Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 112 (2021)
Heft: 12

Artikel: Spannungsqualität in Verteilnetzen
Autor: Schori, Stefan / Höckel, Michael
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-977639

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bild: Radomír Novotný

Spannungsqualität in Verteilnetzen

Forschungsresultate | Die Verteilnetze werden durch die zunehmende dezentrale Einspeisung und Speicherung, aber auch durch die Elektromobilität und Wärmepumpen intensiver genutzt. Dies beeinflusst die Spannungsqualität, die frequenzabhängige Netzimpedanz und die Powerline Communication. Über Messungen und Simulationen wurde die Situation in den Verteilnetzen analysiert.

STEFAN SCHORI, MICHAEL HÖCKEL

Die heutigen Ansätze zur Beurteilung des Anschlusses von Kundenanlagen basieren oft auf der Kurzschlussleistung bei der Grundschwingung. Für Empfehlungen zur Beurteilung von Netzrückwirkungen, wie bei den D-A-CH-CZ-Regeln EMV&PQ [1], ist die Berücksichtigung des Frequenzverhaltens der Netzimpedanz zur Beurteilung der Oberschwingungsemissionen evident. Normen wie die EN 61000-3-2 und EN 61000-3-12 [2,3] verlangen, das Spektrum der Oberschwingungsströme von Geräten im Labor des Herstellers an einer möglichst idealen 50-Hz-Spannungsquelle zu messen. In der Praxis können die Emissionen von Oberschwingungsströmen jedoch je nach Netzanschlusspunkt aufgrund der lokalen Spannungsverzerrungen, die durch die Summe aller am Netz angeschlossenen Geräte verursacht werden, stark abweichen. Da zudem immer mehr nichtlineare Geräte mit Leistungselektronik eingesetzt werden, verändert sich die frequenzabhängige Netzimpedanz (fNI) und es ergeben sich neuartige Einflüsse auf die Spannungsqualität (PQ bzw. Power Quality). Dies kann ungünstige Effekte auf das Verhalten von Stromnetz und von Geräten (Resonanzen, Störung der Kommunikation etc.) haben. Die Auswirkungen und die Entwicklung der Spannungsqualität und der frequenzabhängigen Netz-

impedanz sowie der Einfluss auf die Powerline Communication (PLC) im Verteilnetz werden bei der Planung und beim Betrieb des Stromnetzes oft nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt. Daher wurden im Projekt die Netzrückwirkungen, die frequenzabhängige Netzimpedanz sowie die Kommunikationssignale unter realen Bedingungen in den Verteilnetzen gemessen, simuliert und analysiert.

Forschungspartner waren das Labor für Elektrizitätsnetze der Berner Fachhochschule (BFH) und die Fachhochschule Westschweiz (HES-SO Valais-Wallis). Das Projektteam bestand zudem aus den sieben Verteilnetzbetreibern AEW Energie AG, BKW Energie AG, Energie Service Biel/Bienne, Energie Thun AG, EWZ, Repower AG, und Services Industriels de Genève sowie einem Hersteller von Filtersystemen, Schaffner International AG. Diese Zusammenstellung an Partnern garantierte das nötige Know-how und die benötigten Ressourcen für das Projekt.

Was zeigen die Langzeitdaten?

Zur Analyse der Pegel der PQ-Parameter standen Langzeitdaten von vier Netzbetreibern über mehrere Jahre aus der Mittel- und Niederspannungsebene zur Verfügung. Ein Grossteil der Daten stammte aus Stadtgebiet. Die erfassten PQ-Parameter wiesen keine generelle Verschlechterung über die Zeit auf. Die gemessenen Pegel der Spannungseffektivwerte, der Oberschwingungsspannungen, des Gesamtoberschwingungsgehalts der Spannung (THD_U), des Langzeitflickers und der Spannungsunsymmetrie wiesen normalerweise grosse Abstände zu den Grenzwerten gemäss EN 50160 auf.[4] **Bild 1** stellt die normrelevanten 95-%-Werte des THD_U von 69 Messpunkten eines Netzbetreibers im Niederspannungsnetz dar und **Bild 2** vergleicht den Verlauf des Medians der Jahre 2015 bis 2018 aus Bild 1. Es kann zwar erkannt werden, dass 2018 der Wert von THD_U oft höher als in den Jahren zuvor war, aber die Änderung ist gering und die Reserve zum Grenzwert von 8 % sehr gross.

