



Invasive und nichtinvasive Verifikation des Übertragungsverhaltens von Spannungswandlern und Spannungsteilern

Warum sollte das Übertragungsverhalten eines Wandlers bzw. ein Teilers geprüft werden?

In den vergangenen Jahren hat sich durch die vermehrte Verwendung von Leistungselektronik der Bedarf zur Prüfung des Übertragungsverhaltens von Wandlern und Teilern entwickelt. Da die Energieversorger eine gleichbleibende Spannungsqualität gewährleisten müssen, wurden an relevanten Stellen Netzqualitätsmessgeräte zur Nachweispflicht installiert. Ebenso müssen Anlagenbetreiber garantieren, dass ihre Einrichtungen zu keiner nennenswerten Verschlechterung der Spannungsqualität führen. Für diese Messstellen wurden zum Großteil die vorhandene Infrastruktur benutzt, die weitestgehend aus induktiven und kapazitiven Spannungswandlern besteht. Nachteilig ist hierbei jedoch, dass diese Wandler nicht zur Spannungsmessung jenseits der Netzfrequenz konzipiert sind. Wie in der IEC TR 61869-103:2012 beschrieben ist, können Spannungswandler schon im niedrigen Frequenzbereich Resonanzen aufweisen, die zu einer unzulässigen Genauigkeit bei der Netzqualitätsmessung führen. Mittels der von uns entwickelten Verfahren kann die Genauigkeit von Wandlern und Teilern überprüft werden.

Das Übertragungsverhalten eines Wandlers beschreibt, wie sich das Übersetzungsverhältnis in Abhängigkeit von der Frequenz verhält. Die Nennübersetzung eines Wandlers ist nur für die Nennfrequenz (50 Hz oder 60 Hz) im Typenschild angegeben. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es keine bestehende IEC-Norm, in der die Bestimmung des Übertragungsverhaltens eines Wandlers im Rahmen der Werksprüfungen gefordert ist. Fakt ist, dass die Netzbetreiber in den meisten Fällen nicht oder nur äußerst selten über Messungen des Übertragungsverhaltens ihrer verbauten Wandler verfügen. Aus diesem Grund wird für die Beurteilung der Aussagekraft einer Netzqualitätsmessung eine Bestimmung des Übertragungsverhaltens der Wandler empfohlen.

Wie wird die Eignung eines Wandlers oder eines Teilers für eine Netzqualitätsmessung bestimmt?

Die Anforderungen an Genauigkeit einer Spannungsmessung über einen Wandler oder einen Teiler hängen von den Phänomenen ab, die aus der Messung bewertet werden sollen. In der Praxis ist eine Messung der Netzqualität (Spannungsqualität) nach den IEC Normen 61000-4-30 und 61000-4-7 die Hauptanforderung für breitbandige Spannungsmesssysteme. Nach den IEC-Normen sollen beispielweise Oberschwingungen gemessen werden, die zumindest bis zu 50. Ordnung (d.h. 2,5 kHz) mit einer hohen Genauigkeit gemessen werden sollen. Als Erweiterung dazu, werden immer häufiger Netzqualitätsmessungen nach IEC 61000-4-7 durchgeführt, die den Bereich von 2 kHz bis 9 kHz abdecken. Durch den vermehrten Einsatz von Umrichter-Technologien mit Pulsweitenmodulation (PWM) rücken die sogenannten Supraharmonischen im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz mehr in den Fokus, für die es in den höheren Spannungsebenen geeignete Messkonzepte bedarf.

Zusätzlich zu der reinen Netzqualitätsmessung ist auch die Aufzeichnung von hochfrequenten transienten Vorgängen im Netz von Relevanz, um beispielweise die transiente Beanspruchung

von Betriebsmittel (z.B. Transformatoren) während Schalthandlungen zu bewerten. Dabei können je nach dem zu erfassenden Vorgang auch strengere Anforderungen an die Messtechnik gestellt werden, wie beispielsweise eine Abtastrate von bis zu 1 MHz (oder sogar höher).

Die Eignung eines Wandlers oder eines Teilers für eine Netzqualitätsmessung lässt sich durch die Genauigkeitsangaben für den Betrag- und Phasenwinkelfehler des frequenzabhängigen Übersetzungsverhältnisses beurteilen. Diese Genauigkeitsangaben können messtechnisch ermittelt werden. Dafür stehen zwei Grundansätze zur Verfügung: Die invasive Verifikation und die nichtinvasive Verifikation.

