

Breitbandige Spannungsmessung über die Transformatordurchführung

Was ist unter einer breitbandigen Spannungsmessung zu verstehen und warum ist diese wichtig?

Mit einer breitbandigen Spannungsmessung ist eine Messung gemeint, bei der das Übertragungsverhalten (frequenzabhängiges komplexes Übersetzungsverhältnis) des verwendeten Sensors (z.B. Spannungswandler) linear und resonanzfrei ist.

Die Anforderungen an die Bandbreite einer Spannungsmessung hängen von den Phänomenen, die aus der Messung bewertet werden sollen, ab. In der Praxis ist eine gängige Anwendung eine Messung der Netzqualität (Spannungsqualität) nach den IEC Normen 61000-4-30 und 61000-4-7, die bestimmte Anforderungen an die Bandbreite der Spannungsmessung stellt. 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. Darüber hinaus rücken durch den vermehrten Einsatz von Umrichter-Technologien mit Pulsweitenmodulation (PWM) die sogenannten Supraharmonischen im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz vermehrt in den Fokus, für die es bereits ab der Mittelspannung 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 Erfassung von höheren Frequenzen (über 1 kHz) stellt besonders für Mittel-, Hoch- und Höchstspannungswandler eine Herausforderung dar. Die Abbildung 1 zeigt einen groben Überblick über den nutzbaren Frequenzbereich derzeit verfügbaren Technologien von Spannungswandlern. Die Technologien der Spannungswandler kann in die Gruppen der elektronischen, der kapazitiven und der induktiven Spannungswandler unterteilt werden. Wie in der Abbildung 1 dargestellt, ist die Bandbreite der induktiven Spannungswandler von deren Spannungsebene abhängig. So kann beispielweise in der Hochspannung (HS) die Bandbreite eines induktiven Spannungswandlers im Bereich von 15 Hz bis 400 Hz liegen, während in der Mittelspannung die Bandbreite Werte bis zu 4 kHz erreichen kann. Vergleichsweise kritischer ist die Situation bei kapazitiven Spannungswandler, welche hauptsächlich für Messungen bei Nennfrequenz (50 Hz) geeignet sind.

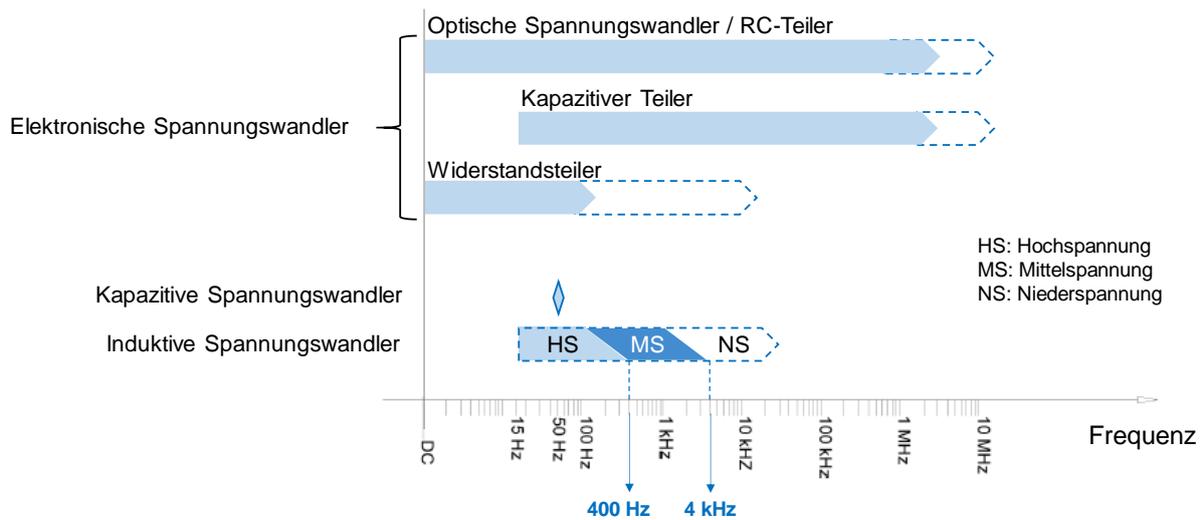


Abbildung 1. Frequenzbereich der Technologien von Spannungswandlern nach dem heutigen Kenntnisstand (IEC TR 61869-103:2012)

Um die Bandbreitenproblematik von induktiven Spannungswandlern zu veranschaulichen, wird in der Abbildung 2 das frequenzabhängige Übersetzungsverhältnis eines induktiven 400 kV-Spannungswandlers dargestellt. Der Abbildung kann entnommen werden, dass der Spannungswandler bei einer Frequenz von etwa 750 Hz eine Resonanz aufweist, die bereits im darunterliegenden Frequenzbereich zu einer Zunahme des Übersetzungsverhältnisses von bis zu 20 % führt.