Der Grund für die grossen Reserven zu den Grenzwerten nach EN 50160 ist die Umsetzung der Regeln zur Anschlussbeurteilung (z. B. D-A-CH-CZ-Regeln) durch die Verteilnetzbetreiber. Die Messungen haben gezeigt, dass

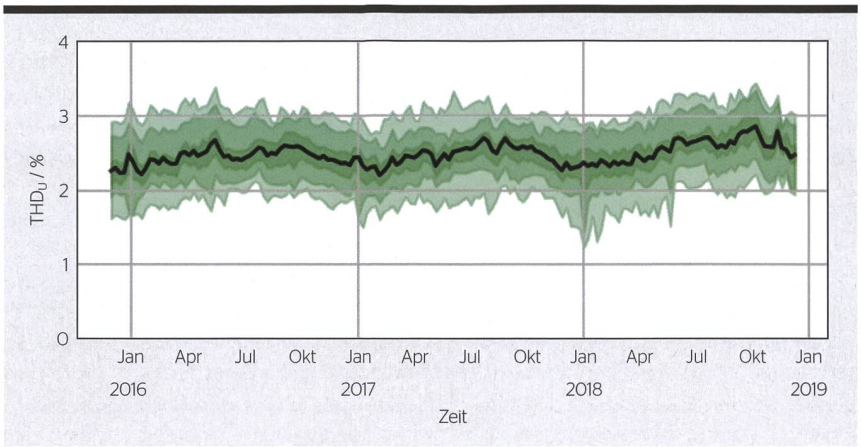

Bild 1 THD_U, Streuung der 95-%-Werte von 69 Messpunkten, schwarze Kurve: Median, die unterschiedlichen Grüntöne markieren das 0-/5-/25-/75-/95-/100-%-Quantil.

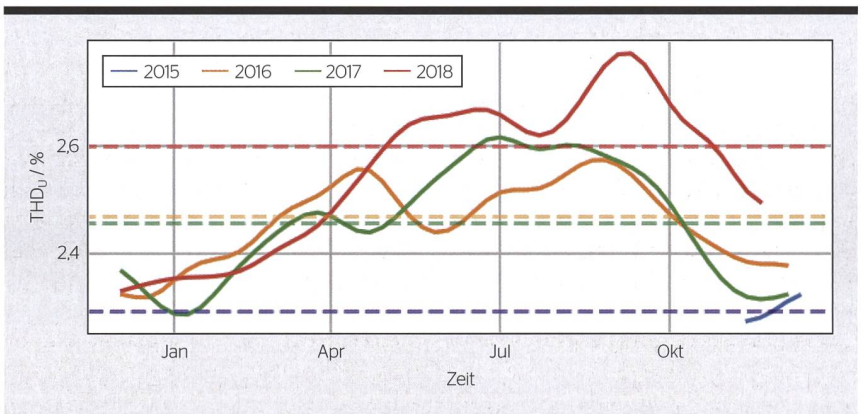

Bild 2 Median-Profile der Jahre aus Bild 1, gestrichelte Linien: Mediane der Jahre 2015 bis 2018.

Grenzwertverletzungen aufgrund der niedrigen Grenzwerte am ehesten bei der Spannung der 15. und 21. Harmonischen zu erwarten sind.