Was ist unter einer invasiven Verifikation zu verstehen?

Bei einer invasiven Verifikation werden mit einem Signalgenerator Spannungen bei verschiedenen Frequenzen auf der Primärseite des Wandlers/Teilers angelegt und zeitgleich die resultierenden sekundärseitigen Spannungen gemessen. Aus der primärseitigen und der sekundärseitigen Spannung wird anschließend der Amplituden- und der Phasenwinkelfehler des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens bestimmt.

Für diese Art von Verifikation muss der zu prüfende Wandler/Teiler außer Betrieb genommen werden, um die Prüfspannungen anlegen zu können.

Was ist unter einer nichtinvasiven Verifikation zu verstehen?

Die nichtinvasive Verifikation basiert auf der Messung des Oberschwingungsgehalts der Netzspannung (stationär oder transient) über zwei verschiedene Messstellen bzw. Messsysteme (zu prüfendes Messsystem und Referenzmesssystem). Die Verifikation des zu prüfenden Messsystems erfolgt anschließend über den Vergleich der Messdaten beider Messsysteme. Dies setzt voraus, dass das Referenzmesssystem die Netzspannung mit einer sehr hohen Genauigkeit erfasst und der mögliche Messfehler bekannt ist.

Der Hauptvorteil dieses Verfahren ist, dass der zu prüfende Wandler/Teiler nicht außer Betrieb genommen werden muss. Darüber hinaus bietet dieses Verfahren den Vorteil, dass das Übertragungsverhalten unter realen Netzbedingungen (bzw. Netzspannung) erfolgt.

Unser Dienstleistungskonzept

Für die Bestimmung des Übertragungsverhaltens von Spannungswandlern und -teilern wurden von der Hubert Göbel GmbH verschiedene Messkonzepte entworfen, welche durch praktische Erfahrung mit Vor-Ort-Messungen sowohl in der Mittelspannung als auch in der Hoch- und Höchstspannung erprobt worden sind. Bei allen diesen Messkonzepten wurde besonders Augenmerk auf die Eignung der Verfahren zur Vor-Ort-Messung gelegt, wo aufgrund von Einkopplungen und Störsignalen auf eine spezielle Messtechnik und Signalverarbeitung zu achten ist.

Im Rahmen eines kostenlosen Beratungsgesprächs werden mit den Kunden die Rahmenbedingungen für die Verifikation der Wandler/Teiler geklärt. Aus dem Gespräch wird abgeleitet, welche Verifikationsverfahren sich am besten für den Kunden eignen.

Zum besseren Verständnis unserer Verifikationsverfahren, werden die Messverfahren nachfolgend beschreiben.

Invasive Verfahren:

Die invasive Verifikation kann entweder durch eine übertragungsfunktionsbasierte Bestimmung des Übertragungsverhalten oder durch eine direkte Messung des frequenzabhängigen Übersetzungsverhältnisses erfolgen.

Übertragungsfunktionsbasierte Bestimmung des Übertragungsverhalten

Die Messung der Übertragungsfunktion ist ein bekanntes Messverfahren zur Diagnose des Aktivteils von Leistungstransformatoren. Das Verfahren wird häufig als Frequenzganganalyse bzw. Frequenzgangmessung bezeichnet. Dieses Verfahren ermöglicht eine Messung der Übertragungsfunktion zwischen der primärseitigen und der sekundärseitigen Wicklung eines Wandlers, wie in der Abbildung 1 dargestellt. Aus der gemessenen Übertragungsfunktion lässt sich anschließend das Übersetzungsverhältnis (\ddot{u}) umrechnen. Für die Umrechnung wird die Formel (1) verwendet, wobei „m“ dem Betrag der Übertragungsfunktion entspricht. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens liegt in der Tatsache, dass das Übertragungsverhalten mit einfachen Mitteln in einem breiten Frequenzbereich (bis ca. 1 MHz) bestimmt werden kann. Es ist allerdings darauf zu achten, dass diese Messung in der Regel mit Spannungen kleiner 10 V durchgeführt wird. Erfahrungen, die wir durch zahlreiche Messungen gesammelt haben, zeigen, dass das mit Niederspannung ermittelte Übertragungsverhalten eines Wandlers i.d.R. zu belastbaren Ergebnissen führt.

