

Untersuchung und Verbesserung der Spannungsqualität vor dem Hintergrund des Anstiegs an Photovoltaik, Elektrofahrzeugen, PV-Batteriespeichersystemen und Power-to-Heat

Cornelius Biedermann^{1*}, Sandor Simon², Alexander Vanselow³,
Joachim Przibylla⁴, Mateo Lippich Golobart⁴, Gian-Luca Di Modica¹, Till Garn¹,
Dominik Willenberg², Rolf Witzmann⁴, Bernd Engel¹

¹ TU Braunschweig / Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – elenia, +49 531 3917788., cornelius.biedermann@tu-bs.de, www.tu-braunschweig.de/elenia

² RWTH Aachen University / Institut für Hochspannungstechnik, +49 241 8092946, s.simon@iaew.rwth-aachen.de, www.ifht.rwth-aachen.de/

³ Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V., +49 241 997857136, alexander.vanselow@fgh-ma.de, www.fgh-ma.de/de/

⁴ TU München (TUM) / Professur für Elektrische Energieversorgungsnetze, +49 89 28922006, joachim.przibylla@tum.de, www.hsa.ei.tum.de/

Kurzfassung:

Die Erzeuger- und Verbraucherstruktur der elektrischen Verteilnetze stehen im Kontext der Energie-, Mobilitäts- und Wärmewende vor Veränderungen. Im Rahmen des Projektes U-Quality wird untersucht, welchen Einfluss dieser Wandel auf die Spannungsqualität speziell in der Niederspannung hat und welche Komponenten, Technologien und Verfahren einen Beitrag zur Sicherstellung der Spannungsqualität leisten können. Der Fokus der Untersuchung liegt in der Niederspannung insbesondere auf den Systemen und Durchdringungen von Photovoltaik, Heimbatteriespeichern, Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen. Im Projekt wird ein dreigliedriger Ansatz verfolgt. Zuerst erfolgt eine Aufnahme der Ist-Situation in Niederspannungsnetzen und eine Laborvermessung der Rückwirkungen von Komponenten. Im zweiten Projektabschnitt werden auf Basis von Simulationen und Demonstrator tests Verfahren, Technologien und Komponenten entwickelt bzw. angepasst, sodass die Spannungsqualität in den Merkmalen Unsymmetrie, Flicker und Oberschwingungen verbessert wird. Im abschließenden Projektabschnitt werden Erkenntnisse, Handlungsempfehlungen und mögliche Normanpassungen veröffentlicht.

Keywords: Spannungsqualität, Oberschwingungen, Flicker, Unsymmetrie, Niederspannungsnetz, Durchdringung, Power Quality

1 Einleitung

Einleitend wird ein Überblick zu dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekt U-Quality gegeben. Das Projekt wird durch das Konsortium bestehend aus TU Braunschweig, RWTH Aachen, TU München und FGH e.V. bearbeitet, welches gemeinsam bereits erfolgreich das Vorgängerprojekt U-Control abgeschlossen hat. Die technischen Rahmenbedingungen in Kapitel 2 zeigen allgemein die Motivation für das Projekt. Nach einer Beschreibung des Gesamtvorhabens in Kapitel 3 werden anschließend die Vorgehensweise in der Feldmesskampagne in Kapitel 4, die Labormessungen in Kapitel 5 sowie die Simulationen in Kapitel 6 detailliert erläutert. Aufgrund der Resonanz des Vorgängerprojekts ist das Ziel dieses Beitrages, einen Einblick in das Projektvorhaben zu geben und Interessenten frühzeitig die Möglichkeit zu geben sich zu beteiligen und sich über Projektergebnisse zu informieren.

2 Technische Rahmenbedingungen

In den Niederspannungsnetzen (NS-Netzen) steigt die Anzahl umrichtergekoppelter Erzeugungsanlagen und Verbraucher, wie beispielsweise Elektrofahrzeuge und Photovoltaik-Wechselrichter. Der Fokus bei der Untersuchung der Spannungsqualität liegt hierbei bei Erzeugern und Verbrauchern, die einen im Einzelnen oder im Kollektiv einen starken Einfluss auf die Spannungsqualität haben. Diese Komponenten können die Spannungsqualität im Netz negativ beeinflussen.

