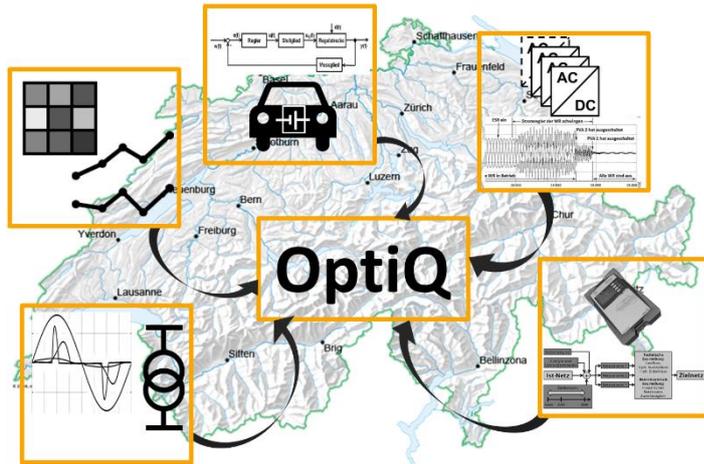




Berner
Fachhochschule



ewz energie thun

BKW Hes·SO VALAIS WALLIS

REPOWER ESB

AEW SCHAFFNER
Ihre Energie. shaping electrical power

BFH SIG
Berner Fachhochschule

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra
Bundesamt für Energie BFE

SCCER - FURIES
Swiss Centre for Competence in Electrical Research and Innovation

OptiQ – Bericht WP 4

Effekt der Zunahme von nichtlinearen Geräten auf die Ausbreitung von Oberschwingungen und auf die Netzimpedanz

Autoren: Stefan Schori, Dominique Roggo (HES-SO), Blaise Evéquoz (HES-SO)

Co-Autoren: Michael Höckel, Lukas Heiniger, Thiago Novais, Ron Buntschu
Steffen Wienands, Lino Capponi (HES-SO)

Auftraggeber: Bundesamt für Energie BFE

Projektpartner: AEW, BKW, Energie Service Biel/Bienne, Energie Thun, ewz, Repower, Schaffner, Service Industriels de Genève, HES-SO Valais-Wallis

Unterstützt durch: SCCER FURIES (Innosuisse)

Version: 2.0

Ort: Nidau

Datum: 30.10.2020

Berner Fachhochschule
BFH-Zentrum Energiespeicherung
Labor für Elektrizitätsnetze
Aarbergstrasse 5
CH-2560 Nidau

1 Abstract

Deutsche Version

Im Arbeitspaket WP 4 des Projekts OptiQ wurde untersucht, welche Effekte die Zunahme von nichtlinearen Geräten auf die Ausbreitung von Oberschwingungen und auf die Netzimpedanz hat. Moderne Geräte mit Leistungselektronik emittieren einen Strom in das Stromnetz, der keine ideale Sinusform aufweist. Der Strom weist Oberschwingungsanteile auf, die über der Netzimpedanz Spannungsüberschwingungen verursachen. Diese Spannungsüberschwingungen können andere Geräte im Stromnetz stören. In diesem Arbeitspaket wurden spezifische Untersuchungen durchgeführt, um die verschiedenen Aspekte zu analysieren. Zum Beispiel lieferte eine Untersuchung in einem ländlichen Dorf, in dem die öffentliche Beleuchtung komplett auf LED umgerüstet wurde, Erkenntnisse zum Einfluss auf die Spannungsqualität sowie auf die Wirk- und Blindleistung. Die Analyse eines städtischen Netzes mit leistungsstarken Wärmepumpen untersuchte den Einfluss des Wärmepumpenbetriebs auf die Spannungsqualität an lokalen und weiter entfernten Netzknoten. Der Einbau eines Aktivfilters zeigte auf, wie vermieden werden kann, dass harmonische Ströme überhaupt erst ins Stromnetz emittiert werden. Verschiedene Messkampagnen brachten Erkenntnisse dazu, wie Leistungselektronik und Eingangsfilter die Netzimpedanz beeinflussen bzw. Oberschwingungen verursachen und somit Kommunikationseinrichtungen wie die Rundsteuerung und G3-PLC stören können. Zudem wurde festgestellt, dass die Kommunikationssignale selbst Störungen von LED-Leuchten verursachen. Methodiken zur Störungssuche und Messequipment zur Erfassung der frequenzabhängigen Netzimpedanz wurden entwickelt.

English version

The work package WP 4 of the project OptiQ investigated the effects on the propagation of harmonics and on the grid impedance caused by the increase of nonlinear devices in the distribution grids. Modern devices with power electronics inject a current into the distribution grid that does not show a perfectly sinusoidal shape. The current contains harmonic components that cause voltage harmonics over the grid impedance. These voltage harmonics can disturb other devices in the power grid. In this work package, specific studies have been carried out to analyze the different aspects. For example, a study in a rural village, where the public lighting was completely converted to LED, revealed the influence on the power quality as well as on the active and reactive power. The analysis of an urban grid with powerful heat pumps investigated the influence of the heat pumps' operation on the power quality at local and remote grid nodes. The installation of an active harmonic filter showed how harmonic currents can be prevented from being emitted into the grid. Various measurement campaigns provided insights into how power electronics and input filters influence the grid impedance or how they cause harmonics and thus interfere with communication devices such as ripple control and G3-PLC. In addition, it was detected that the communication signals themselves disturbed LED luminaires. Methods for troubleshooting and measuring equipment to measure the frequency-dependent grid impedance were developed.

2 Management summary

Die Analysen lieferten Ergebnisse dazu, wie nichtlineare Geräte die Ausprägung der PQ-Parameter in NS-Netzen beeinflussen und wie sie Kommunikationssysteme stören können. Die Netzimpedanz wurde an Netzknoten mit unterschiedlichen Gerätestrukturen erfasst, um die Auswirkungen von moderner Leistungselektronik zu quantifizieren. Die Ergebnisse sind in den Kapiteln 4.1 bis 4.17 zusammengefasst.

Der Ersatz der öffentlichen Beleuchtung mit LED in einem Dorf mit 2'000 Einwohnern hatte keinen negativen Einfluss auf die Spannungsqualität im untersuchten Niederspannungsnetz. Sowohl Wirk- wie auch Blindenergiebezug konnten stark verringert werden, was die Stromkosten für die Gemeinde reduzierte.

Eine Analyse einer grossen Wärmepumpe betrachtete den Einfluss von leistungsstarken Geräten, aber auch von der Summe aller Geräte, auf lokale und weiter entfernte Netzpunkte. Der Einsatz eines Aktivfilters zeigte, dass dieser die emittierten Oberschwingungsströme reduzieren und dadurch das Spannungsprofil lokal verbessern kann. Jedoch ist es nicht möglich, dadurch Verzerrungen der Spannung an weiter entfernten Netzknoten zu verhindern, wenn diese durch die Summe von anderen Lasten im Stromnetz verursacht werden. Simulationen konnten die Zusammenhänge darstellen.

Solarwechselrichter können die Netzimpedanz am Anschlusspunkt einer Photovoltaik-Anlage verändern, wie Messungen an einer Anlage mit 31 Wechselrichtern aufzeigten. Dabei wurden nacheinander Wechselrichter ausgeschaltet und die frequenzabhängige Netzimpedanz erfasst. Die Variation der Netzimpedanz war signifikant, hatte aber keine negativen Folgen. Mit Tests im Prosumer-Lab der BFH [1] wurde analysiert, ob Wechselrichter bei starken Spannungsüberschwingungen funktionieren. Dabei wurde festgestellt, dass Geräte erst beim deutlichen Überschreiten der Grenzwerte nach EN 50160 ausschalteten.