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{10^m} \quad (1)$$

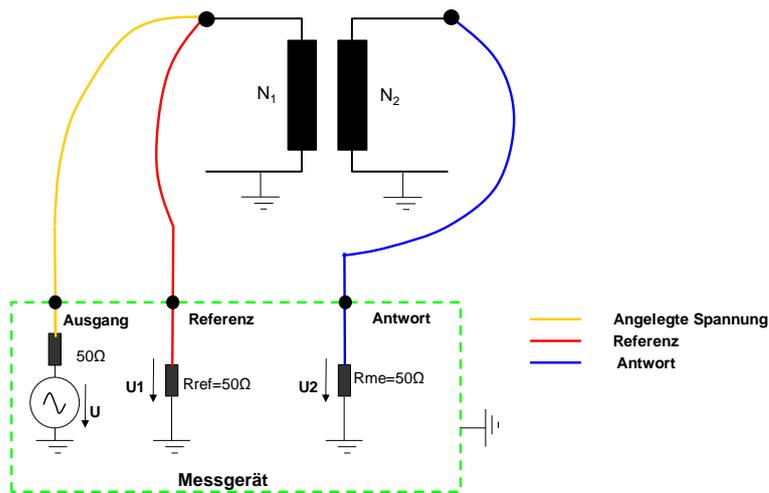


Abbildung 1. Messaufbau für die Bestimmung des Übertragungsverhaltens eines Wandlers/Transformators

Direkte Messung des frequenzabhängigen Übersetzungsverhältnisses

Das Übertragungsverhalten, beispielsweise eines Spannungswandlers, kann direkt bestimmt werden, indem an der Primärseite eine Prüfspannung angelegt und die resultierende Spannung an der Sekundärseite gemessen wird. Durch das Messen beider Spannungen bei einer variablen Frequenz kann das komplexe Übertragungsverhalten mit Amplitude und Phasenwinkel nach der IEC 61869-11 bestimmt werden. Die Berechnung des frequenzabhängigen Amplituden- und Phasenwinkelfehler erfolgt nach den Formeln (2) und (3).

Die Messung wird i.d.R. bei einer Prüfspannung von maximal 600 V_{rms} durchgeführt. Mit diesem Verfahren kann das Übertragungsverhalten bis maximal 3 kHz bestimmt werden.

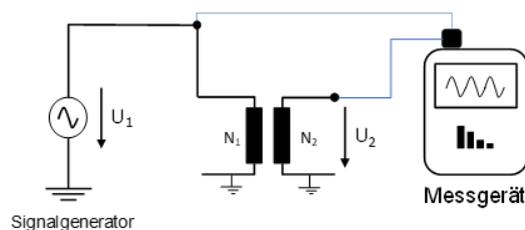


Abbildung 2. Messaufbau (links) und Messergebnisse (rechts) einer Verifikation des Übertragungsverhaltens eines Teilers

$$\varepsilon(f) = \frac{K_r \cdot U_S(f) - U_P(f)}{U_P(f)} \times 100\% \quad (2)$$

$$\varphi_e(f) = \varphi_S(f) - \varphi_P(f) \quad (3)$$

Nichtinvasive Verfahren:

Zur Verifikation des Übertragungsverhaltens von Spannungswandlern im aufgestellten Zustand vor Ort und somit unter seinen realen Betriebsbedingungen, haben wir eine nichtinvasive Prüfung entwickelt (siehe Abbildung 3). Dabei wird der Spannungswandler nicht außer Betrieb genommen und mit der Netzspannung geprüft. Die Herausforderung dabei liegt in einem sehr genauen Referenzmesssystem, welches die Netz- und somit die Prüfspannung ohne großen Messfehler aufzeichnet. Hierfür eignet sich beispielsweise ein ohmsch-kapazitiver Spannungsteiler oder ein kapazitiver Durchführungsteiler.