Im Gegensatz zur Zunahme von netzrückwirkenden Komponenten existieren immer mehr störepfindliche Komponenten mit reduziertem Signalpegel, welche in ihrer Funktion durch unzureichende Spannungsqualität beeinträchtigt werden. Die Störfestigkeit ist dabei die Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung bei einem bestimmten Störpegel den fehlerfreien Betrieb aufrechtzuerhalten. Systemrelevante oder andere essentiell wichtige Geräte dürfen auch bei einem hohen Störpegel im Netz nicht in ihrer Funktionalität eingeschränkt werden und müssen durch entsprechende Auslegung eine hohe Störfestigkeit aufweisen (Abbildung 1). [1]

Die Einhaltung der Grenzwerte für die Spannungsqualitätsmerkmale entsprechend DIN EN 50160 ist von Bedeutung für die Aufrechterhaltung der Netzstabilität [2]. Die erhöhten Durchdringungen neuer Komponenten könnten zu kritischen Netznutzungsfällen führen. Daher erforscht das Projekt U-Quality zukünftig notwendige Grenzwerte der Spannungsqualitätsmerkmale und Angaben zu kritischen Anzahlen von Verbrauchern und Erzeugern im NS-Netz.

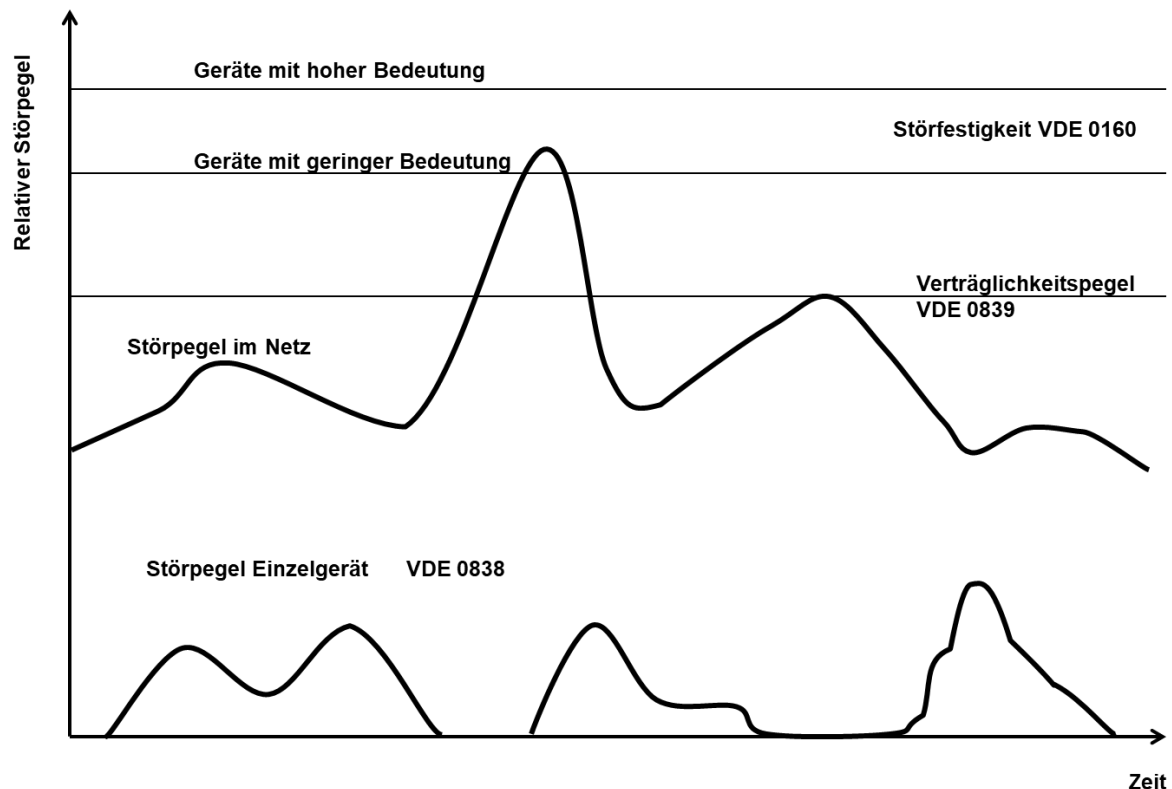


Abbildung 1: Störpegel im Netz und bei Einzelgeräten verglichen mit Verträglichkeitspegel nach VDE 0839 [4]