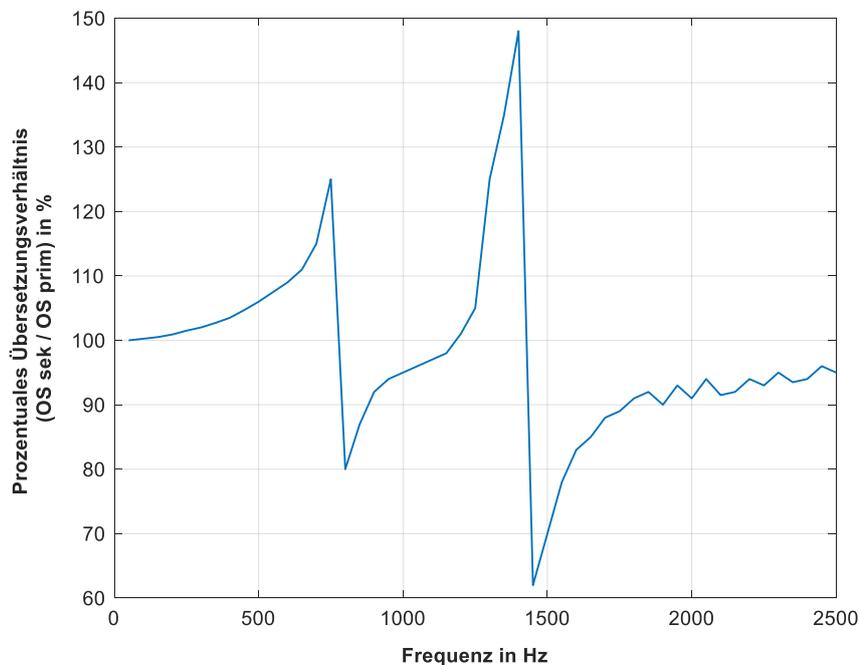


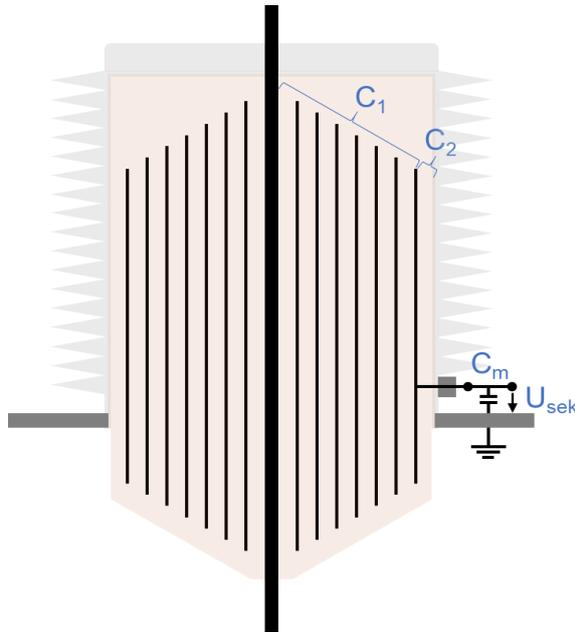
Abbildung 2. Prozentuales Übersetzungsverhältnis bei Frequenzen bis zur 50. Harmonischen eines induktiven 400 kV-Spannungswandlers

Aufgrund der Tatsache, dass die nutzbaren Frequenzbereiche von den üblichen induktiven und kapazitiven Spannungswandlern sehr eingeschränkt ist, müssen für eine zuverlässige und belastbare Messung der Netzqualität ebenso wie eine Messung von transienten Vorgängen (vor allem in der Höchst- und Hochspannung) alternative Spannungswandler verwendet werden. Eine Möglichkeit ist die Nachrüstung der (Umspann-) Anlagen mit elektronischen Wandlern, wie z.B. durch RC-Teiler. Da diese Option aus verschiedenen Gründen (Zeit, Kosten, Platz, etc.) nicht immer realisierbar ist, besteht sehr häufig der Bedarf nach einer kurzfristigen und kostengünstigen Alternative. Diese Problematik wurde von der Hubert Göbel GmbH erkannt und als Lösung dazu wurde ein Dienstleistungskonzept entwickelt, welches in diesem Dokument beschrieben wird.

