

## Power Quality Messungen in allen EVU Spannungsebenen bis 150 kHz – Ist das möglich?

Eine verlässliche Energieversorgung ist für viele Unternehmen mittlerweile zu einem wichtigen Standortfaktor geworden. Während in der Vergangenheit Netzausfälle und Spannungsschwankungen zu den wichtigsten Parametern der Versorgungsqualität zählten, gewinnen Spannungstransienten oder Spannungsoberschwingungen immer mehr an Bedeutung. Dies ist vor allem auf die immer größer werdende Anzahl an nicht-linearen Verbrauchern und vielen dezentral angebotenen regenerativen Energieträger zurückzuführen. Um in Europa einheitliche Standards für die Elektroenergieversorgung zu gewährleisten, werden die Mindestanforderungen an die Spannungsqualität in einer europäischen Norm definiert. Dies ist die EN 50160, welche die Überschrift „Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen“ trägt. Diese Norm ist als Produktnorm für elektrische Energie zu verstehen und wird aus diesem Grund auch in Stromlieferverträgen als geltende Produktnorm herangezogen. Im Februar 2014 hat der Bundesgerichtshof unmissverständlich klargestellt, dass auch die Elektrizität dem Produkthaftungsgesetz unterworfen ist. Damit haftet der Verteilnetzbetreiber für Schäden an elektrischen Verbrauchern, die auf eine mangelhafte Spannungsqualität seitens des Verteilnetzbetreibers zurückzuführen sind.<sup>1</sup> Viele Messgerätehersteller bieten mittlerweile aus diesem Grund Messgeräte, die automatisierte Qualitätsreports gemäß der EN 50160 aufbereiten. Auch digitale Zähler bieten immer öfter auch Power Quality Funktionen gemäß der EN 50160. Während die Messgeräte in der Niederspannung die Spannung direkt verarbeiten können, sind wir in der Mittel- und Hochspannung auf Spannungswandler bzw. Spannungssensoren angewiesen. Meist wird an älteren Anlagen die Spannungsqualität gemessen. Die verbauten Spannungswandler geben auf dem Leistungsschild aber in der Regel keinen Hinweis auf das Übertragungsverhalten bei höheren Frequenzen. Die Geräte sind lediglich für die 50 Hz Grundschwingung der Netze spezifiziert. Messungen gemäß der EN 50160 erfordern aber einen Frequenzbereich bis 2 kHz. Wir wollen der Frage nachgehen, ob die vorhandenen Geräte für Messungen bis 2 kHz geeignet sind. Bei den verbauten Spannungswandlern handelt es sich häufig um induktive Wandler, die nach dem transformatorischen Prinzip arbeiten. Im Detail besteht die Primärspule nicht nur aus induktivwirkenden Kupferwindungen, sondern es ergeben sich auch Kapazitäten durch die einzelnen voneinander isolierten Lagen. Auch die Kapazitäten zwischen den einzelnen Windungen tragen zu der Gesamtkapazität der Primärspule bei. Somit ergibt sich ein Schwingkreis aus Induktivität, Kapazität und ohmscher Widerstand, der auch eine entsprechende Resonanzfrequenz aufweisen muss.

Um diese Resonanzfrequenz zu finden, wird nun ein handelsüblicher 10 kV Spannungswandler im „frequency sweep Verfahren“ mit 6.400 Messpunkten bis 10 kHz vermessen. Der Messaufbau orientiert sich an den Empfehlungen des technischen Reports IEC TR 61869-103.