3 Projektmethodik

Die zukünftigen Netznutzungsfälle in der Niederspannung werden vermehrt durch eine verstärkte Durchdringung neuartiger Komponenten auf Seiten der Netzkunden, wie Elektromobilität, Wärmepumpen (WP), Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) und batterieelektrische Heimspeicher geprägt werden [3]; [4]. Zu Beginn des Projekts werden daher in einer Metastudie die erwarteten Durchdringungsszenarien und die hierzu passenden technischen Eigenschaften und Parameter der neuartigen Geräteklassen bestimmt. Der Fokus liegt dabei auf der Modellierung von Abhängigkeiten zwischen den erwarteten Entwicklungen, da beispielsweise davon auszugehen ist, dass die Durchdringung der Elektromobilität auch einen Einfluss auf die Durchdringung und Skalierung von PV-Anlagen und Heimbatteriespeichersysteme haben wird. Auf diese Weise wird eine korrekte und realitätsnahe Bewertung sowie Simulation der Bandbreite zukünftig erwarteter Netznutzungsfälle im späteren Projektverlauf gewährleistet. Hierbei wird der Einfluss verschiedener möglicher Entwicklungen auf die erwarteten Spannungsqualitätsrückwirkungen berücksichtigt. Zusätzlich erfolgt eine Feldmesskampagne zur Erfassung der Spannungsqualität in typischen NS-Netzen. Als typische Netze werden ein Vorstadtnetz in Form einer Einfamilienhaussiedlung, ein Dorfnetz mit langen Leitungssträngen, eine große PV-Anlage und ein Ladepark für Elektrofahrzeuge vermessen. Des Weiteren wird eine Laborvermessung von Photovoltaik, Heimbatteriespeichersystemen, Elektromobilität und Wärmepumpen hinsichtlich der Spannungsqualitätsmerkmale vorgenommen. Aus diesen grundlegenden Erkenntnissen werden Zukunftsszenarien entwickelt. Bei der Modellierung der Netztopologien werden NS-Netze wie Stadtnetze, Vorstadtnetze und Dorfnetze definiert. Für

die Modellierung der Komponenten werden typische Komponenten wie WP, PV-Anlagen, Heimbatteriespeichersysteme, Elektrofahrzeuge sowie Haushaltslasten in einem Szenario eingesetzt. Neben der Durchdringung, Skalierung sowie Verteilung der Komponenten sind die Betriebsstrategien dieser Kollektive von entscheidender Bedeutung. Daher werden beispielsweise gesteuertes und ungesteuertes Verbraucherverhalten analysiert und für Simulationen zur Spannungsqualität detailliert modelliert. Das Zusammenführen der Modellierungen der Komponenten und der Modellierung der Netztopologien resultiert in einer großen Anzahl an Netznutzungsfällen, welche in umfangreichen Simulationen untersucht werden. Parallel zu der Simulationsentwicklung werden Reglerkonzepte und ein Spannungsqualitätsregler-Prototyp entwickelt. Mit diesem Prototyp soll den im Projekt identifizierten, zukünftigen Spannungsqualitätsproblemen entgegengewirkt werden. Die Verbesserung der Spannungsqualität wird zuerst in den Simulationen und abschließend in einem Feldversuch unter Einsatz des Spannungsqualitätsregler demonstriert. Aus dem gesamten Projektprozess (Abbildung 2) werden zum Projektabschluss Handlungsempfehlungen für Verteilnetzbetreiber und Überarbeitungsvorschläge für bestehende und zukünftig entwickelte Normen entstehen. Des Weiteren werden im Projekt Testverfahren und Nachweisprozesse zur Prüfung der Umsetzung der wissenschaftlichen Vorgaben entwickelt.