Ein Projektpartner hatte in einer Trafostation (TS) tagsüber stark abgeschwächte Rundsteuerpegel (RST-Pegel) festgestellt. Weitere Messungen im gesamten Netz haben bestätigt, dass dieses Verhalten im gesamten Niederspannungsnetz auftritt. 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 NS-Kabeln verursachten die beobachteten Signaldämpfungen.

Moderne Geräte mit Leistungselektronik und auch EMV-Filter können die Rundsteuerung und die Kommunikation mit G3-PLC (Powerline Communication) beeinträchtigen: Einerseits konnte eine starke Dämpfung des Kommunikationssignals durch besonders tiefe Netzimpedanzwerte bei der Kommunikationsfrequenz verursacht werden. Dadurch tritt an der entsprechenden Stelle für die Kommunikationsfrequenz beinahe ein Kurzschluss auf, wodurch das Kommunikationssignal stark absinkt und die Empfänger dieses nicht mehr detektieren können. Andererseits traten Fälle auf, in denen durch Solarwechselrichter verursachte Störpegel bei der Kommunikationsfrequenz das Kommunikationssignal derart stark überlagerten, dass eine Kommunikation nicht mehr möglich war. Umgekehrt kann auch das Kommunikationssignal selbst Geräte stören, was bei LED festgestellt wurde, die bei vorhandenem Rundsteuersignal flackerten.

Durch zahlreiche Messungen konnten kritische Punkte für die PLC-Kommunikation zwischen Smart Meter und Datenkonzentrator ausgemacht werden. Für die Netzimpedanzmessung wurde das im Projekt REMI-GATE [2] von der HES-SO weiterentwickelte Messgerät IGOR V verwendet. Kritische Punkte wurden in der Nähe von Endkunden identifiziert. An diesen Netzknoten und für den PLC-Frequenzbereich wird die Netzimpedanz mehrheitlich von der Eingangsimpedanz der Endkunden definiert. Somit entstehen starke Unterschiede von einem Endkunden zum nächsten, was eine zuverlässige Kommunikation erschweren kann. Ein PLC-Testaufbau der HES-SO ermöglicht, unterschiedliche PLC-Technologien (PLAN+, G3-PLC, PRIME, usw.) zu vergleichen und den Einfluss verschiedener Geräte auf ebendiese zu quantifizieren. Durch den standardisierten Aufbau ist die Wiederholbarkeit der Tests gewährleistet. Über einen veränderbaren Widerstand kann die Signaldämpfung zwischen Sender und Empfänger stufenlos zwischen ca. 0 dB und 90 dB eingestellt werden und diverse Betriebsmittel können zum Aufbau hinzugeschaltet werden, um deren Einfluss auf die Übertragungsqualität zu beziffern.

Inhaltsverzeichnis

1	Abstract	I
2	Management summary	II
3	Ausgangslage und Forschungsfragen	1
3.1	Ausgangslage	1
3.2	Forschungsfragen	1
4	Ergebnisse	2
4.1	Umbau der öffentlichen Beleuchtung auf LED	2
4.2	Erhöhte 15. Harmonische durch den Betrieb einer 150-kW-Wärmepumpe	3
4.3	Wechselrichter mit U- und I-Harmonischen bis zum instabilen Betrieb	4
4.4	Beeinflussung der fNI durch PV-Wechselrichter	6
4.5	Messung der fNI in Trafostationen und Verteilnkabinen	8
4.6	Wechselwirkungen zwischen Geräten	8
4.7	Gerätstabilität abhängig von der fNI und der U-Verzerrung – Normierung	11
4.8	Dämpfung des Rundsteuersignals durch PV-Anlagen.....	12
4.9	Störung von LED durch Rundsteuersignale	14
4.10	Störung der PLC-Datenübertragung in Niederspannungsnetzen.....	14
4.11	Projekt REMIGATE	15
4.12	Portables Impedanzmessgerät IGOR V.....	17
4.13	PLC-Clean-Up	18
4.14	Einfluss der Distanz und Topologie auf die PLC-Kommunikation	20
4.15	PLC-Testaufbau	24
4.16	Wärmeverluste der Netzelemente durch niederfrequente Oberschwingungen	26
4.16.1	Methoden, Versuche und Ergebnisse	26
4.16.2	Modellierungsverfahren für die systematische Ermittlung von Verlusten	27
4.17	Messung der Zählergenauigkeiten bei verzerrten Spannungen und Strömen	28
5	Empfehlungen	29
6	Zielerreichung	32
7	Ausblick	32
8	Danksagung	32
9	Glossar	33
10	Abbildungsverzeichnis	34
11	Referenzen	35
12	Versionskontrolle	37

3 Ausgangslage und Forschungsfragen

3.1 Ausgangslage

Das Arbeitspaket WP 4 trägt den Titel «Effekt der Zunahme von nichtlinearen Geräten auf die Ausbreitung von Oberschwingungen und auf die Netzimpedanz». Dabei wurde der Einfluss durch den zunehmenden Einsatz von nichtlinearen Geräten wie Solarwechselrichter und Schaltnetzteile etc. auf das Stromnetz untersucht. Schwerpunkte waren die Erzeugung und Ausbreitung von Oberschwingungen, die Veränderung der frequenzabhängigen Netzimpedanz (fNI) und die Auswirkungen auf die Rundsteuerung (Powerline Communication PLC).

Um die im Projektantrag formulierten Themen des Arbeitspakets zu analysieren, wurden gemeinsam mit den Projektpartnern verschiedene Untersuchungen definiert:

- Umbau der öffentlichen Beleuchtung auf LED
- Erhöhte 15. Harmonische durch den Betrieb einer 150-kW-Wärmepumpe
- Wechselrichter mit U- und I-Harmonischen bis zum instabilen Betrieb
- Beeinflussung der frequenzabhängigen Netzimpedanz durch PV-Wechselrichter
- Messung der fNI in Trafostationen und Verteilnkabinen
- Wechselwirkungen zwischen Geräten
- Gerätestabilität abhängig von der fNI und der U-Verzerrung – Normierung
- Dämpfung des Rundsteuersignals durch PV-Anlagen
- Störung von LED durch Rundsteuersignale
- Störung der PLC-Datenübertragung in Niederspannungsnetzen
- Portables Impedanzmessgerät IGOR V
- PLC-Clean-Up
- Einfluss der Distanz und Topologie auf die PLC-Kommunikation
- PLC-Testaufbau
- Wärmeverluste der Netzelemente durch niederfrequente Oberschwingungen
- Messung der Zählergenauigkeiten bei verzerrten Spannungen und Strömen

Die Arbeiten im Rahmen der Untersuchungen umfassten:

- Aufbau von Messinfrastruktur und Prototypen
- Messungen mit mobilen Messgeräten in Niederspannungsnetzen
- Entwickeln von Methodiken
- Analysen von Messdaten
- Testaufbauten im Labor
- Modellierungen in Netzsimulationstools

3.2 Forschungsfragen

Anhand der Untersuchungen und des Projektantrags wurden folgende Forschungsfragen definiert:

- Wie beeinflussen nichtlineare Geräte die Ausprägung der PQ-Parameter in NS-Netzen?
- Wie ist die Ausprägung der Netzimpedanz mit und ohne dezentrale Erzeugungsanlagen im Bereich von 50 Hz bis zu einigen 100 kHz?
- Wird die Rundsteuerung (Powerline Communication PLC) durch nichtlineare Geräte gestört?
- Werden Kommunikationssysteme und Geräte durch Harmonische/Supraharmonische gestört?
- Unter welchen Bedingungen führt der Einsatz von Wechselrichtern mit Stromharmonischen zum instabilen Betrieb?