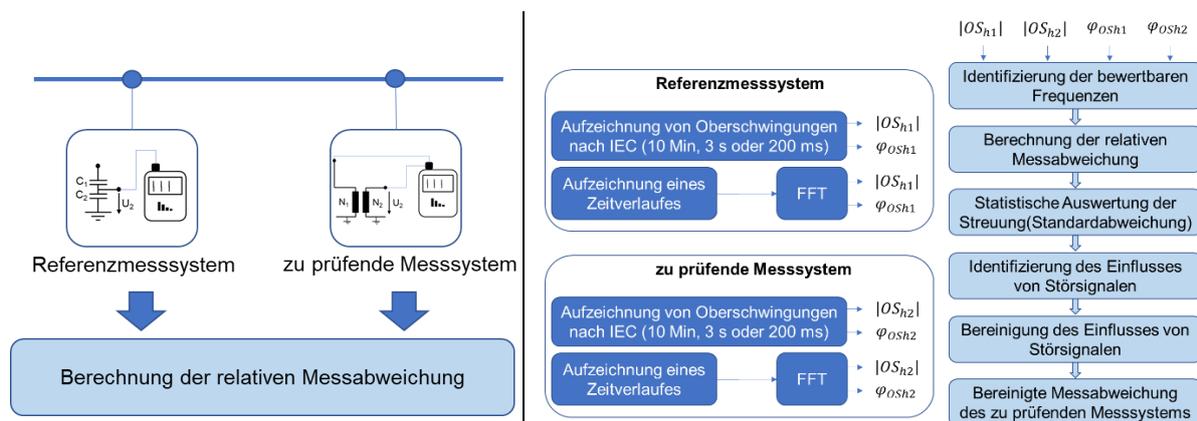


Abbildung 3. Beschreibung des nichtinvasiven Verfahren zur Verifikation des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens eines zu prüfenden Spannungswandlers

Die Signalerfassung geschieht über geeignete Messgeräte, beispielsweise PowerQuality-Messgeräte, an beiden Messsystemen (Referenzmesssystem und zu prüfendes Messsystem). Für die Auswertung werden die Gehalte und die Phasenwinkel der Oberschwingungen aufgezeichnet, die über zwei verschiedene Verfahren berechnet werden können. Zum einen eignet sich die Berechnung nach IEC 61000-4-7 als 10 min-, 3 s- oder 200 ms-Mittelwerte für das Übertragungsverhalten im stationären Zustand. Alternativ können beliebige Zeitverläufe aufgezeichnet und eine FFT durchgeführt werden, wobei hierbei auch speziell transiente Vorgänge mit einer stärkeren Anregung von hochfrequenten Spannungsanteilen untersucht werden können. Die Bestimmung des Amplituden- und Phasenwinkelfehlers basiert auf der Differenz zwischen den am zu prüfenden Messsystem und am Referenzmesssystem aufgezeichneten Oberschwingungsgehalten und Phasenwinkeln der Oberschwingungen, da das Referenzmesssystem als ideale Referenz die am Prüfling anliegende Spannung wiedergibt. Die nichtinvasive Verifikation des Übertragungsverhaltens kann sowohl bis zu einer Frequenz von 2,5 kHz (50. Harmonische) als auch bis zu 9 kHz durchgeführt werden.



Unsere Service-Pakete

Service-Paket Invasiv PWT1	Service-Paket Invasiv PWT2	Service-Paket Nichtinvasiv PWT3
<ul style="list-style-type: none">✓ Invasiven Verifikation des Übertragungsverhaltens bis 3 kHz	<ul style="list-style-type: none">✓ Invasiven Verifikation des Übertragungsverhaltens bis 1 MHz (Übertragungsfunktions-basierte Bestimmung)	<ul style="list-style-type: none">✓ Aufbau eines Referenzmesssystems (Durchführungsteiler)*✓ Inbetriebnahme jeweils einer hochfrequenten Messung am zu prüfenden Wandler und am Referenzmesssystem✓ Auswertung des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens bis 3 kHz (optional bis 10 kHz)

*Den Umfang des Messsystems finden Sie in unserer Dienstleistung „Breitbandige Spannungsmessung über die Transformatordurchführung“

Anwendungsbeispiele 1: Invasive Verifikation des Übertragungsverhaltens eines RC-Teilers

In dem vorliegenden Beispiel wurde das exakte Übertragungsverhalten eines RC-Teilers in seiner Aufstellposition inkl. der sekundärseitigen Leitungen ermittelt, um eine hochgenaue Spannungsmessung vor Ort sicherzustellen. Hierzu wurde der RC-Teiler primärseitig mit einer Prüfspannung beaufschlagt. Über die gleichzeitige Aufzeichnung der primär- und sekundärseitigen Spannungen am RC-Teiler, ist die Bestimmung des Übertragungsverhaltens möglich. Die Ergebnisse in der Abbildung 5 belegen, dass das Übersetzungsverhältnis bis 3 kHz sehr linear verläuft. Aufgrund der hohen Einkopplungen vor Ort und den niedrigen sekundärseitigen Spannungen am RC-Teiler ist ein leichtes Streuen der Messwerte entstanden.

Insgesamt konnte dem Betreiber nachgewiesen werden, dass es weder durch den Transport des RC-Teilers noch durch dessen Aufstellung vor Ort zu Messungenauigkeiten bei der Spannungsmessung kommt.