---

<sup>1</sup> <https://www.juracademy.de/rechtsprechung/article/produkthaftung-fuer-elektrizitaet-des-netzbetreibers-bei-ueberspannungsschaeden>

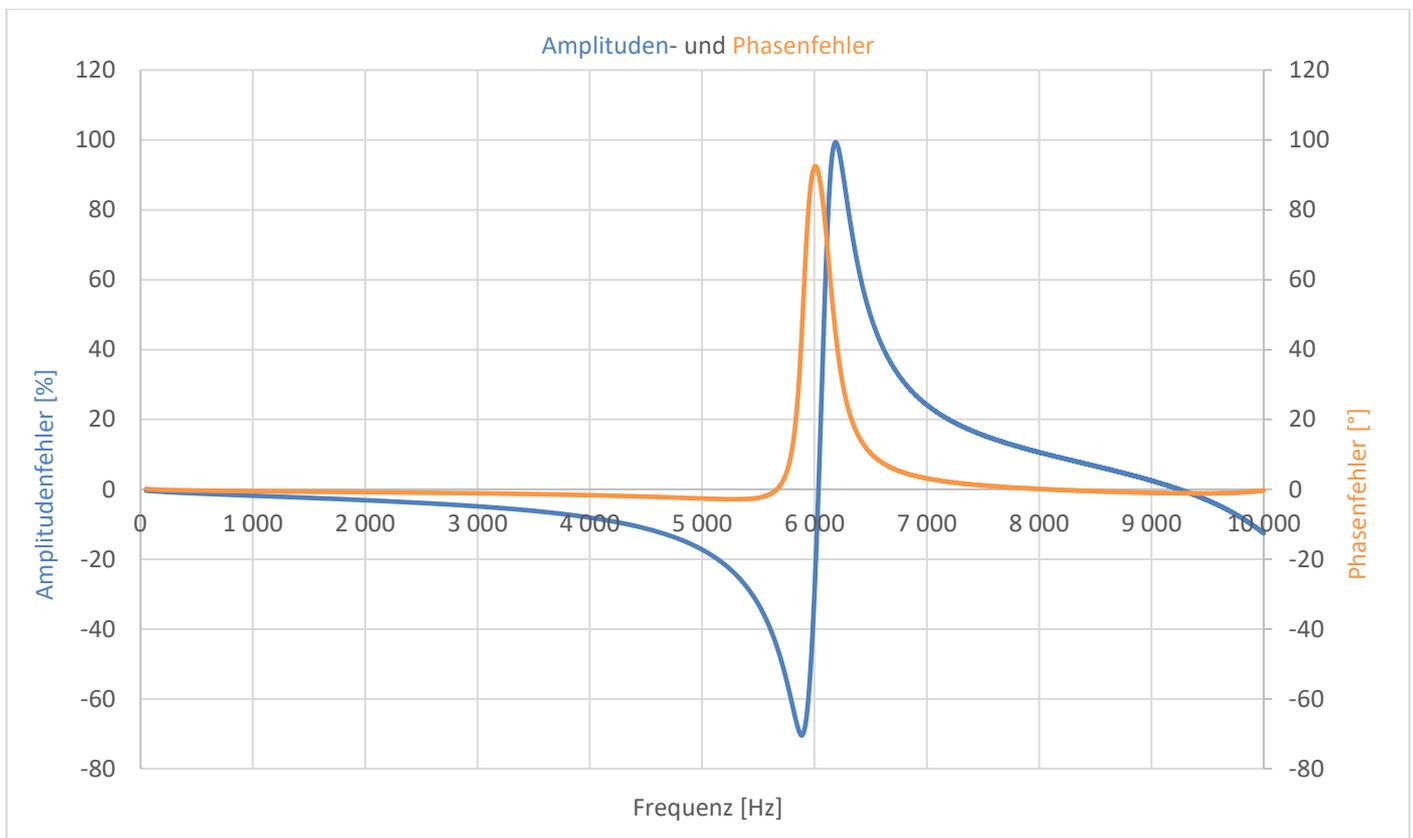


Abbildung 1: Der Amplituden- und Phasenfehler eines 10 kV Spannungswandlers

Bei ca. 6 kHz ist eine Resonanzstelle erkennbar. Während der Wandler bis ca. 5 kHz annehmbar das Primärsignal überträgt, ergibt sich bei ca. 6 kHz ein Amplitudenfehler von ca. 100 % und ein Phasenfehler von 90°. Eine verlässliche PQ-Analyse bis z. B. 2 kHz ist hier uneingeschränkt möglich, aber wie sieht es mit Wandlern in anderen Spannungsebenen aus?