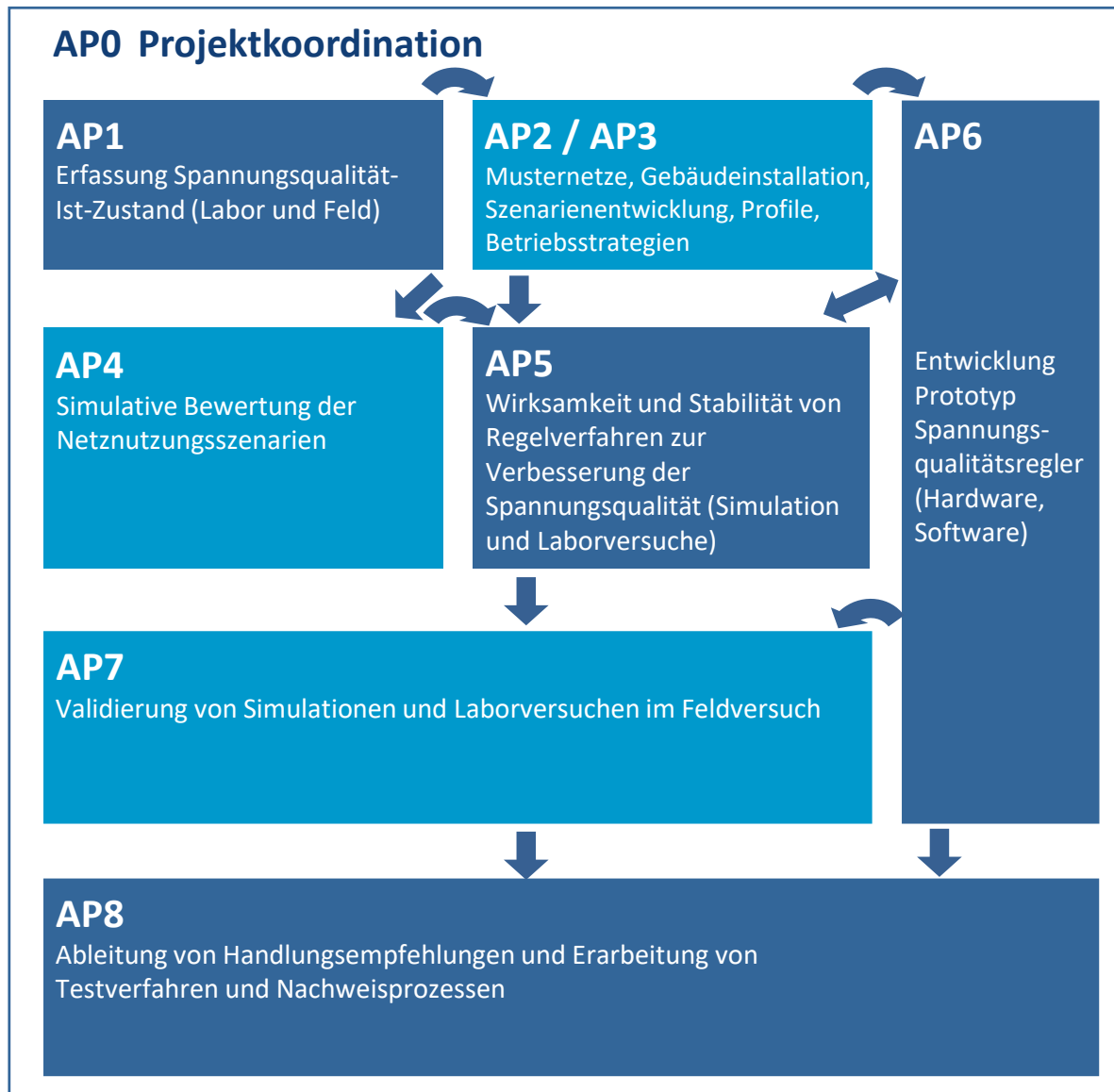


Abbildung 2: Projektübersicht gemäß der Gesamtvorhabenbeschreibung

4 Feldmesskampagne

Zur Aufnahme der Ist-Situation der Spannungsqualität werden in verschiedenen NS-Netzen Messungen durchgeführt. Ein Teil der Messungen findet in einem Fuhrpark mit Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge statt. Die Untersuchungen konzentrieren sich dort insbesondere auf Oberschwingungen. Des Weiteren wird unter dem gleichen Fokus auf einem Bauernhofdach eine PV-Anlage vermessen, die in der Niederspannung einspeist. Als weitere Messgebiete sind verschiedene Dorfnetze zur Vermessung ausgewählt. Bei diesen liegt der Fokus auf der Netzimpedanz und den Nullleiterströmen zur Feststellung der Unsymmetrie. Ein weiterer Teil der Feldmesskampagnen wird im Vorstadtbereich in einer Einfamilienhaussiedlung durchgeführt.