Das Ziel des Arbeitspakets WP 4 war die Beantwortung der Forschungsfragen mittels der in Kapitel 3.1 beschriebenen Untersuchungen. Die Ergebnisse der Analysen in den Kapiteln 4.1 bis 4.17 geben Antworten zu den Forschungsfragen. Empfehlungen werden in Kapitel 5 abgegeben. Die Zielerreichung wird in Kapitel 6 diskutiert.

4 Ergebnisse

4.1 Umbau der öffentlichen Beleuchtung auf LED

In einem ländlichen Gemeindegebiet in einer Bergregion mit rund 2'000 Einwohnern hat Repower die öffentliche Beleuchtung (OeB) gegen Ende 2017 komplett auf LED-Technologie umgebaut. Um die Veränderungen durch diesen Umbau zu erfassen und darzustellen, wurden eine Vorher- und Nachher-Messkampagne umgesetzt. Die Vorher-Messungen fanden im Juli/August 2017 statt. In einer dreiwöchigen Messkampagne wurden Spannungsqualitätsmessungen an insgesamt 18 Messpunkten durchgeführt. Die Datenauswertung ergab keine Verletzung der nach EN 50160 definierten Grenzwerte durch die 95%-Werte. Die PQ-Parameter zeigten mit der bisherigen OeB keine Besonderheiten. Der maximal gemessene Langzeit-Flicker überstieg an allen Messpunkten den Grenzwert, was aber auf ein Ereignis auf der übergeordneten Netzebene zurückzuführen ist. Weiter wurde die frequenzabhängige Netzimpedanz im Bereich von 50 Hz bis 2.5 kHz bei ein- und ausgeschalteter OeB an ausgewählten Punkten gemessen.

Der Ersatz der öffentlichen Beleuchtung mit LED hatte keinen negativen Einfluss auf die Spannungsqualität im untersuchten Niederspannungsnetz. Die Analyse der zweiten Messkampagne von 2018 ergab, dass die Wirkleistung gegenüber den Messungen von 2017 um mindestens 50 % reduziert wurde und dass die LED-Beleuchtung weniger Verzerrungen verursachte als die zuvor installierte Beleuchtung (Quecksilberdampf-, Natriumdampf- und Leuchtstofflampen). Der Gesamtüberschwingungsgehalt des Stromes THD_i war geringer und die Amplituden der Spannungsüberschwingungen variierten weniger als zuvor, so dass die Ausreisser im Allgemeinen mehr Reserve zum Grenzwert hatten und alle Werte näher beim Median lagen. Fig. 1 zeigt eine Übersicht der PQ-Bewertung für den Messpunkt TS 3: Die roten Balken zeigen die Menge der Messdaten an, die unter den Normgrenzen der EN 50160/EN 61000-2-2 [3] [4] liegen muss. Der rote Balken plus der blaue Balken zeigen 100 % der Messwerte an.

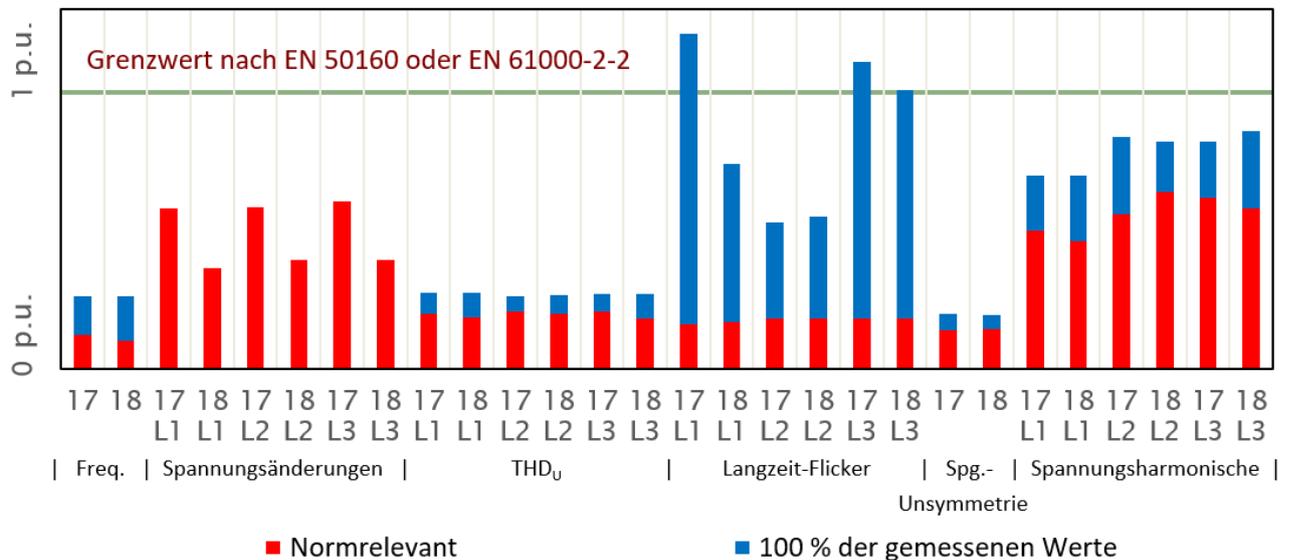


Fig. 1: PQ-Übersicht nach EN 50160/EN 61000-2-2 am Messpunkt TS 3 (2017/2018)

Die Blindleistung der Beleuchtung war vor dem Umbau induktiv. Beim Betrieb der neu installierten LED war die Blindleistung aufgrund der Kapazitäten in der Leistungselektronik der LED-Leuchten kapazitiv. Die Blindleistung während des Betriebs der Beleuchtung wurde um ca. 74 % und die Wirkleistung um ca. 68 % reduziert. Dies würde zu 57 % weniger Energiekosten und 47 % weniger Netznutzungskosten im Niederspannungsnetz führen. Die Messungen der Netzimpedanz im Bereich von 50 bis 2'500 Hz zeigten, dass weder der Umbau der Beleuchtungstechnologie noch das Umschalten zwischen den Betriebszuständen die fNI an den Messstellen wesentlich verändert hatte. Es ist wahrscheinlich, dass der Einfluss der LED-Leistungselektronik auf die fNI an den Messstellen grösser gewesen wäre, wenn die fNI direkt an den Kandelabern gemessen worden wäre. Das Kabel zwischen Messstelle und Kandelaber dämpfte jeweils den Einfluss der LED-Leistungselektronik auf die fNI.

4.2 Erhöhte 15. Harmonische durch den Betrieb einer 150-kW-Wärmepumpe

Die maximalen Pegel der Spannungsüberschwingungen sind in der EN 50160 [3] festgelegt. Der zulässige Pegel der 15. Harmonischen beträgt 0.5 % der Grundschiwingung und wird gemäss EN 50160/prA3 auf 1 % erhöht. Stromüberschwingungen werden hauptsächlich durch nichtlineare Lasten erzeugt, wie z.B. einphasige Geräte mit elektronischen Wandlern, die in Haushalten und gewerblichen Gebäuden allgegenwärtig sind [5] [6]. Kritische Werte treten vor allem in Stromnetzen mit einer hohen Anzahl oder hohen Leistung von nichtlinearen elektronischen Wandlern auf. Die Qualität der Spannung und des Stroms eines solchen Netzgebiets von ewz wurde analysiert. Im Gebiet befindet sich ein Wohngebäudekomplex, in dem die Heizwärme und das Warmwasser von zwei Wärmepumpen erzeugt werden: einer grossen, die von einem 150-kW-Inverter angetrieben wird, und einer kleinen, von einem 35-kW-Inverter angetriebenen Wärmepumpe. Während des Betriebs der grossen Wärmepumpe wurden signifikante Spannungsamplitudenänderungen der 15. Harmonischen registriert. In zwei Messkampagnen wurden sechs Netzknoten mit fünfzehn PQ-Messgeräten (PQ-Box 100/150/200, a-eberle) überwacht. Zusätzlich wurde die fNI gemessen und analysiert.