Die 15. und 21. Harmonische

In einem städtischen Niederspannungsnetz wurde ein Wohngebäudekomplex mit zwei Wärmepumpen untersucht. Eine Wärmepumpe wurde von einem 150-kW-Inverter angetrieben, die andere von einem 35-kW-Inverter. Während des Betriebs der grossen Wärmepumpe wurden signifikante Änderungen der Spannungsamplituden und teilweise Grenzwertverletzungen der 15. und 21. Spannungsharmonischen registriert. In der Folge wurde die 15. Harmonische detailliert untersucht. Die dadurch erhaltenen Ergebnisse gelten mit hoher Wahrscheinlichkeit auch für die 21. Harmonische. Der Betrieb der Wärmepumpen führte zu einer höheren Amplitude des Oberschwingungsstroms der 15. Harmonischen, was den Spannungsabfall für die 15. Spannungsharmonische über der Netzimpedanz beeinflusste. Die Messungen am Anschlusspunkt der Wärmepumpen ergaben, dass die grosse Wärmepumpe einen stärkeren Einfluss auf das Spannungsniveau hatte als die kleine, insbesondere bei Betrieb mit maximaler Leistung. Im Gegensatz dazu führte die kleine Wärmepumpe zu Spannungsschwankungen, die nicht proportional zu den durch die grössere Wärmepumpe verursachten Spannungsänderungen waren. Die Variation der Stromamplitude hatte also nicht in beiden Fällen (Betrieb der grossen oder kleinen Wärmepumpe) einen Einfluss auf die Spannungsamplitude. Ein ähnliches Verhalten wie an der Anschlussstelle der Wärmepumpen zeigte sich auch an anderen Messstellen des Gebäudekomplexes (**Bild 3**: Trafostation, Haus 1 und Haus 2) für alle Phasenleiter. Die niedrigsten Amplituden wurden in der Trafosta-

Bilder: BFH

tion gemessen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen im Gebäudekomplex wurde an der Verteilnische und an der Verteilkabine, die über lange Kabel mit der Trafostation verbunden waren, ein anderes Verhalten der drei Phasen festgestellt. Der Pegel der 15. Spannungsharmonischen an beiden entfernten Punkten war auf L2 und L3 höher, wenn nur die kleine oder keine Wärmepumpe in Betrieb war.

Ein Aktivfilter Ecosine Sync FN 3541 von Schaffner [5] wurde am Anschlusspunkt der Wärmepumpen installiert, um die 15. Stromharmonische auf allen drei Phasen aktiv zu kompensieren und um die Spannungsqualität zu verbessern. Durch den Einsatz des Filters wurden die Ströme der 15. Harmonischen in den Phasen L1 bis L3 reduziert. Insgesamt verringerten sich durch das Aktivfilter die Spannungspegel der 15. Harmonischen am Anschlusspunkt der Wärmepumpen und im gesamten Gebäudekomplex inkl. Trafostation. Auf die entfernten Netzpunkte (Verteilnische und Verteilkabine) hatte das Filter jedoch keine Auswirkung.

Die Messungen und Simulationen im Netzsimulationstool PowerFactory haben gezeigt, dass Inverter die harmonischen Spannungspegel an allen Punkten eines Verteilnetzes erheblich beeinflussen können. Kritische harmonische Amplituden werden nicht nur durch Inverter mit hoher Leistung, sondern auch durch die Summe vieler verschiedener nicht-idealer Lasten, die an unterschiedlichen Anschlusspunkten angeschlossen sind, verursacht. Aktive Oberschwingungsfilter können die von den nichtlinearen Lasten erzeugten Oberschwingungsströme kompensieren und das lokale Spannungsprofil verbessern. Wenn das Netz mehrere nichtlineare Lasten aufweist, die Stromoberschwingungen einspeisen, ist die Korrekturwirkung eines Aktivfilters an entfernten Netzpunkten begrenzt. Um die Amplituden der Oberschwingungsspannungen im gesamten analysierten Netz zu verringern, wäre eine aktive Filterung an allen Netzknoten, an denen relevante Oberschwingungsströme verursacht werden, erforderlich.