Spannungsmessung über Transformatordurchführungen als Alternative zu RC-Teilern

(Transformator-) Durchführungen im Hoch- und Höchstspannungsbereich werden in der Regel als sogenannte „gesteuerte“ Durchführungen ausgeführt, bei denen das elektrische Feld durch Steuerbeläge gleichmäßig nach außen hin abgebaut wird. Die Steuerbeläge in der Durchführung sind konzentrisch angeordnet und elektrisch leitend, wodurch jeweils zwischen zwei Steuerbelägen eine Kapazität entsteht. Die Serienschaltung der Kapazitäten vom Leiter bis zum äußersten Steuerbelag bildet die Kapazität C_1 der Durchführung. Für Diagnosezwecke ist der Kontakt des äußersten Steuerbelags zum Messanschluss der Durchführung herausgeführt.

Bei einem Durchführungsteiler wird die Kapazität C_1 der gesteuerten Durchführung genutzt, um einen kapazitiven Teiler aufzubauen. Wie in der Abbildung 3 zu sehen ist wird dazu die Kapazität C_1 , die am Durchführungsflansch über den Messanschluss abgegriffen werden kann, mit einer Messkapazität C_m seriell verschaltet. Die Umsetzung in der Praxis ist in der Abbildung 4 dargestellt, bei der ein Sensor mit einer Messkapazität an den Messanschluss der Durchführung geschraubt wird. Nach der dargestellten Formel stellt sich das Übersetzungsverhältnis des kapazitiven Teilers in Abhängigkeit der Kapazitäten C_1 und C_m ein. Bei der Auslegung des Teilers wird die Kapazität C_m so gewählt, dass im Betrieb die sekundärseitig anliegende Spannung gegen Erde im Bereich zwischen 40 V und 60 V liegt und somit gut mit einem PowerQuality-Messgerät zu erfassen ist.



Übersetzung des Durchführungsteilers:

$$\frac{U_{\text{prim}}}{U_{\text{sek}}}(f) = \frac{C_1(f) + C_m(f)}{C_1(f)}$$

Abbildung 3. Schematischer Aufbau des Durchführungsteilers und Zusammenhang zwischen dem theoretischen Übersetzungsverhältnis und den Kapazitäten



Abbildung 4. Anschluss des Sensors am Messanschluss einer Durchführung

Durch zahlreiche Messungen der Frequenzabhängigkeit der Kapazität C_1 von gesteuerten Durchführungen haben wir nachgewiesen, dass die Kapazität C_1 bis zu einer Frequenz von ca. 1 MHz linear ist. Das bedeutet, dass eine Durchführung aufgrund der vernachlässigbaren Frequenzabhängigkeit für die Anwendung als Spannungsteiler geeignet ist. Neben der Linearität der Durchführung sollte für eine breitbandige Spannungsmessung ebenfalls die Kapazität des externen Sensors (C_m) linear sein. Dies kann durch eine präzise Auslegung des Sensors (hochwertige und niederinduktive Kondensatoren) sichergestellt werden.

Aufgrund der Tatsache, dass die Kapazität der Durchführung je nach Typ und Hersteller, aber auch unter baugleichen Durchführungen leicht variiert, besitzt jeder Durchführungsteiler sein



spezifisches Übertragungsverhalten. Daher werden die Komponenten jedes Durchführungsteilers vor Ort von uns vermessen, um unseren Kunden die exakte Genauigkeit des Teilers nachzuweisen. Nichts desto trotz eignen sich alle gängigen Durchführungen im 110 kV-, 220 kV- und 400 kV-Netz für eine breitbandige Spannungsmessung.

Es ist darauf zu achten, dass die Genauigkeit und die Bandbreite eines Durchführungsteilers sehr stark von der Auslegung des verwendeten Sensors bestimmt wird. Es gibt eine Reihe von Sensoren auf dem Markt, welche hauptsächlich für das On-line Monitoring von Durchführungen entworfen wurden. Die meisten dieser Sensoren eignen sich auch für eine Spannungsmessung im Durchführungsteiler, jedoch sind sie in der Regel nicht für eine breitbandige Spannungsmessung ausgelegt. Durch interne Filter, Spulen oder Induktivitäten können Resonanzen auftreten, die die Bandbreite des Durchführungsteilers stark einschränken.