Diese Messung, welche aufgrund des erhöhten Aufkommens von WP und PV-Anlagen ausgewählt wurde, wird im Folgenden genauer beschrieben. Insgesamt sind in diesem gemessenen Netzabschnitt 96 Haushalte mit einer Anzahl von 33 Wärmepumpen und

7 Photovoltaikanlagen registriert. Der Netzabschnitt ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt. Im Netz werden Kurzzeit- und Langzeitmessungen durchgeführt. Mit hochauflösenden Messgeräten werden Kurzzeitmessdaten mit einer Abtastrate von 1 MHz über 10 Minuten generiert, während die Langzeitmessung Sekundenwerte über einen Zeitraum von ca. 4 Wochen aufnimmt. Das Netzgebiet ist ein von der Ortsnetzstation (ONS) ausgehendes Strahlennetz. Ein Teil der Stränge in diesem Gebiet sind an einen Kabelverteilschrank (KVS) aufgelegt, der an einer anderen ONS und damit anderem NS-Netz angeschlossen ist. Die Messorte sind die ONS, zwei Kabelverteilschranke hinter der ONS, ein Hausanschlusskasten in einem privaten Haus auf der Mitte eines Stranges, ein KVS am Strangende und ein KVS mit der Versorgung einer Abwasserpumpe am Strangende. Die Messstellen sind in Abbildung 3 markiert.