Im betrachteten Fall stellte sich die Frage, ob Massnahmen im Netz notwendig wären, da zwar Grenzwerte überschritten wurden, jedoch keine Störungen bekannt waren. Schliesslich wurde im Jahr 2020 in der EN 50160 der Grenzwert der 15. Spannungsharmonischen von 0,5 auf 1% und jener der 21. Spannungsharmonischen von 0,5 auf 0,75% angehoben. Dadurch traten im betrachteten Netz an den Messpunkten keine Grenzwertverletzungen mehr auf. Es ist anzunehmen, dass die Erhöhung der Grenzwerte in der Norm erfolgte, weil in heutigen Niederspannungsnetzen vermehrt Überschreitungen der zuvor geltenden Grenzwerte gemessen wurden, aber gleichzeitig keine Beeinträchtigungen von Geräten entstanden. In solchen Fällen, und wenn es gleichzeitig keine einfachen Abhilfemassnahmen gibt, ist es wohl zweckmässig, über die Anhebung von Grenzwerten zu diskutieren. Anzumerken ist, dass die EN 61000-2-2, welche die Verträglichkeitspegel in Niederspannungsnetzen definiert, nicht angepasst wurde.

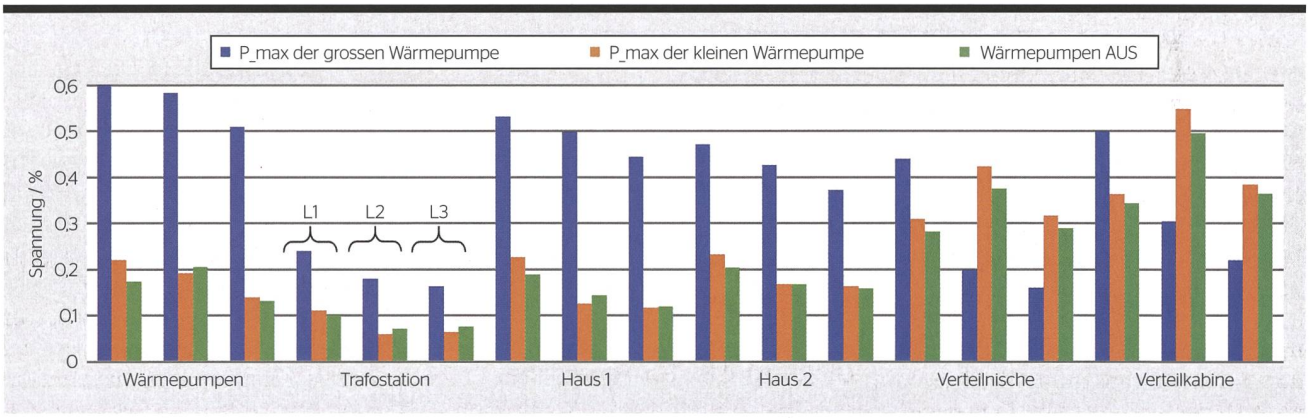

Bild 3 Gemessene Spannungspegel der 15. Harmonischen für Phase L1 bis L3 bei drei Betriebszuständen ohne Aktivfilter.