Eine gute Hilfestellung bietet den Messstellenbetreibern ein Beitrag der technisch-wissenschaftlichen Organisation CIGRE / CIREN. Hier wurde eine Richtlinie für Power Quality Messungen veröffentlicht, die bezüglich des Frequenzübertragungsverhaltens von Spannungswandlern eine aussagekräftige Tabelle bereitstellt.

	Spannungsebene	Ordnung der Oberschwingung		
		2. bis 7.	8. bis 20.	21. bis 50.
Mittelspannung	10 kV	Ja	Ja	Ja
	20 kV	Ja	Ja	Unsicher
	30 kV	Ja	Nein	Nein
Hochspannung	60 kV	Ja	Ja (?)	Unsicher
	110 kV	Ja	Unsicher	Nein
Höchstspannung	≥ 220 kV	Unsicher	Nein	Nein

Tabelle 1: CIGRE / CIREN Richtlinien für Power Quality Messungen WG C4.112 TECHNICAL BROCHURE 596

Es ist ersichtlich, dass generell 10 kV Spannungswandler bis zur 50. Oberschwingung (2,5 kHz) für PQ-Messungen verwendbar sind. Im 20 kV Bereich sind gemäß der Tabelle aber bereits Geräte gefunden worden, die ab der 21. Oberschwingung keine verlässlichen Messwerte auf der Sekundärseite bereitstellen. Im 30 kV Bereich ist sogar eine pauschale Freigabe lediglich bis zur 7. Oberschwingung erfolgt. Wir konstatieren, dass für verlässliche EN 50160 Messungen ausschließlich 10 kV Spannungswandler in Bestandsanlagen verwendet werden können. In den Spannungsebenen 20 und 30 kV muss eine Auskunft seitens des Wandlerherstellers erfolgen.

Bei den hier untersuchten Wandlern handelt es sich ausschließlich um einpolige Geräte. Zweipolige Spannungswandler, die in älteren Bestandsanlagen noch zu finden sind, können für die Analyse von Oberschwingungen nicht verwendet werden. Dies ist auf die Spannungsmessung zwischen den Leitern zurückzuführen.