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, 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 den anderen Messstellen des Gebäudekomplexes (Trafostation, Haus 1 und Haus 2) für alle Phasen. Die niedrigsten Amplituden wurden in der Trafostation gemessen.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen im Gebäudekomplex wurde an der Verteilnische und an der Verteilkabine, die über lange Kabel mit der Trafostation verbunden sind, ein anderes Verhalten der drei Phasen festgestellt. Der Oberwellenpegel der 15. Spannungsharmonischen an beiden entfernten Punkten war auf L2 und L3 höher, wenn nur die kleine oder keine Wärmepumpe in Betrieb war. Für jeden Messpunkt sind die Spannungspegel der drei Phasen in Fig. 2 für die folgenden drei Betriebszustände dargestellt:

- Leistungsspitze (P_max) der grossen Wärmepumpe;
- Leistungsspitze (P_max) der kleinen Wärmepumpe;
- Beide Wärmepumpen AUS

Die Summe aller anderen Lasten im Netz führte zu einem erhöhten Spannungsniveau in der Verteilnische und in der Verteilkabine. Die Stromwinkel änderten sich für verschiedene Betriebszustände und damit auch die Winkel des Spannungsabfalls über den langen Leitungen, was die unterschiedlichen Phänomene auf den drei Phasen erklärt. Die Zusammenhänge wurden mittels der Messergebnisse und Simulationen in der Software PowerFactory verifiziert.

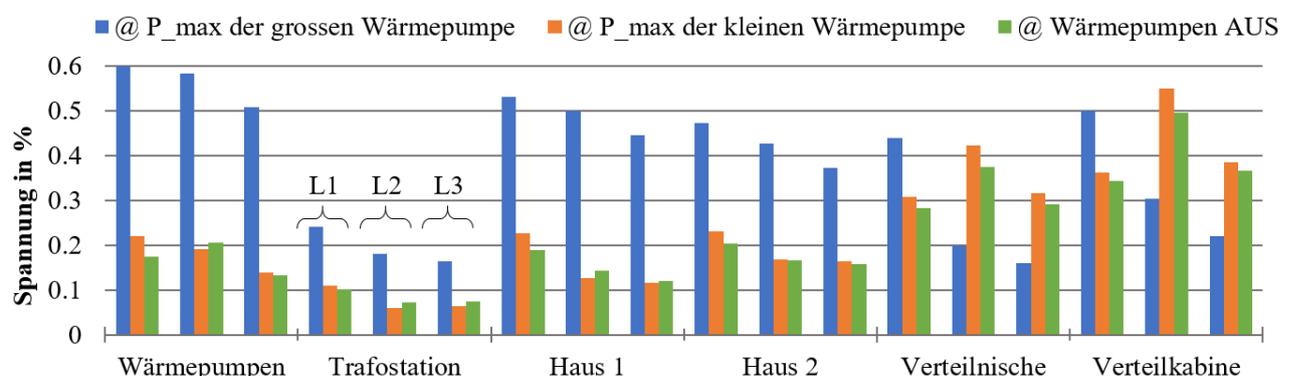


Fig. 2: Gemessene Spannungsamplituden der 15. Harmonischen für Phase L1 bis L3 bei drei verschiedenen Betriebszuständen ohne Aktivfilter

Ein Aktivfilter Ecosine Sync FN 3541 von Schaffner [7] 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 (Fig. 3). Im Neutralleiter konnte eine geringe Zunahme festgestellt werden. Insgesamt verringerten sich durch den Aktivfilter die Spannungspegel der 15. Harmonischen am Anschlusspunkt der Wärmepumpen und im gesamten Gebäudekomplex inkl. Trafostation. Auf die entfernten Netzpunkte (Verteilnische und Verteilkabine) hatte der Filter jedoch keine Auswirkung.

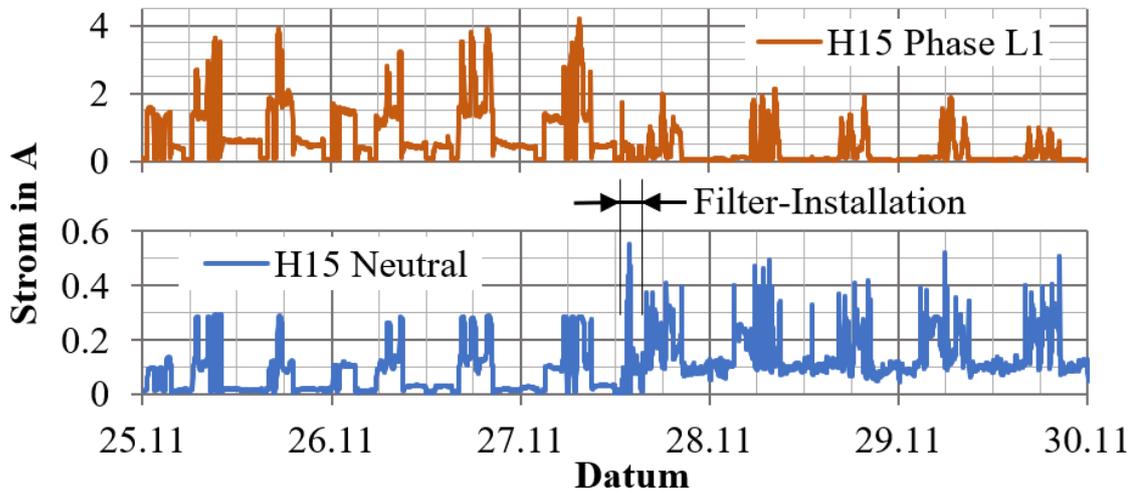


Fig. 3: Gemessener Einfluss des Aktivfilters auf die Ströme der 15. Harmonischen am Anschlusspunkt der Wärmepumpen

Die Untersuchung hat gezeigt, dass Inverter die harmonischen Spannungspegel an allen Punkten eines Verteilnetzes erheblich beeinflussen können. Kritische harmonische Amplituden werden durch Inverter mit hoher Leistung und durch die Summe vieler verschiedener nicht-idealer Lasten, die an unterschiedlichen Anschlusspunkten angeschlossen sind, verursacht. Um genaue Vorhersagen und Schlussfolgerungen zu treffen, müssen Amplituden und Winkel genau gemessen werden. Aktive Oberschwingungsfilter sind in der Lage, die von den nichtlinearen Lasten erzeugten Oberschwingungsströme zu kompensieren und das lokale Spannungsprofil zu verbessern. Wenn das Netz mehrere nichtlineare Lasten aufweist, die Stromüberschwingungen in das Netz einspeisen, ist die Korrekturwirkung eines Aktivfilters an entfernten Netzpunkten begrenzt. Um die Amplituden der untersuchten Oberschwingungen im gesamten analysierten Netz zu verringern, wäre eine aktive Filterung an allen Netzknoten, an denen relevante Oberschwingungsströme verursacht werden, erforderlich.

4.3 Wechselrichter mit U- und I-Harmonischen bis zum instabilen Betrieb

Im Prosumer-Lab der BFH wurden Versuche mit Solarwechselrichtern durchgeführt, um deren Verhalten unter nicht-idealen Bedingungen zu testen. Fünf Wechselrichter wurden betrachtet. Der Wechselrichter Typ 5 hatte die Netzeinspeisung wiederholt, ohne ersichtlichen Grund unterbrochen und wieder gestartet. Folglich konnte dieser nicht für die Bewertung berücksichtigt werden. Bei den restlichen vier Geräten (Typ 1-4) konnte trotz Veränderung der Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt und trotz verschiedenen Konstellationen des Messaufbaus nur durch eine starke vorgegebene Spannungsverzerrung (ab einem Gesamtüberschwingungsgehalt der Spannung (THD_U) > doppelter Grenzwert) ein instabiler Zustand provoziert werden. Mit der vorhandenen Laboreinrichtung, welche die Anzahl der parallel betriebenen Wechselrichter begrenzte, konnten keine ungewöhnlichen Wechselwirkungen und instabile Betriebszustände festgestellt werden.