Abbildung 4. Beispielhafte Darstellung eines Messeinsatzes zur invasiven Verifikation eines RC-Teilers in einer 400 kV-Schaltanlage

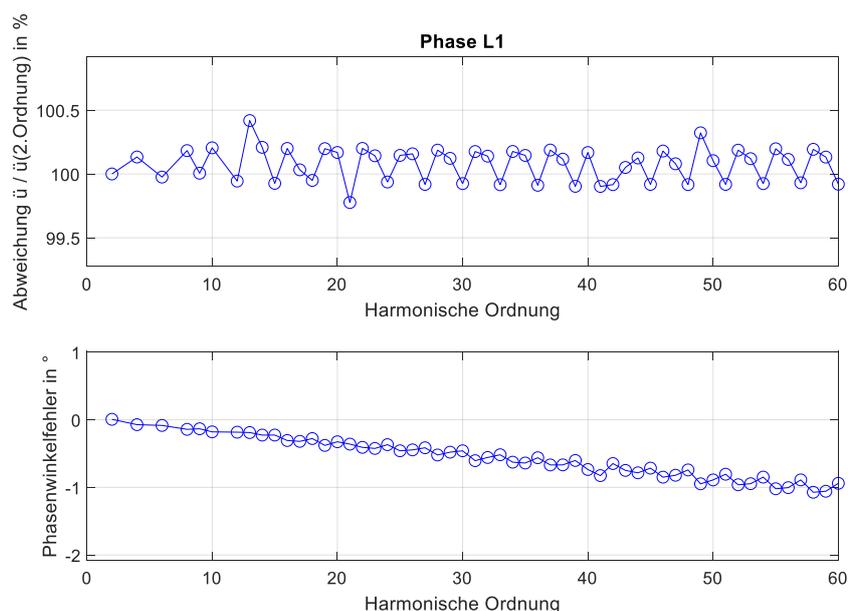


Abbildung 5. Vor Ort bestimmte Frequenzabhängigkeit des Übertragungsverhaltens (\bar{u}) und des Phasenwinkelfehlers

Anwendungsbeispiele 2: Übertragungsfunktionsbasierte Bestimmung des Übertragungsverhalten eines 23 kV Spannungswandlers

Dieses Beispiel illustriert die Anwendung der übertragungsfunktionsbasierte Bestimmung des Übertragungsverhalten eines 23 kV Spannungswandlers.

Abbildung 6 beinhaltet das aus der Messung zurückgerechnete Übersetzungsverhältnis für den Frequenzbereich von 20 Hz bis 150 kHz. Die Darstellung zeigt, dass bis ca. 2 kHz die Amplitude des Übertragungsverhaltens des Wandlers ein lineares Verhalten aufweist. Bei 2 kHz weicht die Amplitude um 3,1 % von der Amplitude bei der Nennfrequenz (50 Hz) ab. Über 2 kHz treten Resonanzen auf, die für eine sehr ungenaue und wenig aussagekräftige Beurteilung der Netzqualität führen würden.

Aus der Messung konnte beurteilt werden, inwiefern der verbaute Spannungswandler zur Netzqualitätsmessungen und zur Messung von transienten Vorgängen im Netz geeignet ist, was für den Betreiber des Netzes von großer Bedeutung war.

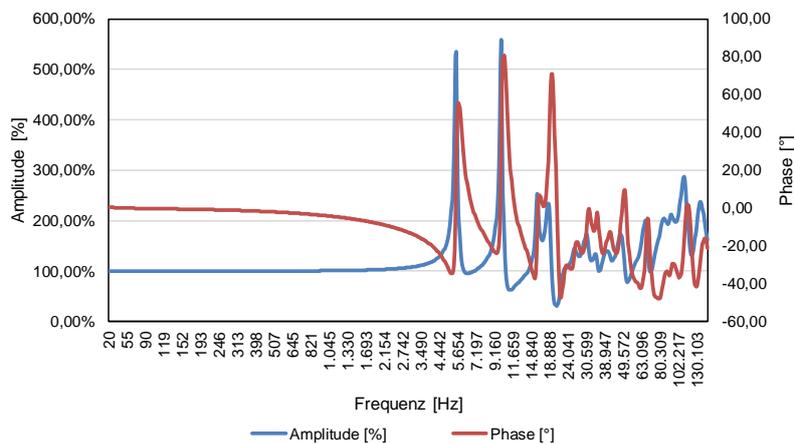


Abbildung 6. Übertragungsverhalten eines 23 kV Spannungswandlers

Anwendungsbeispiele 3: Nichtinvasive Verifikation eines induktiven Spannungswandlers