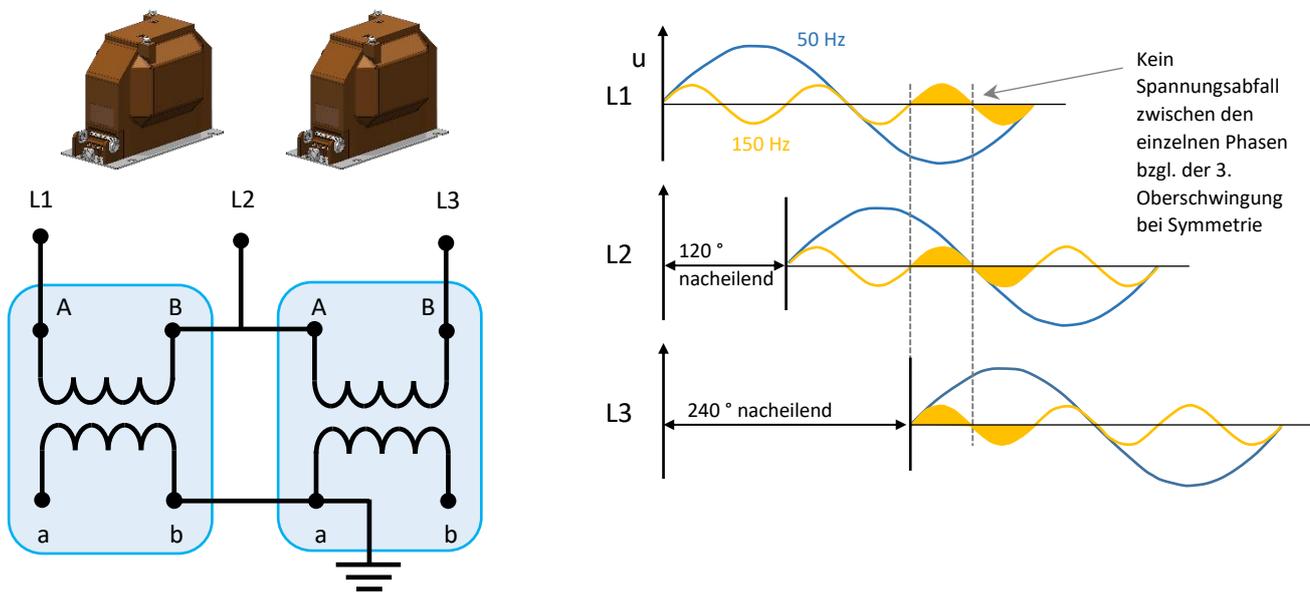


Abbildung 2: V-Schaltung mit zweipoligen Wandlern, 50 Hz Grundschwingung und die 3. Harmonische

Trotz des  $120^\circ$  Phasenversatzes der 50 Hz Leiterspannungen sind die Amplitudenwerte der überlagerten 3. Oberschwingung nicht versetzt und können somit auch keine Spannungsdifferenz zwischen den Leitern generieren. Dies gilt generell für alle durch 3 teilbaren Oberschwingungen. Als Folge ist der THDu um die Werte der durch drei teilbaren Spannungsüberschwingungen (3, 6, 9,...) verringert.

Weiterhin stellt sich die Frage, ob Messungen bis 2 kHz noch ausreichend sind. In der aktuellen DIN EN 61000-2-2 werden bereits Grenzwerte für die Spannung bis 150 kHz genannt.

Die in den Stromlieferverträgen angeführte EN 50160 ist zwar 2020 aktualisiert worden, doch Grenzwerte jenseits der 2 kHz sind noch nicht verbindlich definiert worden. Somit ist eine Spannungsmessung bis 2 kHz für die Qualitätsbestimmung der Elektroenergie ausreichend. Im Bereich von Einspeiseanlagen werden auf Grundlage der Technischen Anschlussregeln (z. B. VDE-AR-N 4110) bereits frequenzoptimierte Spannungswandler bis 9 kHz eingesetzt. Ein größerer Frequenzbereich ist mit induktiven Spannungswandlern aber nicht möglich.

Eine Alternative bieten Spannungssensoren, die in der Mittel- und Hochspannung als RC-Teiler ausgeführt werden. In der Mittelspannung finden bereits RC-Teiler als Abschlusseinsatz für T-Stecker oder als luftisolierter Stützer Verwendung.