Bei Verzerrungen von mehr als dem Doppelten des Grenzwerts des THD_U (Grenzwert = 8 %) hatte sich der erste Wechselrichter (Typ 1) vom Netz weggeschaltet. Da solche Verzerrungen in der Praxis selten oder nur über eine sehr kurze Zeitdauer auftreten, war das Verhalten der Wechselrichter Typ 2 und 3 daher vorteilhaft, da diese bei zu hoher Verzerrung anscheinend erst eine Verbesserung abwarten und sich erst abschalten, wenn diese nicht eintritt. Ausserdem kommen sie mit höheren Verzerrungen zurecht als Typ 1. Wenn viele Wechselrichter mit dem Verhalten von Typ 1 an einem Verknüpfungspunkt angeschlossen

wären, wäre es möglich, dass sich diese bei einem kurzzeitigen Sprung der Spannungsverzerrung abschalteten. Nach einer Normalisierung der Spannungsverzerrung würden diese jedoch wieder mit der Einspeisung beginnen. Der Wechselrichter Typ 4 zeigte sich bei sämtlichen Tests stabil und hielt die Einspeisung aufrecht. Speziell an diesem Wechselrichter ist, dass er nur bestimmte Oberschwingungen emittiert. Fig. 4 stellt das Oszilloskopbild des Ausschaltzeitpunktes des Wechselrichters Typ 3 dar. Die Ausschaltung erfolgte bei einer vorgegebenen Spannungsverzerrung vom Dreifachen des Grenzwerts des THD_U .

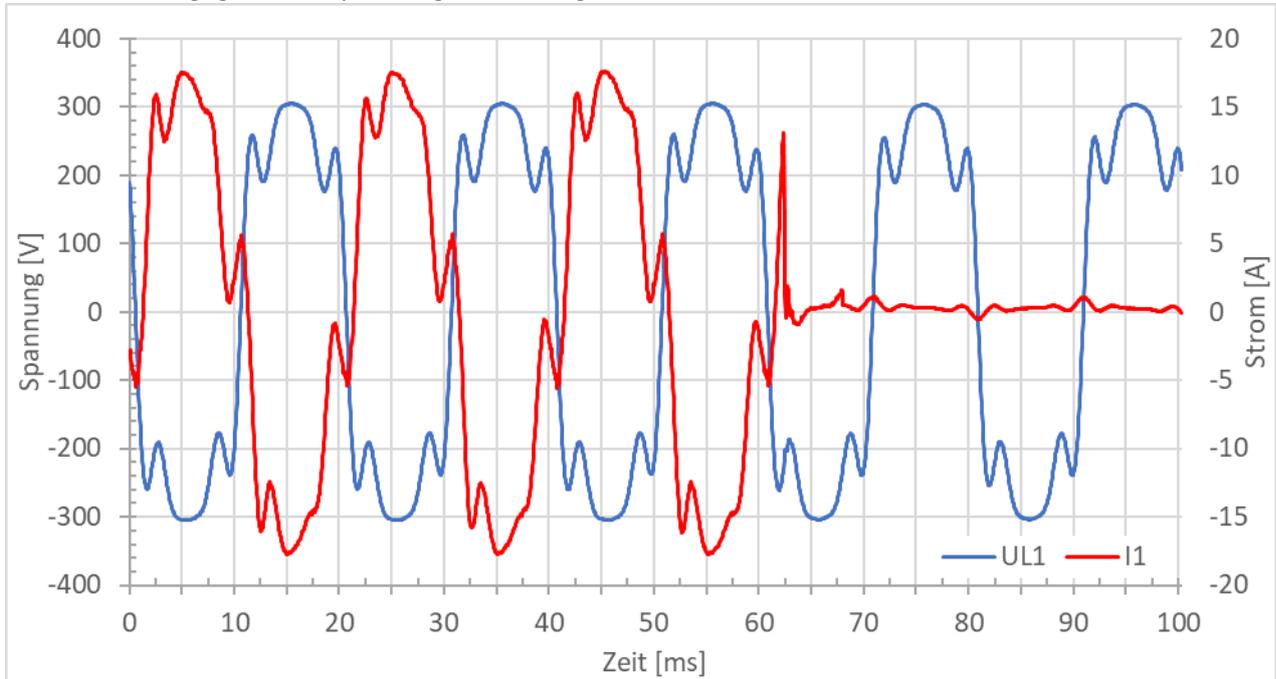


Fig. 4: Oszilloskop des Ausschaltzeitpunktes, 6000s

Da sich die Wechselrichter auch unter stark verzerrten Bedingungen als stabil erwiesen, wurden keine Empfehlungen für eine realitätsnähere Prüfung von Wechselrichtern, für die Netzplanung und für den Netzbetrieb abgeleitet.

Im Rahmen der Labormessungen wurde ein Aktivfilter Ecosine Sync FN 3541 in Betrieb genommen. Dies lässt nun den Einsatz des Filters in künftigen Laboruntersuchungen zu. Zudem konnte die benötigte Infrastruktur zum Betrieb des Filters ergänzt werden. Dazu wurde ein Hausanschlusskasten auf den Filter installiert, um die geforderte 100-A-Absicherung zu gewährleisten. Ausserdem wurden die Anschlusskabel mit Laborsteckern zur Integration in das Prosumer-Lab versehen.

4.4 Beeinflussung der fNI durch PV-Wechselrichter

Um den Einfluss der Anzahl der Solarwechselrichter auf die fNI zu analysieren, wurden zusammen mit dem Energie Service Biel/Bienne und der HES-SO Valais-Wallis Messungen an einer 2.1 MVA PV-Anlage durchgeführt. Fig. 5 und Fig. 6 zeigen Betrag und Winkel der frequenzabhängigen Netzimpedanz von 50 bis 2'500 Hz, gemessen mit dem DSA (Digitaler Spannungsanalysator). Die gestrichelten Linien zeigen die fNI-Kurven direkt auf der Niederspannungsseite der Transformatoren, während die durchgezogenen Linien die fNI-Kurven am Anschlusspunkt der Photovoltaik-Anlage (PVA) Süd darstellen.

- TS: PVA Nord 28 WR ein, PVA Süd 31 WR ein
- TS: PVA Nord 28 WR ein, PVA Süd aus
- TS: PVA Nord aus, PVA Süd aus
- PVA Nord 28 WR ein, PVA Süd 31 WR ein
- PVA Nord 28 WR ein, PVA Süd aus
- PVA Nord aus, PVA Süd aus
- PVA Nord aus, PVA Süd 1 WR ein
- PVA Nord aus, PVA Süd 2 WR ein
- PVA Nord aus, PVA Süd 4 WR ein
- PVA Nord aus, PVA Süd 8 WR ein
- PVA Nord aus, PVA Süd 16 WR ein
- PVA Nord aus, PVA Süd 31 WR ein