Zur Beurteilung bis zu welcher Frequenz eine PowerQuality-Messung über einen konventionellen Hochspannungswandler belastbar ist und inwiefern die Empfehlungen in den einschlägigen Normen für alle Spannungswandler allgemeingültig sind, wurde eine nichtinvasive Verifikation durchgeführt. Als Referenzmesssystem wurde von uns ein hochpräziser Durchführungsteiler an einem 400 kV-Transformator installiert. Die Abbildung 7 zeigt das nichtinvasiv bestimmte prozentuale Übersetzungsverhältnis über der Frequenz. Bereits bei etwa 750 Hz und bei etwa 1400 Hz sind zwei Resonanzen des induktiven Spannungswandlers zu sehen, die zu einer unzulässigen Messabweichung führen.

Anhand dieser nichtinvasiven Verifikation hat der Messstellenbetreiber tiefgehende Einblicke in das Übertragungsverhalten seiner induktiven Spannungswandler erhalten und kann nun die Belastbarkeit seiner Messungen bei höheren Frequenzen einschätzen. Im Vergleich zu anderen Prüfungen, die invasiv mit reduzierter Spannung durchgeführt werden, kann sich der

Betreiber sicher sein, dass die nichtinvasiven Prüfbedingungen den realen Betriebsbedingungen mit Nennspannung entsprechen und die Ergebnisse somit auch bei spannungsabhängigen Betriebsmitteln Gültigkeit besitzen.

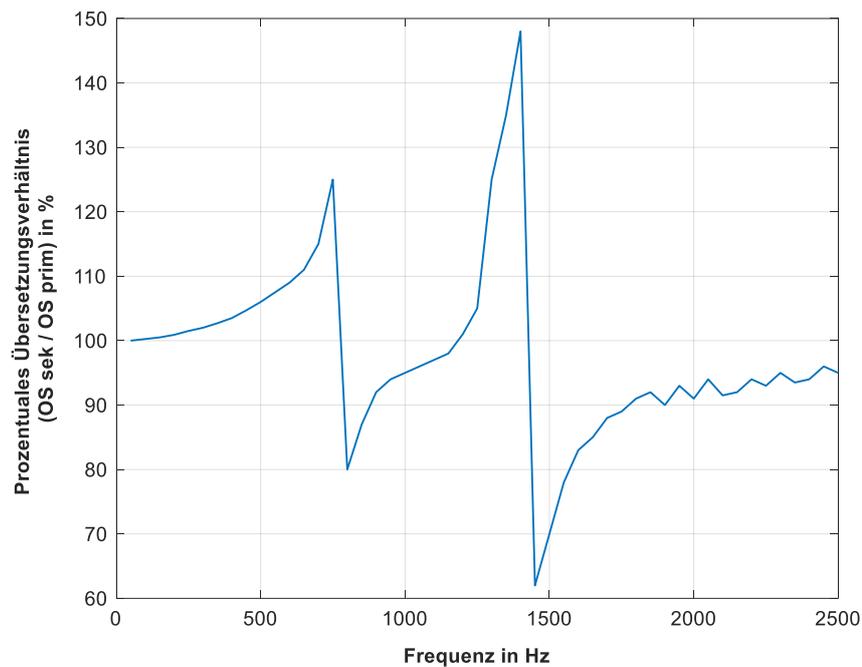


Abbildung 7. Prozentuales Übersetzungsverhältnis bei Frequenzen bis zur 50. Harmonischen eines induktiven 400 kV-Spannungswandlers



Ihre Vorteile

- ✓ Flexible Messkonzepte zur optimalen kundenspezifischen Umsetzung der Vor-Ort-Verifikation
- ✓ Komplette nichtinvasive Verifikation aus einer Hand
- ✓ Umfängliche Prüfung Ihrer Betriebsmitteln

Gerne beraten wir Sie bei der Prüfung Ihrer Wandler oder Teiler. Nehmen Sie einfach Kontakt mit uns auf!

Ansprechpartner

Alexander Lübke

Tel. +49 2383 6189 698

Mobil +49 175 7616 547

a.luebke@hgmes.de

Hubert Göbel GmbH

Siemensstraße 42

D-59199 Bönen

www.hgmes.de

[LinkedIn / Xing](#)