Als Bestandteil des Messkonzeptes der Hubert Göbel GmbH werden geeignete Sensoren verwendet, welche gezielt für die breitbandige Spannungsmessung entwickelt wurden. Unter der Verwendung dieser Sensoren können die typischen Werte in der Tabelle 1 erzielt werden.

Tabelle 1. Typische Werte eines Durchführungsteilers

Spannungsebene	Kapazität C_1	Kapazität C_m	Bandbreite	Genauigkeit bis 2,5 kHz	
				Betrag	Phasenwinkel
400 kV	480 pF	3,3 μ F	10 Hz bis ca. 250 kHz	$\leq 1,1 \%$	$\leq 0,4^\circ$
110 kV	200 pF	3,0 nF	10 Hz bis ca. 500 kHz	$\leq 1,1 \%$	$\leq 0,4^\circ$

Unser Dienstleistungskonzept

Die Hubert Göbel GmbH verfügt über langjährige Erfahrungen in der Diagnose von Durchführungen. Dieses Know-How wurde genutzt, um ein sicheres, genaues und breitbandiges Spannungsmesskonzept zu entwickeln.

Das Prinzip unseres Dienstleistungskonzeptes ist in der Abbildung 5 dargestellt. Die Dienstleistung besteht aus den beiden Hauptaufgaben, der Auslegung und der Inbetriebnahme des Durchführungsteilers.

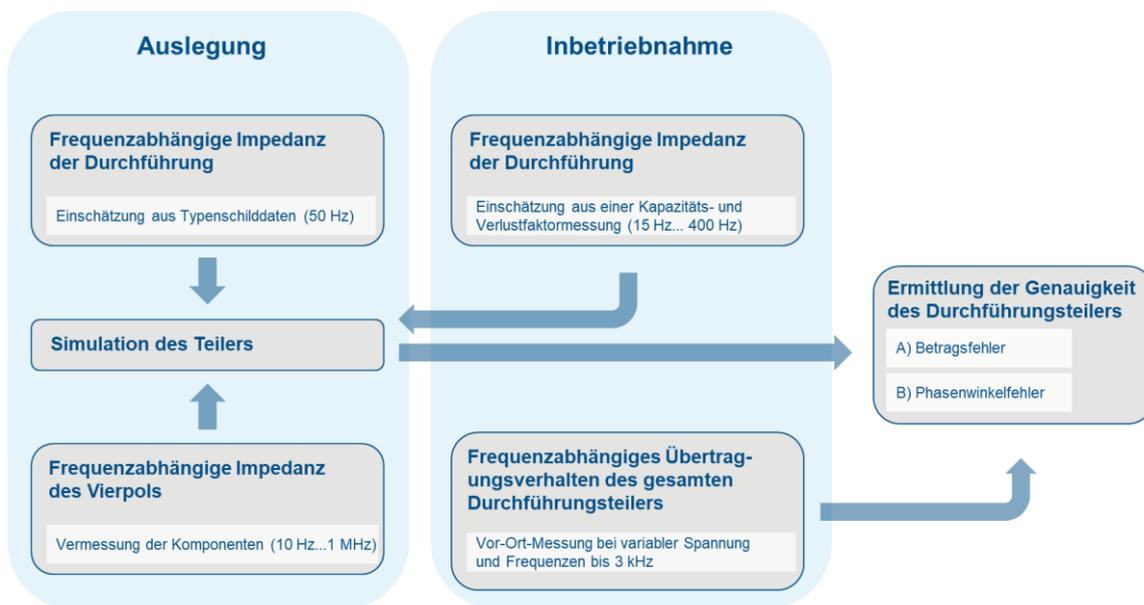


Abbildung 5. Vorgehen bei der Ermittlung der Genauigkeit des Durchführungsteilers

Für den Aufbau unseres Durchführungsteilers ist ein Transformator mit gesteuerten Durchführungen vor Ort zwingend erforderlich! Daher wird vorab die bestehende Infrastruktur des Kunden auf ihre Eignung für den Teiler geprüft. Da sich die Durchführungen von Kunde zu Kunde unterscheiden, erhält jeder Kunde von uns einen individuell abgestimmten Durchführungsteiler, dessen Genauigkeit nach unserem in der Abbildung 5 beschriebenen Vorgehen nachgewiesen wird. Mit den vorhandenen Daten der Durchführungen (i.d.R. vom Typenschild) wird der Teiler in einem ersten Schritt ausgelegt und am Computer simuliert, wodurch das Übertragungsverhalten und die Bandbreite bestimmt werden können. Bei der Inbetriebnahme des Durchführungsteilers werden dann sowohl die Kapazitäten der Durchführungen über eine Kapazitäts- und Verlustfaktormessung und als auch das Übertragungsverhalten des kompletten Teilers samt Messleitungen vermessen. Dadurch können wir nachweisen, dass jeder individuelle Durchführungsteiler eine von uns geprüfte Genauigkeit aufweist.