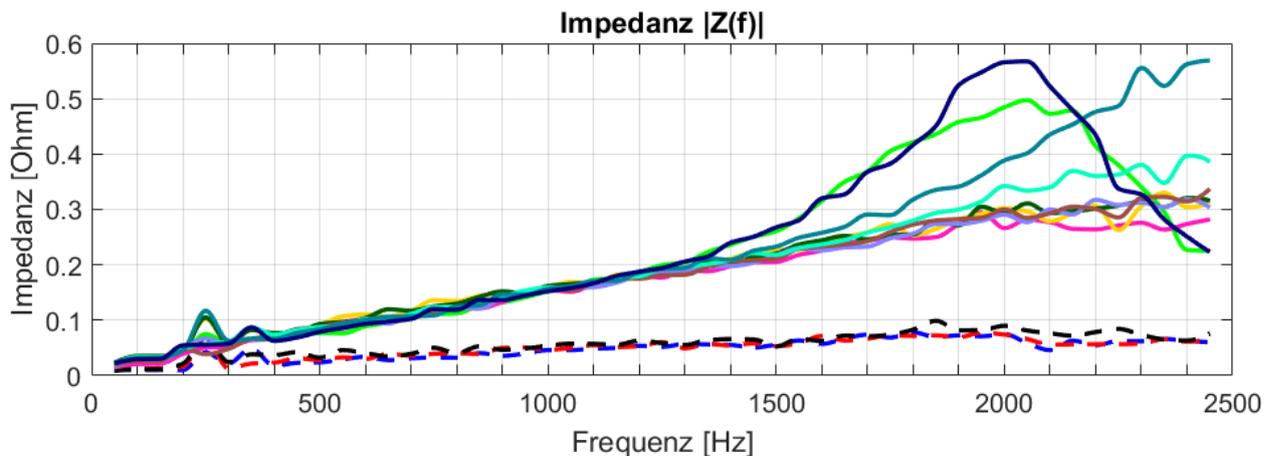


Fig. 5: Betrag der fNI, gemessen in der TS und an der PV-Anlage Süd, 50 Hz bis 2.5 kHz

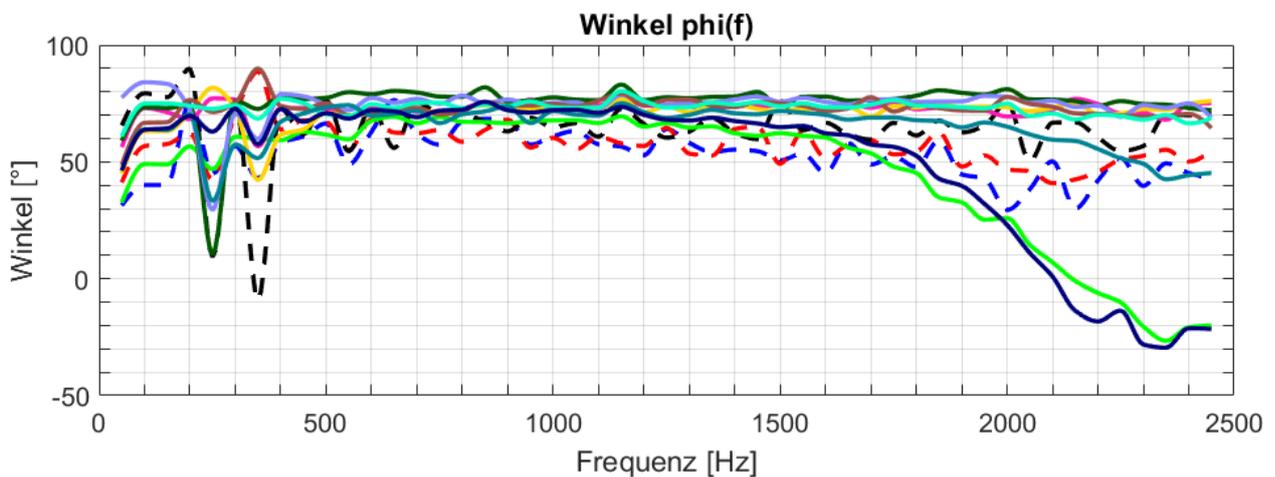


Fig. 6: Winkel der fNI, gemessen in der TS und an der PV-Anlage Süd, 50 Hz bis 2.5 kHz

Die fNI-Kurven in der Trafostation verlaufen immer ähnlich, was auf die langen Kabel zwischen den PV-Anlagen und der MS/NS-Trafostation zurückzuführen ist. Aufgrund der Leitungsimpedanz hatten die Solarwechselrichter keinen sichtbaren Einfluss auf die fNI in der TS. Da die Kabellänge zwischen den beiden PV-Systemen noch länger war, war der Einfluss der PV-Anlage Nord bei der Messung am Anschlusspunkt der PV-Anlage Süd (dunkelblaue und grüne Kurve) nicht sichtbar. Beide Kurven verlaufen fast identisch. Die Abweichungen zwischen den beiden Kurven im Bereich von 1'900 bis 2'100 Hz wurden wahrscheinlich durch leichte Dämpfung bei den Wechselrichtern an der PV-Anlage Süd verursacht.

Insgesamt 31 Wechselrichter befanden sich in der PV-Anlage Süd und wurden während den Messungen sukzessive abgeschaltet. Messungen mit dem Messgerät IGOR der HES-SO bis 200 kHz zeigten deutlich, dass sich der Resonanzpunkt der fNI mit abnehmender Anzahl der Wechselrichter in einen höheren Fre-

quenzbereich verschoben hatte (Fig. 7). Die Ergebnisse zeigten, dass die Solarwechselrichter die fNI bei einigen Frequenzen drastisch reduzierten, was theoretisch Kommunikationssignale bei diesen Frequenzen stören könnte [2]. In einigen Fällen wurde ein kapazitives Verhalten der Netzimpedanz beobachtet (negatives Vorzeichen des gemessenen Netzimpedanzwinkels, Fig. 6 und Fig. 8). Das kapazitive Verhalten oder zumindest die Reduktion des positiven (induktiven) Winkels auf 0° wurde im Frequenzbereich der Resonanzpunkte und darüber beobachtet.

Der Impedanzverlauf zeigt bei angeschlossenen Wechselrichtern eine Erhöhung der fNI gemäss dem charakteristischen Verlauf einer parallelen Resonanz, deren Amplitude und Frequenz von der Anzahl der angeschlossenen WR abhängt. Solche Resonanzen ergeben typischerweise eine Verstärkung der Spannungsharmonischen in diesem Frequenzbereich und können die Stabilitätsreserve der Stromregler der Wechselrichter reduzieren.