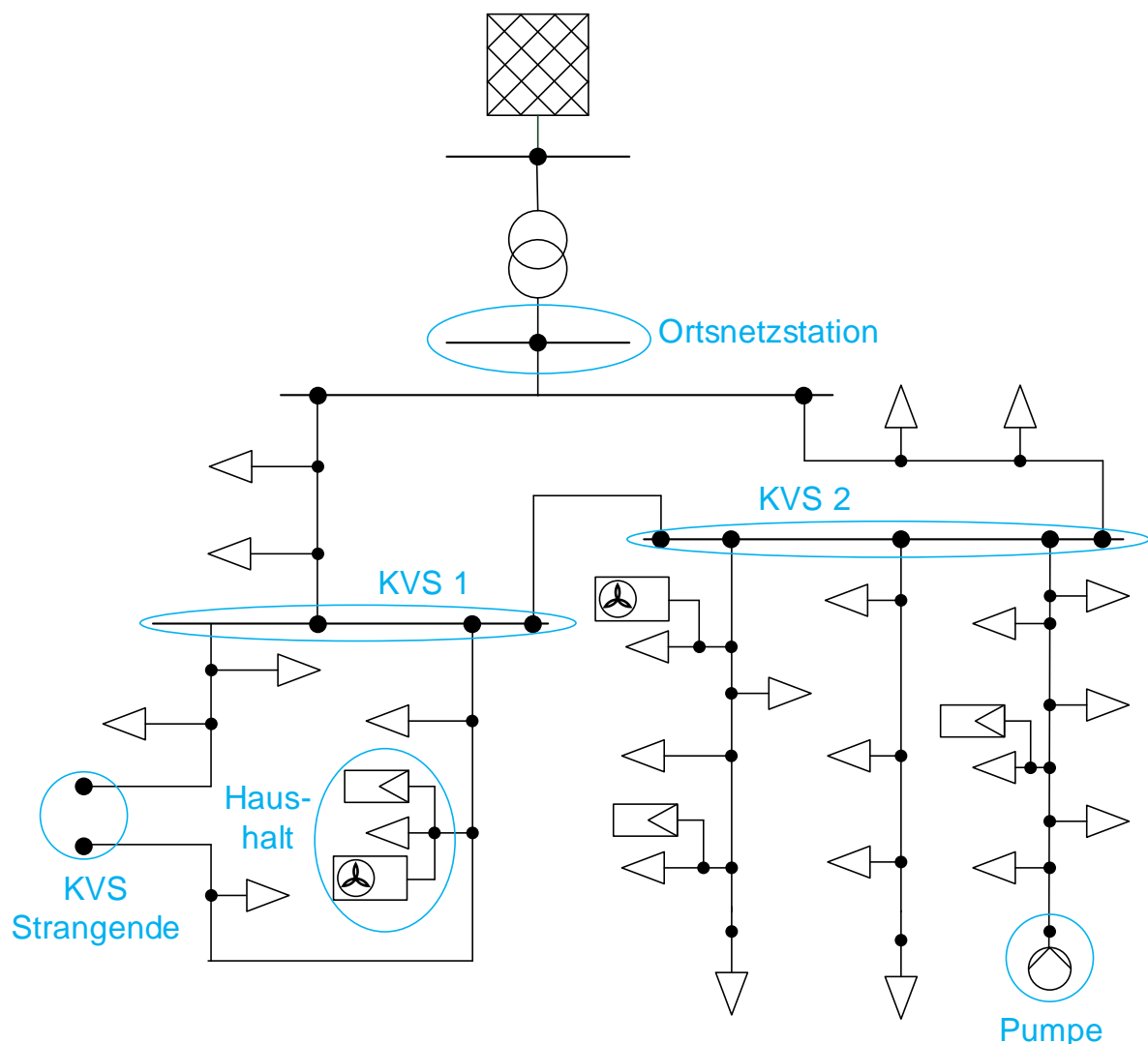


Abbildung 3: Schematische Übersicht der Messorte

Durch die Aufteilung der Messgeräte wird eine ausreichende und dezidierte Aufnahme von Spannungsqualitätsmerkmalen in dem untersuchten Vorstadtnetz erzeugt. Zusätzlich zur Messung der Ströme und Spannungen werden solare Einspeisedaten und Wetterdaten des Netzgebiets aufgezeichnet und ausgewertet. Hierbei wird untersucht, ob die solare Einspeisung und das Wetter einen Einfluss auf die Spannungsqualität haben. Zur weiteren

Nutzung im Projektverlauf ist eine umfassende Aufbereitung und Auswertung der Messdaten der Spannungsqualitätsmerkmale geplant.

5 Labormessungen

Im Rahmen der Laboruntersuchungen werden verschiedene Komponenten hinsichtlich ihres Einflusses auf Spannungsqualitätsmerkmale vermessen. Die Ergebnisse dieser Messungen werden für die Modellbildung von Komponenten verwendet. Neben Erzeugern und Verbrauchern wie z. B. PV-Wechselrichtern, Ladesäulen für Elektrofahrzeuge und Haushaltslasten sind auch Netzelemente (z. B. Niederspannungskabel unterschiedlichen Querschnitts) Gegenstand der Untersuchungen im Labor. Untersuchungsaspekte, auf die im Feld nur unzureichend Einfluss genommen werden kann (z. B. die Netzimpedanz, Spannung am Netzverknüpfungspunkt), werden im Labor variiert und auf deren Einfluss untersucht.

Neben Untersuchungen zur Unsymmetrie und zu schnellen Spannungsänderungen liegt ebenfalls ein Schwerpunkt auf Oberschwingungen. Hierbei werden zwei Untersuchungsaspekte verfolgt. Einerseits wird die leitungsgebundene Störaussendung verschiedener Komponenten unter variierenden Betriebspunkten und Netzbedingungen (z. B. Netzimpedanz) über einen Frequenzbereich bis zu 1 MHz vermessen. Andererseits wird das Verhalten von Komponenten bei einer herabgesetzten Spannungsqualität analysiert. Dazu werden unter anderem monofrequente Störspannungen variabler Amplitude und Frequenz auf das 50 Hz-Grundsignal moduliert. In Abbildung 4 ist der Versuchsaufbau veranschaulicht und eine exemplarische Kennlinie der Störspannungsfrequenz gezeigt.

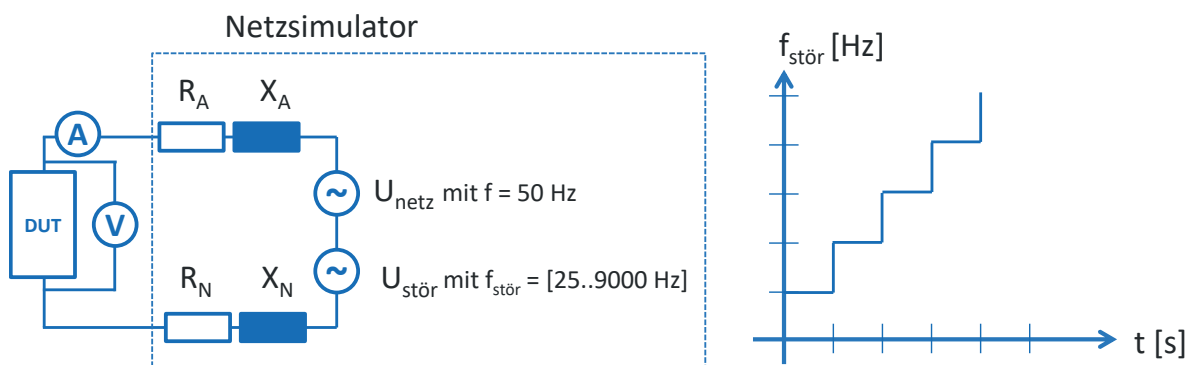


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und treppenförmiger Anstieg der Frequenz der Störspannungsquelle