Für die Verwendung im Durchführungsteiler verwenden wir speziell für diese Anwendung entwickelte Sensoren. Diese besitzen ein lineares Übertragungsverhalten, sodass der Durchführungsteiler auch noch bis in den höheren Kilohertz-Bereich eine präzise Spannungsmessung gewährleistet. Darüber hinaus sind die Sensoren mit einem zweistufigen Überspannungsschutz ausgestattet, wodurch zum einen ein sicherer Betrieb und zum anderen auch eine genaue Erfassung von Überspannungen erreicht wird.

In einem finalen Schritt wird das Messsystem durch das Anschließen eines Aufzeichnungsmessgeräts (z.B. PQ-Messgerät) komplettiert. Wie in der Abbildung 6 dargestellt ist, wird hierzu der Ausgang der Sensoren über gut abgeschirmte Leistung (z.B. Triaxial- oder Koaxialkabel) an das Messgerät angeschlossen. Um die Leitungen so kurz wie möglich zu halten, wird das Messgerät in der Nähe des Transformators aufgestellt. Bei einer Kurzzeitmessung bietet sich die Unterbringung des Messgeräts im Transformatorschaltschrank an. Zusätzlich dazu bieten wir für Langzeitmessungen auch die Installation in einem unserer Schaltschränke an, in denen die Messgeräte sicher und witterungsbeständig betrieben werden können.

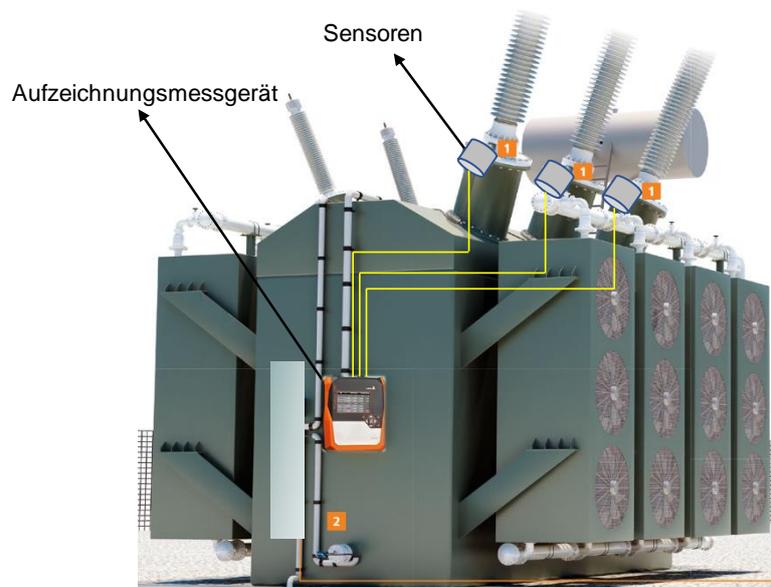


Abbildung 6. Typischer Messaufbau einer Spannungsmessung über einen Durchführungsteiler

In manchen Fällen kommt es vor, dass ein Abklemmen der Leiterseile an den Transformator-durchführungen nicht möglich ist. In diesem Fall kann keine Kapazitäts- und Verlustfaktor-messung der Durchführungen und auch keine Vor-Ort-Messung des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens des gesamten Teilers durchgeführt werden. Um unseren Kunden dennoch einen Nachweis für die Linearität des Durchführungsteilers zu liefern, können wir die Durchführungen (über die Typenschildangaben und mithilfe unserer umfangreichen Durchführungsdatenbank) und den gesamten Durchführungsteiler (Durchführungen und Sensoren) frequenzabhängig simulieren. Aus der Computersimulation lassen sich sowohl die absoluten Übersetzungsverhältnisse als auch der Amplituden- und Phasenwinkelfehler für alle Frequenzen bestimmen. Als zusätzliche Kontrolle werden nach dem Zuschalten des Transformators die gemessenen Spannungen am Durchführungsteiler mit den Spannungen an den konventionellen Spannungswandlern im Feld verglichen.