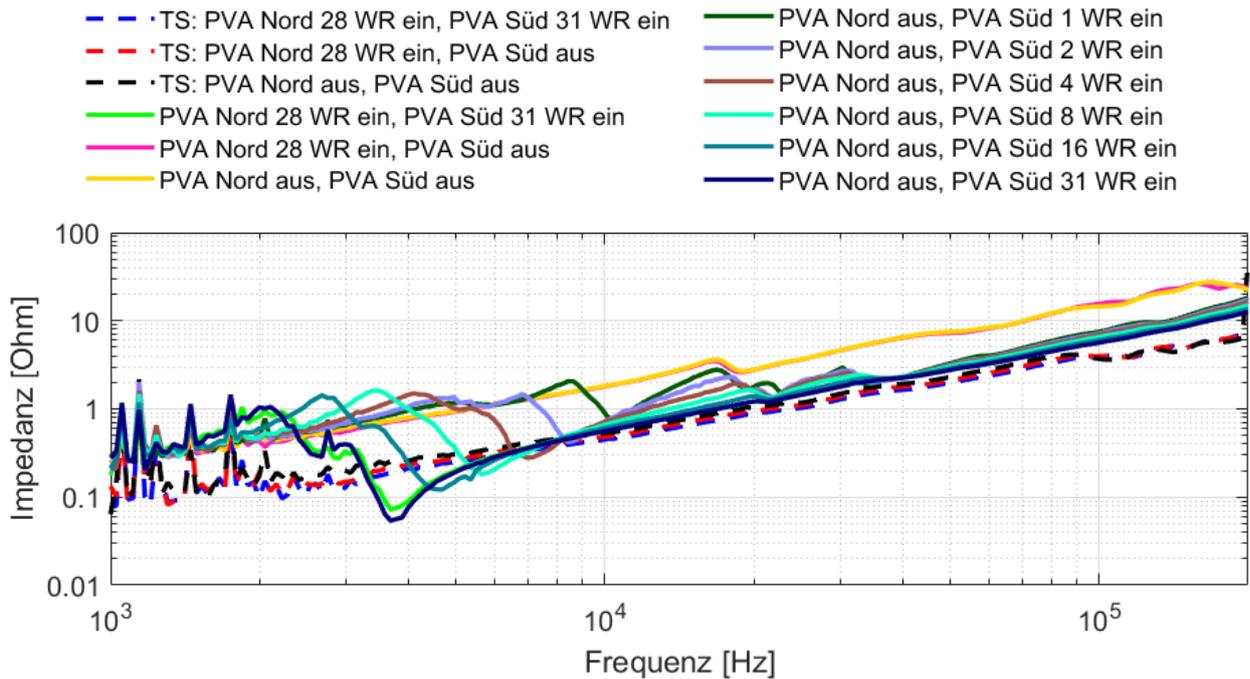


Fig. 7: Betrag der fNI, gemessen in der TS und an der PV-Anlage Süd, bis 200 kHz (Quelle: HES-SO)

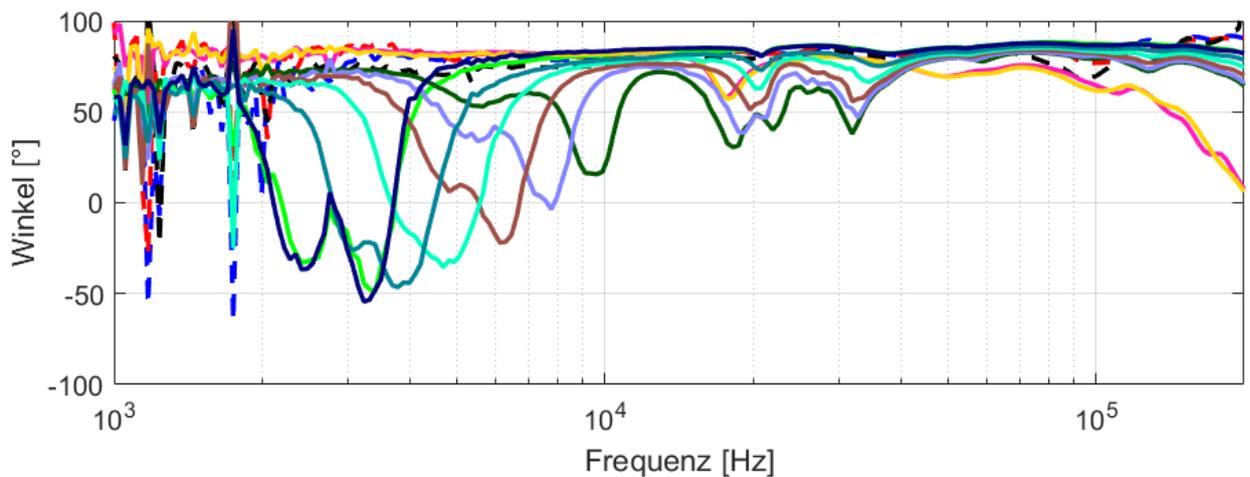


Fig. 8: Winkel der fNI, gemessen in der TS und an der PV-Anlage Süd, bis 200 kHz (Quelle: HES-SO)

4.5 Messung der fNI in Trafostationen und Verteilkabinen

Die BFH hat im Auftrag des Verbands Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE) zusammen mit der TU Dresden und der HES-SO eine Messkampagne zur frequenzabhängigen Netzimpedanz in der Schweiz organisiert. Diese und weitere Messungen der TU Dresden in Deutschland, Österreich und Tschechien zeigten deutlich, dass die frequenzabhängige Netzimpedanz in TS und VK in allen Regionen der Schweiz sowie in den untersuchten Ländern ähnliche Verläufe aufweist (Fig. 9) [8] [9].

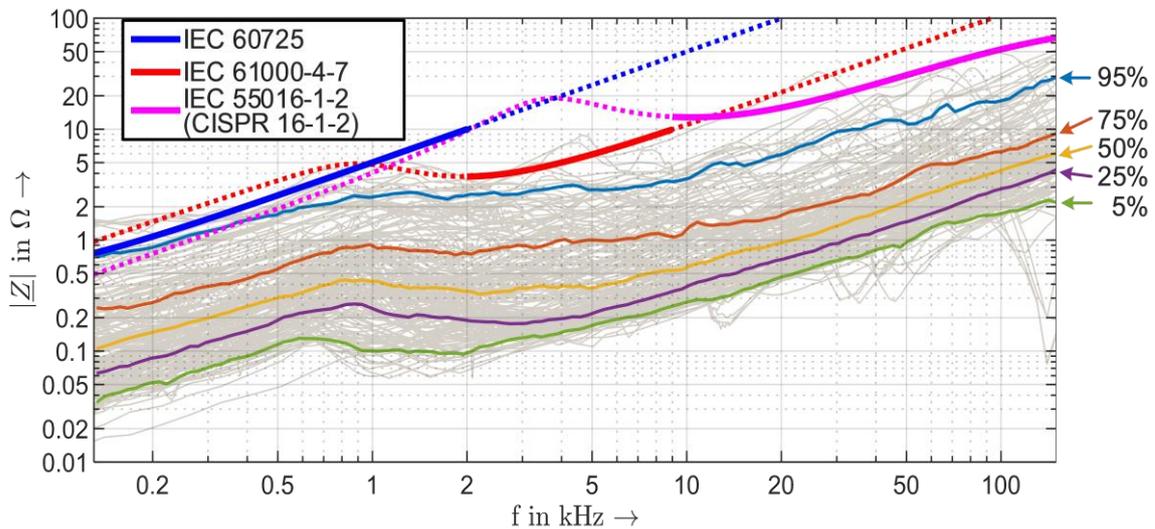


Fig. 9: Typische Verläufe der fNI (graue Kurven) in DE, CH, AUT und CZ mit Perzentil-Kurven [9]

Die wesentlichen Unterschiede 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.

4.6 Wechselwirkungen zwischen Geräten

In Zusammenarbeit mit der HES-SO wurde in einem Gewerbegebäude mit Ladeinfrastruktur und Photovoltaikanlage eine Messkampagne durchgeführt. Dabei wurden die Spannungsqualität und die harmonischen Ströme (Stromoberschwingungen) gemessen. Die Auswertung zeigte, dass die 95%-Werte des Spannungseffektivwerts, des Gesamtoberschwingungsgehalts THD_U, des Langzeit-Flickers und der Spannungsoberschwingungen die EN 50160 einhielten.

Bei den Schnellladestationen wurden hohe Stromspitzen von bis zu 1.3 A auf der 8. Harmonischen gemessen. Diese Stromspitzen sind mit grösster Wahrscheinlichkeit auf das Rundsteuersignal, welches mit einer Frequenz von 396 Hz übertragen wurde, zurückzuführen. Obwohl in diesem Netz keine Probleme mit der Übertragung des RST-Signals vorlagen, sollte bei der Planung weiterer Ladestationen auf Interferenzen mit dem Rundsteuersignal geachtet werden. Auch wenn eine Ladestation alleine das RST-Signal nicht beeinflussen mag, könnten mehrere Stationen zusammen in der Summe doch die Kommunikation beeinflussen.

Weiter wurde auf der Sammelschiene der Hauptverteilung der Anlage sowie auf einzelnen Abgängen zu verschiedenen Verbrauchern die frequenzabhängige Netzimpedanz (fNI) gemessen. Die Impedanz und deren Wirkung wurde in zwei Bereiche unterteilt: In Niederfrequenzen unterhalb von 2.5 kHz und in Hochfrequenzen oberhalb von 2.5 kHz.