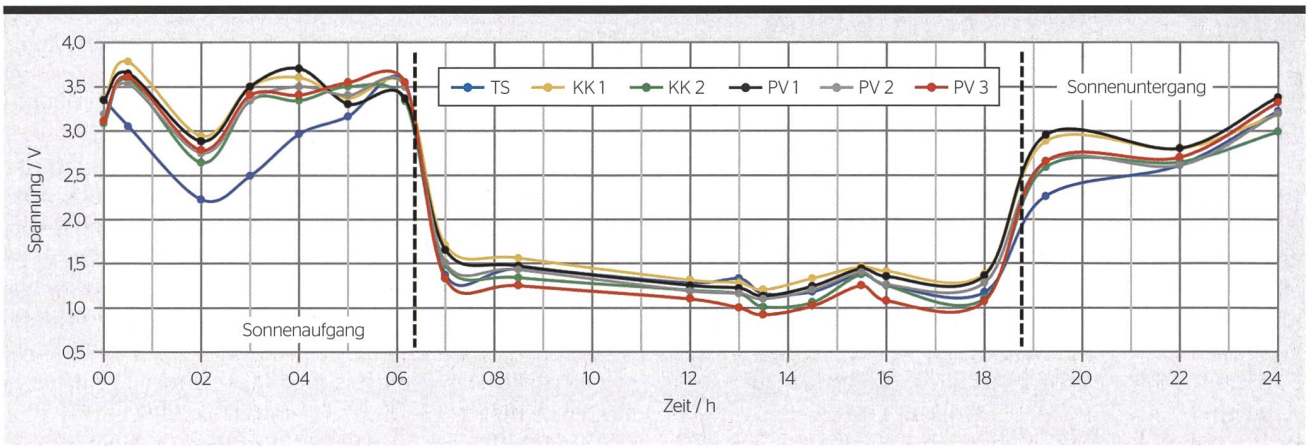

Bild 4 Gemessener Verlauf der RST-Spannungspegel über einen Tag (TS = Trafostation, KK = Kabelkabine, PV = PV-Anlage).

Bedeutung der frequenzabhängigen Netzimpedanz

Die frequenzabhängige Netzimpedanz, die an den Anschlusspunkten der einzelnen Geräte vorherrscht, beeinflusst die Entstehung und Ausbreitung von Oberschwingungsströmen und -spannungen im Stromnetz entscheidend. Um einen Überblick über ihre Ausprägung zu erhalten, wurde sie im Bereich von 50 Hz bis 200 kHz untersucht. Messungen zeigten, dass die frequenzabhängige Netzimpedanz in Trafostationen und Verteilkabinen in allen Regionen der Schweiz ähnliche Verläufe aufweist. Die Ergebnisse wurden im Bulletin SEV/VSE 5/2019 unter dem Titel «Messung von Netzimpedanzen» veröffentlicht. Die wesentlichen Unterschiede bei der fNI liegen in den Amplituden, die insbesondere im Frequenzbereich unterhalb von 2 kHz umgekehrt proportional von den jeweiligen Kurzschlussleistungen abhängen. Im Bereich oberhalb von 2 kHz ist durch den steigenden Einfluss der lokal angeschlossenen Geräte und Anlagen eine immer geringere Abhängigkeit der fNI von der Kurzschlussleistung zu beobachten. Im Gegensatz zu den Trafostationen und Verteilkabinen kann die Netzimpedanz an den Anschlusspunkten von Geräten und Anlagen, z.B. in der Unterverteilung, stark variieren. Die Variation ist abhängig von der Art und der Anzahl der angeschlossenen Geräte und Anlagen und kann sich wesentlich auf die Ausprägung der PQ-Phänomene an den einzelnen Netzknoten auswirken.

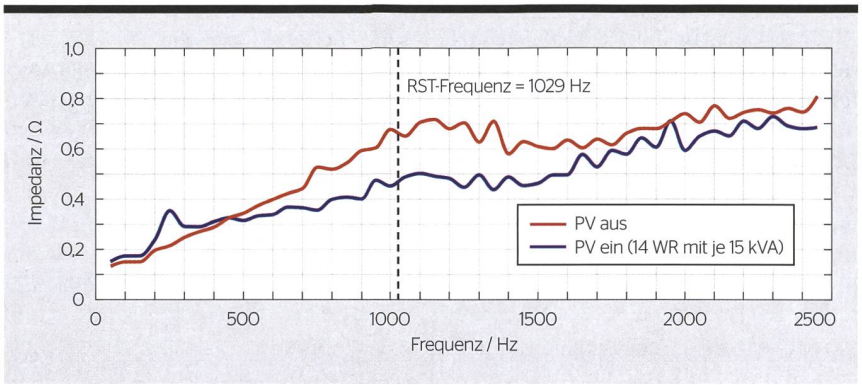

Bild 5 Veränderung der fNI durch den Betrieb einer 210-kVA-PV-Anlage.