### Luftisolierter Spannungssensor (VSI)



### Spannungssensor als Abschlusseinsatz des T-Steckers (VAP)

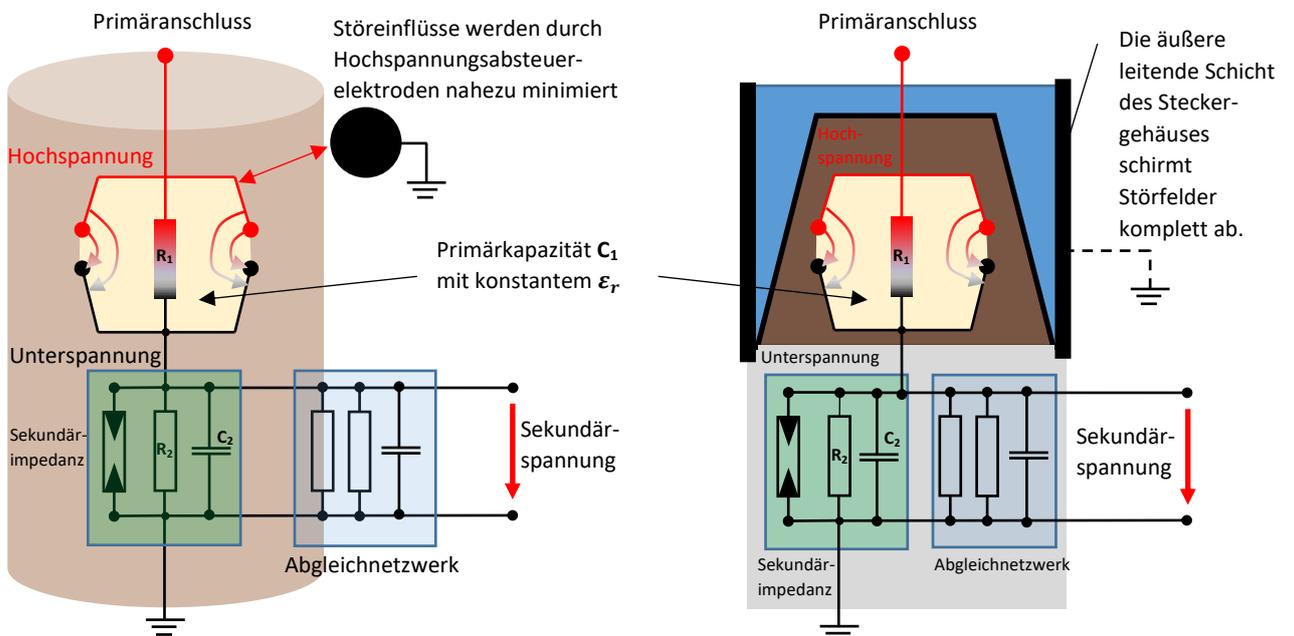


Abbildung 3: Prinzipschaltbilder eines luftisolierten Spannungssensors (VSIxx-S) und eines Spannungssensors als Abschlusseinsatz des T-Steckers (VAPxx-S)

Um ein gutes Frequenzverhalten über den erforderlichen Bereich zu erhalten, muss folgende Bedingung erfüllt sein.

$$R_1 \times C_1 = R_2 \times C_2$$

Messungen haben ergeben, dass herkömmliche „50 Hz RC-Teiler“ oft nicht für breitbandige Messungen geeignet sind. Vielmehr müssen die Geräte für höherfrequente Anwendungen optimiert werden. In der Mittelspannung sind bereits Geräte bis 150 kHz lieferbar. In der Hochspannung sind aktuell RC-Teiler im Markt bis 30 kHz erhältlich.

Werden seitens des EVUs MS-Sensoren für PQ-Messungen verwendet, sollten die kleineren Sekundärsignale unbedingt beachtet werden. Im Gegensatz zu den traditionell induktiven Spannungswandlern mit  $100/\sqrt{3}$  V geben die Spannungssensoren lediglich ein Kleinsignal bis maximal  $10/\sqrt{3}$  V aus. In der Niederspannung werden die Spannungssignale von den spannungsführenden Leitern direkt abgegriffen. Frequenzoptimierte Hochspannungswandler, die als RC-Teiler ausgeführt werden, stellen in der Regel wie die herkömmlichen Spannungswandler  $100/\sqrt{3}$  V bereit. Es ergeben sich somit verschiedenste Sekundärspannungen im Umfeld eines EVUs.

Spannungsumsetzer	Mögliche Bandbreite	Ausgangssignal	Mögliche Eingangsimpedanzen des Messgerätes
NS → Direktmessung	Begrenzung durch das Messgerät (500 kHz)	400/√3 V	200 kΩ - 10 MΩ
MS-Spannungswandler (frequenzoptimiert)	9 kHz (10, 20, 30 kV)	100/√3 V bzw. 110/√3 V	200 Ω - 10 MΩ
MS-Spannungssensor (frequenzoptimiert)	150 kHz (10, 20, 30 kV)	3,25/√3 V (Standard) bzw. maximal 10/√3 V	200 kΩ - 10 MΩ
HS-RC-Teiler (frequenzoptimiert)	ca. 30 kHz	100/√3 V bzw. 110/√3 V	1 MΩ - 10 MΩ

Abbildung 2: Messspannungen auf der Spannungsseite eines EVUs

Um eine ausreichende Auflösung und Genauigkeit garantieren zu können, sollte ein mobiles PQ-Messgerät auf diese unterschiedlichen Messspannungen ausgelegt sein.