Unser Service-Paket

Die Hubert Göbel GmbH bietet die Installation und Inbetriebnahme des Durchführungsteilers in dem folgenden Paket an:

Service-Paket DFT1	
✓	Bereitstellung geeigneter Sensoren zur Spannungsmessung*
✓	Konzeptionierung und Inbetriebnahme des Durchführungsteilers
✓	Vermessung der Durchführungen und Bestimmung der Gesamtgenauigkeit des Durchführungsteilers
✓	Abbau des Messsystems
✓	Unterbringung des PQ-Messgeräts in einem wetterfesten Schaltschrank (optional)
✓	Wetterbeständige Installation des gesamten Messsystems (optional)
✓	Bereitstellung eines geeigneten (PQ-)Messgeräts; wahlweise auch eines wetterfesten PQ-Messgeräts mit IP65 Schutzklasse (optional)

*Sollten Sie bereits geeignete Sensoren an den Durchführungen besitzen, können wir diese auch gerne nach einer eingehenden Prüfung und Vermessung verwenden.

Zusätzlich zu der kurzzeitigen Installation des Durchführungsteilers, bei dem keine besonderen Anforderungen an die Wetterbeständigkeit der Installation gestellt werden, bieten wir auch eine wetterbeständige Ausführung des Durchführungsteilers an. Hierbei werden die Leitungen mit stahlbewehrten Schläuchen geschützt und ein wetterfester Schaltschrank (mit FI/LS-Schalter und Schaltschrankheizung) installiert.

Da zusätzlich zur Spannungsmessung auch der Bedarf einer breitbandigen Strommessung besteht, bspw. zur Bestimmung der Netzurückwirkungen im Höchstspannungsnetz nach der VDE-AR-N 4130 oder zur Bestimmung der frequenzabhängigen Netzimpedanz, bieten wir ebenfalls auch eine breitbandige Strommessung am Transformator an. Falls Sie daran interessiert sind, schauen Sie sich gerne unsere Dienstleistung „Breitbandige Strommessung an Durchführungen“ an!

Zusatzleistungen, die je nach Kundenwunsch bestellt werden können:

Kennung	Beschreibung
DFT2	Unterbringung des PQ-Messgeräts in einem wetterfesten Schaltschrank
DFT3	Wetterbeständige Installation des gesamten Messsystems (inkl. Verlegung der Messleitungen in Schutzschläuche); diese Leistung wird vor allem bei langfristigen Installationen empfohlen.
DFT4	Bereitstellung eines geeigneten PQ-Messgeräts; wahlweise auch eines wetterfesten PQ-Messgeräts mit IP65 Schutzklasse
DFT5	Bereitstellung eines Aufzeichnungsmessgeräts zur Spannungs- und Strommessung mit einer Abtastrate von bis zu 1 MHz; diese Leistung wird empfohlen, wenn Oberschwingungen über 9 kHz oder transiente Vorgänge bewertet werden sollen.



Zusätzlich könnten unsere folgenden Produkte für Sie relevant sein:

Kennung	Beschreibung
-	Breitbandige Strommessung an Durchführungen
NQM	Messung und Beurteilung der Netzqualität
AVS	Aufzeichnung von stationären und transienten Signalen
PWT	Invasive und nichtinvasive Verifikation des Übertragungsverhaltens von Spannungswandlern und Spannungsteilern

Anwendungsbeispiel 1: Verwendung des Durchführungsteilers als Referenzmesssystem zur nicht-invasiven Verifikation von Spannungswandlern

Dieses Beispiel zeigt die Verwendung eines Durchführungsteilers zur Messung von Oberschwingungen in einer 400 kV-Umspannanlage. Die breitbandige Messung über den Durchführungsteiler wurde vom Netzbetreiber beauftragt, um die Messgenauigkeit der in der Anlage verbauten induktiven Wandlers nicht-invasiv zu beurteilen. Aufgrund der hohen Linearität des Durchführungsteilers ist dieser prädestiniert für die Verwendung als Referenzmesssystem.