Einfluss auf die Powerline Communication

Geräte mit Leistungselektronik und EMV-Filter können die Rundsteuerung (RST) und die Kommunikation mit G3-PLC beeinträchtigen: Zum Beispiel könnte eine starke Dämpfung des Kommunikationssignals durch besonders tiefe Netzimpedanzwerte bei der Kommunikationsfrequenz verursacht werden. Dadurch träte bei dieser Frequenz beinahe ein Kurzschluss auf, wodurch das Kommunikationssignal stark abgeschwächt würde und der Empfang des Signals beeinträchtigt werden könnte.

Dieses Phänomen wurde bei einem Projektpartner festgestellt und mittels Messungen und Simulationen untersucht. In einer Trafostation waren die Rundsteuerpegel tagsüber stark gedämpft. Weitere Messungen haben bestätigt, dass dieses Verhalten im gesamten Niederspannungsnetz auftrat. Tagsüber verursachten die Solarwechselrichter bei der RST-Frequenz Ströme mit signifikant anderen Amplituden als in der Nacht. Die dadurch erzeugten Spannungsabfälle über dem Transformator und den Kabeln verursachten die beobachteten Signaldämpfungen. Das Absinken des RST-Pegels am Morgen sowie das Ansteigen des RST-Pegels am Abend trat überall gleichzeitig auf und korrelierte mit dem Sonnenaufgang beziehungsweise mit dem Sonnenuntergang **(Bild 4)**.

Der Grund für die tageszeitabhängigen Ströme an den Messstellen bei der RST-Frequenz war die frequenzabhängige Netzimpedanz, die vom Betriebszustand der PV-Anlagen beeinflusst wurde. In **Bild 5** ist zu sehen, wie sich die frequenzabhängige Netzimpedanz am Anschlusspunkt einer PV-Anlage mit 210 kVA Nennleistung (14 Wechselrichter) in Abhängigkeit des Betriebszustands veränderte.

RÉSUMÉ

Qualité de la tension dans les réseaux de distribution

Résultats du projet de recherche OptiQ

Les réseaux de distribution sont utilisés de manière plus intensive en raison de l'augmentation de l'injection décentralisée et du stockage, mais aussi de l'électromobilité et des pompes à chaleur. Cela exerce une influence sur la qualité de la tension, sur l'impédance du réseau, qui dépend de la fréquence, et sur la communication par courants porteurs en ligne.

La situation dans les réseaux de distribution a été analysée par le biais de mesures et de simulations. Les données PQ à long terme évaluées n'ont pas montré de tendance générale, ni négative, ni positive. Étant donné qu'aucune modification significative de la qualité de la tension n'est survenue au cours des analyses, même lors de changements de topologie dans les réseaux moyenne et basse tension, il est permis de supposer que lors de l'évaluation du raccordement, l'application des règles actuelles des gestionnaires de réseau devrait garantir une qualité de tension élevée. Bien entendu, dans des cas isolés, des niveaux critiques de paramètres PQ peuvent être atteints avec certaines constellations de réseaux et le cumul d'appareils similaires utilisés simultanément, mais ils peuvent être éliminés par des mesures appropriées. Dans le réseau basse tension, il a en outre été démontré que des tensions harmoniques critiques pouvaient être causées par des installations de forte puissance, mais aussi par la somme de nombreux dispositifs non linéaires différents raccordés en différents points de connexion. NO

Die Amplitude der Ströme bei der RST-Frequenz in die PV-Anlagen war umso höher, je mehr Solarwechselrichter installiert waren. Daher ist es vorteilhaft, wenige Wechselrichter mit hoher Leistung zu installieren statt vieler Wechselrichter mit niedriger Leistung.