Auf Basis der Auswertung der resultierenden Stromflüsse wird das Komponentenverhalten in Profile bzw. Ersatzmodelle überführt und ergänzend die frequenzabhängige Impedanz bestimmt. Letztere wird für weitergehende Simulationen der gegenseitigen Beeinflussung von Komponenten in der Frequenzdomäne verwendet. Parallel wird der Anpassungsbedarf von Kenngrößen der Oberschwingungsverzerrung (z. B. die gesamte harmonische Verzerrung, kurz THD) durch den Vergleich aktueller und neuer Berechnungsgrenzen (maximal betrachtete Oberschwingungsordnung) bewertet.

6 Simulationsansätze

Die Ergebnisse des vorangegangenen Projekts U-Control zeigen, dass NS-Netze sehr individuelle Strukturen aufweisen und entsprechend der Untersuchungsgegenstände ausgewählt werden sollten. In diesem Rahmen wurde ein Musternetzgenerator vorgestellt, dessen Datenbasis aus 358 digitalisierten NS-Netzen unterschiedlicher Regionen Deutschlands besteht. Der Musternetzgenerator erstellt auf Grundlage der Datenbasis synthetische NS-Netze der Klassen Vorstadt, Dorf und Land, wobei die Einteilung in Klassen auf Basis des mittleren geografischen Hausabstands erfolgt. [5]

Aus dem Musternetzgenerator werden für das Projekt U-Quality synthetische Musternetze ausgewählt. Anhand dieser Netze können zukünftige mögliche Belastungen der Energieversorgungsnetze hinsichtlich Unsymmetrie, Oberschwingungen und schnellen Spannungsänderungen verdeutlicht werden. Für die detaillierte Betrachtung der Spannungsqualitätsmerkmale in NS-Netzen werden die bisher symmetrischen Netzmodelle erweitert und um den Neutralleiter auf 4-Leiter-Netze ergänzt.

Die erweiterten Musternetze betrachten neben den Versorgungsnetzen, die in bisherigen Untersuchungen am Hausanschlusskasten enden, auch die elektrischen Gebäudeverteilungen (eGV). Die erweiterten Musternetze beginnen an der Oberspannungsseite des Ortsnetztransformators und enden an den Anschlusspunkten in den Gebäuden, an welche (Haushalts-)Lasten mit entsprechenden Kennlinien oder Leistungsaufnahmen angeschlossen werden.

Ab dem Hausanschlusskasten werden die eGV erstellt, welche typische Stromkreislängen, Leitungstypen und Phasenaufteilung widerspiegeln. Darüber hinaus werden Kriterien wie Gebäudetyp, Gebäudegröße, Baujahr, elektrische Sanierung und technische Ausstattung herangezogen, woraus sich eine Variation an möglichen eGV ergibt. Ebenso werden Planungsrichtlinien und Normen berücksichtigt, sowie Erfahrungsberichte von tätigen Elektroinstallateuren eingeholt und damit die eGV auf gewünschte Realitätsnähe überprüft. Die Abbildung 5 gibt eine Übersicht der Normen und Planungsrichtlinien, welche bei der Auslegung von eGV hinsichtlich des maximalen Spannungsfalls berücksichtigt werden müssen. Die verschiedenen eGV werden abhängig von der Versorgungsnetz-Klasse auf diese verteilt und mit ihnen verknüpft.

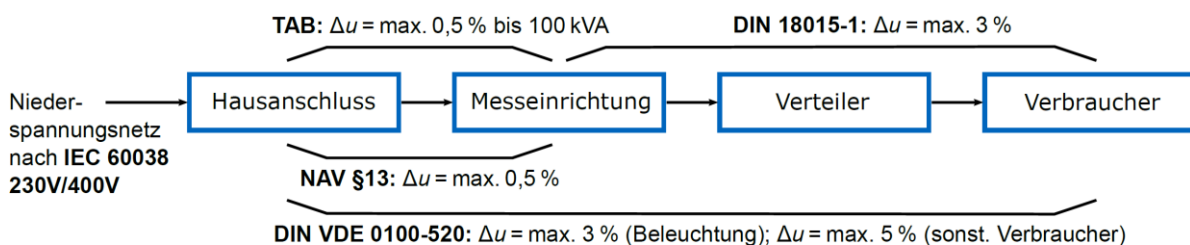


Abbildung 5: Aktuell zu berücksichtigende Normen und Planungsrichtlinien bei der Auslegung von Elektroinstallationen in Gebäuden