Abbildung 7. Vorübergehende Installation eines Durchführungsteilers an den 220 kV-Durchführungen eines Transformators mit der Unterbringung des Messsystems in einem aufgestellten Schaltschrank

Die Messung über den Durchführungsteiler diente als ideales Abbild der Netzspannung inklusive der im Netz vorhandenen Oberschwingungen. Wie in der Abbildung 8 zu sehen ist, tritt bei der Messung der Oberschwingungen höherer Ordnung über einen induktiven Spannungswandler eine Messabweichung auf, da dieser nicht für eine breitbandige Spannungsmessung konzipiert ist.

Mithilfe der nicht-invasiven Verifikation konnten wir dem Anlagenbetreiber zeigen, dass seine induktiven 220 kV-Spannungswandler bereits bei etwa 850 Hz eine erste Resonanz aufweisen, die zu einem erhöhten Messfehler führt. Aus diesem Grund führt die Messung der Netzqualität über solche induktiven Spannungswandler nur im niedrigen Frequenzbereich zu brauchbaren Ergebnissen.

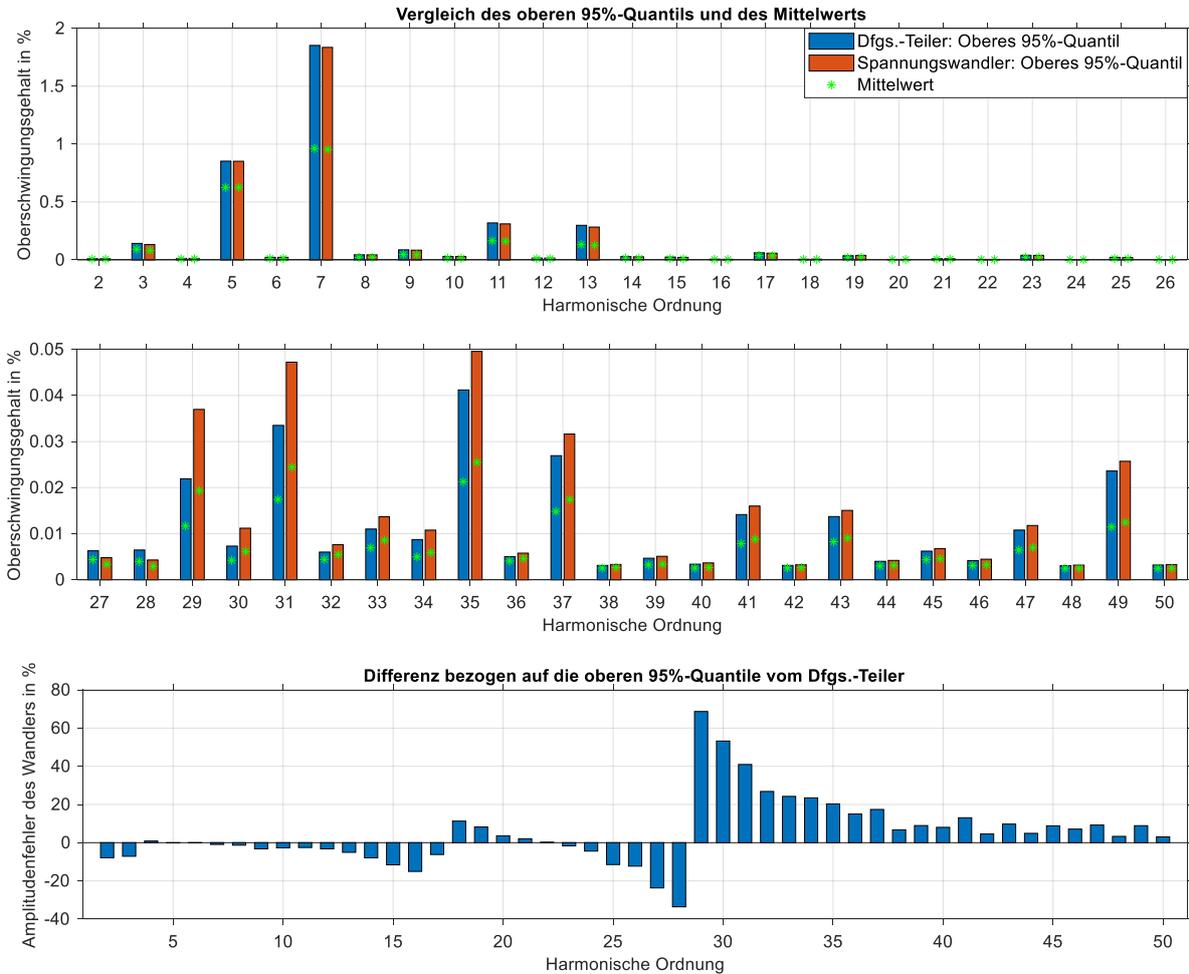


Abbildung 8. Vergleich der gemessenen Oberschwingungsgehalte (Durchführungsteiler und induktiver Spannungswandler) und daraus nicht-invasiv bestimmter Amplitudenfehler des induktiven Spannungswandlers