Simulationen haben gezeigt, dass ein kritisches Absinken des RST-Spannungspegels nicht auftreten würde, wenn der Stromfluss in die Wechselrichter bei der RST-Frequenz stark reduziert würde. Es empfiehlt sich, falls möglich, eine Lösung mit dem Wechselrichterhersteller zu suchen. Die Problematik ist bekannt und gewisse Hersteller haben bereits mit einer Sonderfirmware Abhilfe geschaffen.

Was bringt die Zukunft?

Die ausgewerteten PQ-Langzeitdaten zeigten weder einen generell negativen noch einen generell positiven Trend. Da in den Untersuchungen auch aufgrund von Topologieveränderungen im Mittel- und Niederspannungsnetz keine signifikanten Veränderungen der Spannungsqualität auftraten, kann davon ausgegangen werden, dass die Anwendung der heutigen Regeln der Netzbetreiber bei der Anschlussbeurteilung normalerweise eine hohe Spannungsqualität garantieren sollte. Selbstverständlich können vereinzelt mit bestimmten Netzkonstellationen und Häufungen gleichartiger und zeitlich synchron eingesetzter Geräte kritische Pegel von PQ-Parametern auftreten, welche sich jedoch mit geeigneten Massnahmen eliminieren lassen. Im Niederspannungsnetz zeigte sich ausserdem, dass kritische Oberschwingungsspannungen durch Anlagen mit hoher Leistung, aber auch durch die Summe vieler verschiedener nichtlinearer Geräte, die an unterschiedlichen Anschlusspunkten angeschlossen sind, verursacht werden können.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass in den Mittel- und Niederspannungsnetzen noch Reserven bezüglich Spannungsqualität vorhanden sind. Im Sinne einer kosteneffizienten Weiterentwicklung der Stromnetze wäre es interessant, diese Reserven zu nutzen und Investitionskosten in das Netz zu sparen. Wie gross diese Reserven sind und wie stark diese noch ausgenutzt werden könnten, ist schwer zu beurteilen. Vermutlich beschränken die heutigen Anschlussregeln eine bessere Ausnutzung der PQ-Reserven in gewissem Mass. Daher untersucht die Berner Fachhochschule im Projekt QuVert gemeinsam mit ihren Projektpartnern die Nutzung von Qualitätsreserven in elektrischen Verteilnetzen mit umfangreichen Messkampagnen.[6] Die Ergebnisse werden im Frühjahr 2024 veröffentlicht.

Die Beteiligten führten nebst den oben vorgestellten Aktivitäten zahlreiche weitere Analysen durch. Diese sind im Schlussbericht dokumentiert. Die im Projekt entwickelten Empfehlungen und Hilfsmittel zur Nutzung der Ergebnisse in der Zielnetzplanung werden in einem nächsten Artikel im Maiheft 2022 vorgestellt.

Referenzen

[1] «D-A-CH-CZ – Technische Regeln zur Beurteilung von Netzrückwirkungen», VSE, 2007.

[2] EN 61000-3-2, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current <= 16 A per phase), 2019.

[3] EN 61000-3-12, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-12: Limits – Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and <= 75 A per phase, 2011.

[4] EN 50160, Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen, 2020.

[5] Schaffner ecosine active sync, active harmonic filter, products.schaffner.com/en/ecosine-active-sync.

[6] «Projekt QuVert», Berner Fachhochschule, www.bfh.ch/de/forschung/forschungsbereiche/bfh-zentrum-energiespeicherung/projekte.

Link

Schlussbericht und die Berichte der Arbeitspakete 1 bis 5:
→ www.bfh.ch/de/forschung/forschungsbereiche/bfh-zentrum-energiespeicherung/projekte

Autoren

Stefan Schori ist Managing Co-Director und Gruppenleiter Elektrizitätsnetze am BFH-Zentrum Energiespeicherung.
→ BFH, 2503 Biel
→ stefan.schori@bfh.ch

Michael Höckel ist als Professor für Energiesysteme an der BFH für ein breites Spektrum an Forschungsgebieten verantwortlich.
→ michael.hoeckel@bfh.ch