroms
- **Hoher Genauigkeitsanforderungen:** Messtoleranz < 0.1 % und hohe thermische Stabilität
- **Breitbandiger Messbedarf:** Harmonische Anteile in Prüfaufbauten mit Netzverzerrungen oder Prüfquellen



Abbildung 23: Fluxgate-basierte Präzisions-Stromwandler der PCT- oder Dx-Serie

Das bieten Stromsensoren der PCT- und Dx-Serie

Elektrische Spezifikation – Kompromisslose Genauigkeit:

- **Bandbreite:** DC ... 10 MHz (bis 600 A), ... 400 kHz (bis 2000 A), ... 100 kHz (bis 10 kA)
- **AC-Genauigkeit** (z.B. 5000 A Sensor): $\pm (0.002\% \text{ v. Messwert} + 0.00002\% \text{ v. Messbereich})$
- **Phasengenauigkeit** (z.B. 5000 A Sensor): $\pm 0.02^\circ$ (sogar $\pm 0.01^\circ$ bei z.B. 2000 A Sensor)
- **Features:** Versorgung (teilweise) direkt aus dem LMG671 möglich mit LMG600 Plug'n'Measure; „ASPC“ Schutzelektronik vor typischen Fehlersituationen (z.B. Unterbrechung der Sensorversorgung bei aktiver Strommessung, Überstrom etc.)



Hinweis

Bei Transformatoren höherer Leistung und entsprechend höheren Spannungen unterstützen zusätzliche Isolationen in der Stromsensordurchführung die Spannungsfestigkeit, sollte der Messaufbau dies bedingen. Für unser Messgerät LMG671 gehen wir keine Kompromisse in der Amplituden- und Phasengenauigkeit ein und setzen auf Fluxgate-Stromsensoren von höchster Qualität, wie dieser der PCT- oder Dx-Serie (Danisense), siehe Abbildung 23.

Autor:

M.Sc. Patrick Fuchs, Leiter Geschäftsfeldentwicklung bei ZES ZIMMER



Tel. +49 6171 88832-91
E-Mail: pfuchs@zes.com

Kontaktieren Sie uns

Für weitere Informationen zu den Produkten, Anwendungen oder Dienstleistungen von ZES ZIMMER kontaktieren Sie uns bitte unter:

ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH
Pfeiffstraße 12
61440 Oberursel
Deutschland

Tel. +49 6171 88832-0
Fax +49 6171 88832-28
E-Mail: info@zes.com
Web: www.zes.com