Anwendungsbeispiel 2: Messung von hochfrequenten Vorgängen über einen 420 kV-Durchführungsteiler

Hauptsächlich erfolgt die Erfassung der Netzspannung in Umspannanlagen über induktive oder kapazitive Spannungswandler. Wie vorher erläutert, sind diese Art von Wandlern nur bedingt für die Beurteilung von Signalen abseits der Nennfrequenz geeignet. Aus diesem Grund wurde zur Beurteilung von transienten Spannungen in einer Anlage ein Durchführungsteiler aufgebaut und in Betrieb genommen. Der Vergleich der Messungen über die vor Ort verbauten kapazitiven Spannungswandler mit dem Durchführungsteiler in der Abbildung 9 verdeutlicht, dass der kapazitive Spannungswandler kaum höherfrequente Signale neben der Netzfrequenz überträgt. Dadurch entsteht für einen Netzbetreiber eine sehr hohe Unschärfe bei der Bewertung des Zustands seines Netzes, sodass er sich womöglich in Sicherheit wähnt und mögliche Probleme nicht erkennen kann.

Die Abbildung 9 zeigt eindrücklich, dass mit dem Durchführungsteiler hochfrequente Spannungsanteile sicher erkannt werden und der Netzbetreiber dadurch eine zuverlässige Beurteilung von transienten Überspannungen durchführen kann.

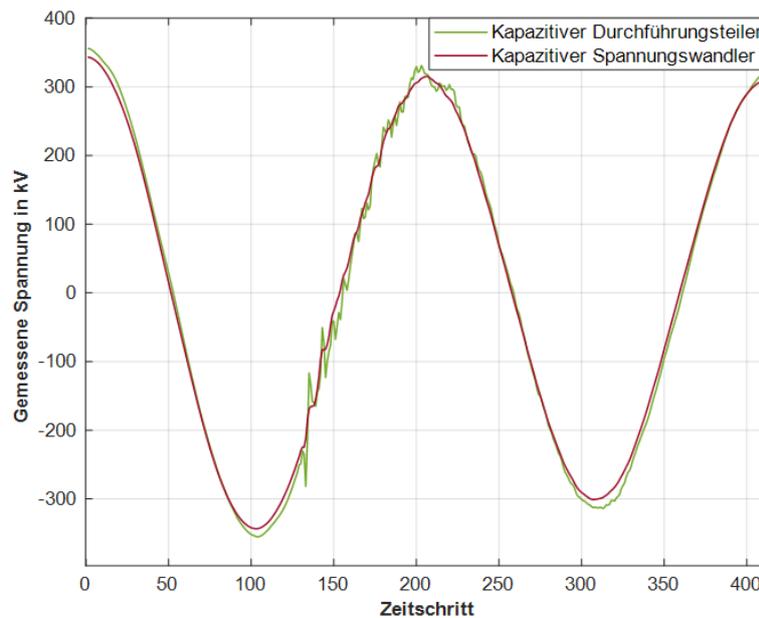


Abbildung 9. Aufzeichnung eines hochfrequenten Vorgangs über einen kapazitiven Durchführungsteiler und einen kapazitiven Spannungswandler



Ihre Vorteile

- ✓ Erhalten Sie einen klaren Durchblick über die Vorgänge in Ihrem Netz!
- ✓ Sicheres und präzises Messsystem, welches innerhalb von wenigen Stunden betriebsbereit installiert ist
- ✓ Zuverlässige und belastbare Messung sowohl von der Netzqualität als auch von transienten Spannungen in der Hoch- und Höchstspannung
- ✓ Ganzheitliches, ausgereiftes Spannungsmesssystem inkl. wetterfester Unterbringung von Messequipment im freistehenden Schaltschrank
- ✓ Das Messsystem ist für eine breitbandige Erfassung der Ströme am Transformator erweiterbar
- ✓ Beratung zu Ihren bestehenden Messsystemen und bei der Auswahl von geeigneten Sensoren

Gerne beraten wir Sie bezüglich eines Messkonzeptes. 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](#)