Jedes eGV in den Netzmodellen hat eine bestimmte Anzahl an Anschlusspunkten und dadurch eine maximale Aufnahmefähigkeit von Komponenten. Um unterschiedliche Netznutzungsfälle simulieren zu können, ist eine umfangreiche Auswahl an Lastprofilen verschiedener Haushaltsgeräte notwendig, wobei hier die Ergebnisse der Labormessungen in Form von Lastprofilen und -kennlinien Eingang finden. Zusätzlich werden Nutzungsdauern und An- und Abschaltzeitpunkte berücksichtigt. Abhängig von den Durchdringungsgraden verschiedener Szenarien erfolgt eine geeignete Verteilung von Komponenten auf die Anschlusspunkte der eGV.

Um sicherzustellen, dass Auslastungsgrenzen der Musterversorgungsnetze in den Szenarien eingehalten werden, wird es in manchen Szenarien notwendig sein die Musternetze auszubauen. Dafür wird wie im vorangegangenen Projekt U-Control die Netzausbaumethodik aus der dena Verteilnetzstudie angewendet. [6]

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Paper wird die Vorgehensweise im Projekt U-Quality vorgestellt. Im Zuge der Veränderung der Erzeuger und Verbraucher bei der Energie-, Wärme- und Mobilitätswende untersucht das Projekt die Spannungsqualität. Die ersten Gespräche in Kooperation mit Netzbetreibern zeigen, dass die betrachteten Spannungsqualitätsmerkmale bezüglich eines stabilen Netzbetriebs berücksichtigt werden müssen, weil die Reduzierung der Spannungsqualität im NS-Netz zu Ausfällen und Störungen führen kann. Vor diesem Hintergrund wurden Messdaten von Verteilnetzbetreiber angefordert, die von diesen bereits in vorherigen Netzmessungen aufgenommen wurden. Eine Auswertung der Messdaten steht noch aus. Zur Simulation sind bisher zwei Simulationsansätze erstellt. Da keine gesammelte Datenquelle zu Elektroinstallationen in Gebäuden vorliegt, wurden beispielhafte Gebäudenetze basierend auf persönlichen Erfahrungen tätiger Elektriker und bestehenden Planungsleitfäden erstellt. Ältere Elektroinstallationen weichen dabei hinsichtlich verschiedener Aspekte von dem derzeitigen Standard ab und wurden daher gesondert berücksichtigt. Zusätzlich wurden auf Basis der Feldtestnetze erste Simulationsmodelle erstellt. Entsprechende Netze wurden in einer Simulationsumgebung nachgebildet und Simulationen durchgeführt, die noch nicht verifiziert und ausgewertet sind.

Zur Verfolgung zukünftiger Ergebnisse werden diese auf einer Projektwebsite unter www.u-quality.de präsentiert. Für Fragen oder Anmerkungen zu Projektinhalten stehen wir als Projektkonsortium unter den oben genannten Kontaktdaten gerne bereit.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

8 Referenzen

- [1] D. Blume, J. Schlabbach, T. Stephanblome, Spannungsqualität in elektrischen Netzen: Ursachen, Messung, Bewertung von Netzrückwirkungen und Verbesserung der Spannungsqualität, VDE Verlag, ISBN: 3-8007-2265-8, 1999
- [2] EN 50160:2010, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks.
- [3] FGH e.V, Metastudie Forschungsüberblick Netzintegration Elektromobilität, Aachen, 2018
- [4] Umweltbundesamt, Klimaneutraler Gebäudebestand 2050, ISSN 1862-4359, Dessau-Roßlau, 2016
- [5] M. Lindner, C. Aigner, R. Witzmann, F. Wirtz, I. Berber, M. Gödde, R. Frings, Aktuelle Musternetze zur Untersuchung von Spannungsproblemen in der Niederspannung, 14. Symposium Energieinnovation, Graz, 2016
- [6] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030, Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2012

Weitere Informationen unter www.u-quality.de