Das derzeit einzige mobile Messgerät, das diesen Anforderungen gerecht wird, ist das PQA 8000H-P der Firma NEO MESSTECHNIK. Hier gibt es umschaltbare Spannungseingänge für 600 V<sub>peak</sub> und 10 bzw. 20 V<sub>peak</sub>. Mit dieser Option ist es dem EVU möglich, in den verschiedenen Spannungsebenen hochwertige PQ-Messungen vornehmen zu können.



- FFT Analyse bis zu **500 kHz (Spannung & Strom)** in 2 kHz Bändern (gemäß des internationalen Standards IEC61000-4-30)
- Scope View mit 1 MS/s
- 4x Spannungsmessung / bis zu 8x Strommessung
- Anzeige und Aufnahme des digitalen PLC Datenstreams
- Zwei Spannungsmessbereiche (**umschaltbar**) von 600 V<sub>p</sub> und 10 V<sub>p</sub>
- Alle Spannungseingänge getrennt (CAT III 1000 V / CAT IV 600 V)
- Direkte Versorgung von Stromsensoren aus dem Gerät

Abbildung 4: Mobiles PQ-Messgerät PQA8000H-P mit umschaltbaren Spannungseingängen speziell für EVUs

Die Eingangsimpedanz der Spannungskanäle liegt bei 10 MOhm || 2 pF. Herkömmliche Spannungswandler in der Mittelspannung werden hinsichtlich der Klassengenauigkeit mit einer Bürdenleistung in VA spezifiziert. Üblich sind Werte zwischen 5 und 20 VA. Die auf dem Leistungsschild vermerkte Klasse gilt dabei für 25 bis 100 % dieser Leistung. Der Leistungsbedarf des mobilen PQ-Gerätes ist bei der üblichen Sekundärausgangsspannung von 100/√3 V verschwindend gering.

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{100/\sqrt{3}^2 \text{ V}^2}{10 \text{ MOhm}} = 0,33 \text{ mVA}$$

Das Messgerät kann also zu den angeschlossenen Messgeräten ohne Auswirkungen auf die Genauigkeit parallel betrieben werden.

Anders sieht es bei den Sensoren in der Mittel- und Hochspannung aus. Hier sind die RC-Teiler genau auf den Belastungswiderstand abgeglichen. In der Hochspannung wird daher oftmals ein extra Terminal für das PQ-Messgerät ausgeführt. In der Mittelspannung muss der Sensor genau auf das Messgerät abgestimmt sein. Es lassen sich aber auch hier Messgeräte parallel betreiben. Durch den Einsatz von parallelen Zusatzwiderständen kann das PQ-Messgerät bei Nichtbenutzung simuliert werden.

Bei der Verwendung mehrerer Messgeräte in verschiedenen Messstationen ist eine komfortable Anbindung an das ENA SCADA System möglich.



Abbildung 5: SCADA System ENA SCADA für die Leitwarte ([www.neo-messtechnik.com](http://www.neo-messtechnik.com))

Es kann konstatiert werden, dass durch den Einsatz von ohmsch-kapazitiven Spannungssensoren in der Mittelspannung in Verbindung mit einem umschaltbaren mobilen PQ-Analysator ebenfalls Messungen bis 150 kHz durchgeführt werden können. Mit RC-Teilern in der Hochspannung wird aktuell ein Messbereich bis 30 kHz abgedeckt. Einer Übernahme der Grenzwerte aus der aktuellen IEC 61000-2-2 in die EN 50160 für die Nieder- und Mittelspannung steht aus technischer Sicht nichts entgegen.

**Autoren:**

**Roland Bürger (MBS AG)**

Business Development/Entwicklung, MBS AG, Sulzbach-Laufen

**Bernhard Grasel (NEO MESSTECHNIK)**

Sales Manager, NEO Messtechnik, Zöbern Österreich