Die Analyse der fNI an der Sammelschiene der Hauptverteilung zeigte für die Niederfrequenzen keine Auffälligkeiten. Die angeschlossenen Ladestationen und Photovoltaikanlage beeinflussten die Netzimpedanz im Frequenzbereich von 50 Hz bis 2.5 kHz nicht sichtbar. Der geringe Einfluss durch die Anlagen lässt sich durch die sehr nahe gelegene Trafostation (zirka 80 Meter entfernt) und die hohe Leistung des Transformators (1 MVA) erklären. Der Einfluss des Transformators auf die fNI war in diesem Fall dominant gegenüber den einzelnen Verbrauchern.

Mit Hilfe der fNI an der Sammelschiene der Hauptverteilung über den gesamten Frequenzbereich (50 Hz bis 500 kHz, Impedanzmessgerät IGOR V, Kapitel 4.12) wurde ein einfaches elektrisches Modell der Anlage erstellt. Die Zusammensetzung der gesamten Anlage mit den Abgängen zu den Schnellladestationen, zu den Ladestationen für on-board-Ladegeräte und zu den PV-Wechselrichtern wies ein Verhalten der Impedanz auf, das fast unabhängig von den angeschlossenen Lasten war (Fig. 10).

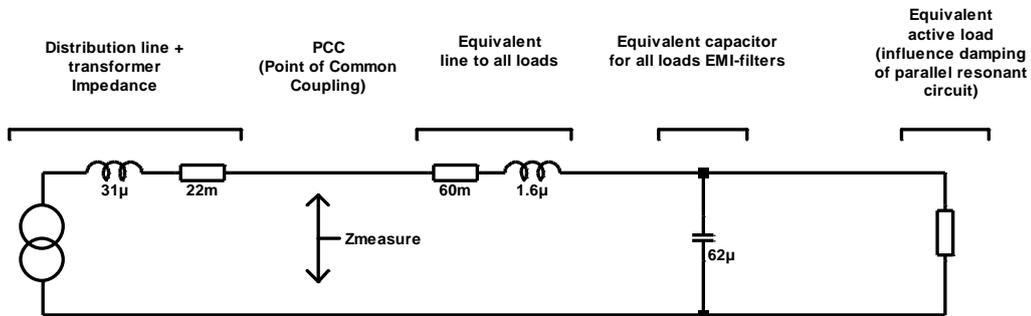


Fig. 10: Vereinfachtes elektrisches Modell der Anlage

Im unteren und mittleren Niederfrequenzbereich (50 Hz bis 2 kHz) und im oberen Hochfrequenzbereich (50 kHz bis 150 kHz) dominierte die Zuleitung zum Transformator bzw. die Abgänge zu den Lasten. Im Frequenzbereich von 2 kHz bis 50 kHz lassen sich die Resonanzstellen leicht erkennen (Fig. 11). Die Serienresonanz bei ca. 16 kHz ist auf die Induktivitäten der Abgänge zu den angeschlossenen Verbrauchern mit den EMV-Filtern zurückzuführen. Die Parallelresonanz bei ca. 3.5 kHz entstand durch die Versorgungsleitung der Trafostation in Verbindung mit den gleichen EMV-Filterkapazitäten.

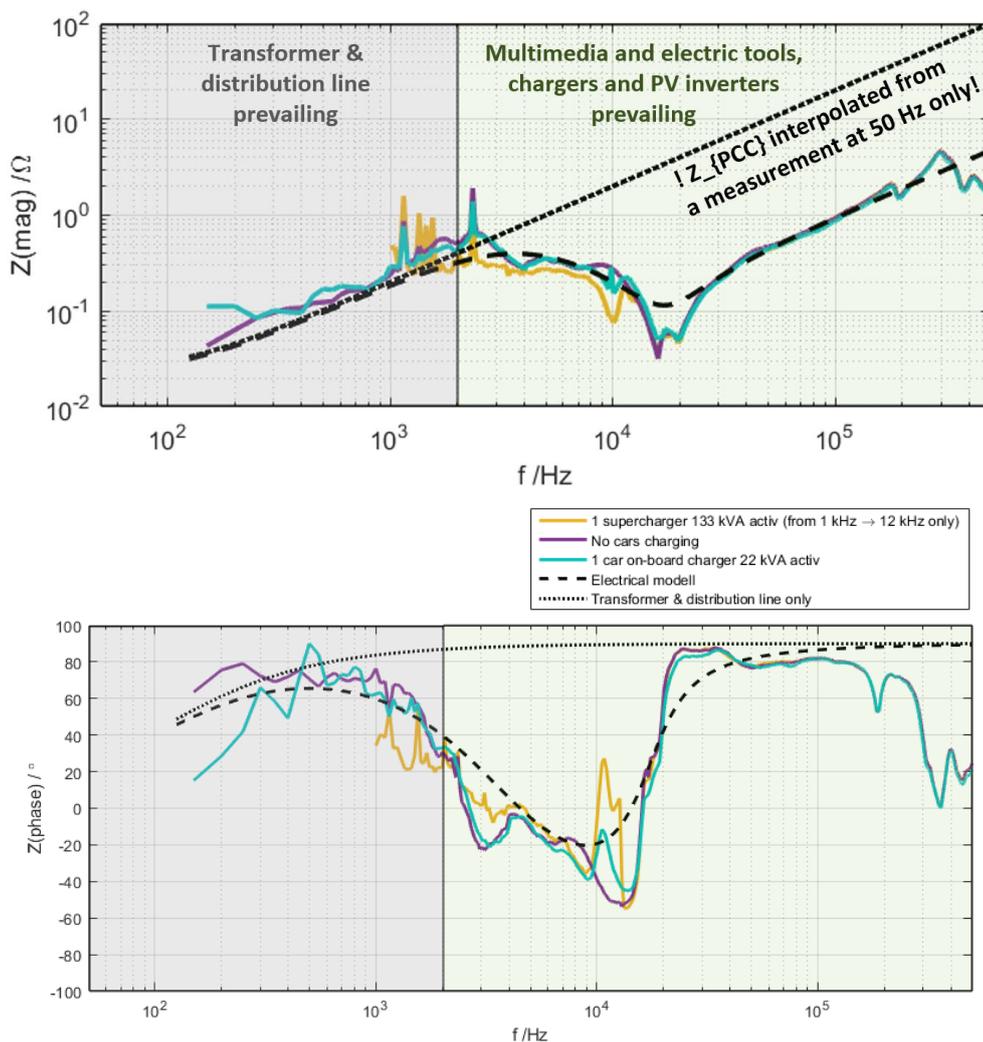


Fig. 11: Gemessener Betrag (oben) und Winkel (unten) der fNI an der Sammelschiene

Fig. 11 bekräftigt die Annahme, dass der Niederfrequenzbereich durch die Kurzschlussleistung des Transformators beeinflusst wird, während der Hochfrequenzbereich durch die EMV-Filter aller an die Haupt sammelschiene angeschlossenen Geräte beeinflusst wird. Grössere Geräte wie Ladegeräte und PV-Wechselrichter haben wahrscheinlich sogar noch mehr Einfluss als kleinere Haushaltsgeräte (insbesondere Multimedia und Computer), da Geräte, die dauerhaft an das Netz angeschlossen sind, aufgrund der fehlenden Fehlerstromschutzschaltern mit höheren Cx- und Cy-Kondensatoren ausgestattet sein können. Ab 150 kHz hingegen beeinflussen alle kleinen Haushaltsgeräte die Impedanz, da EMV-Filter mit kleineren Cx- und Cy-Kondensatoren (wegen der Fehlerstromschutzschalter) die Resonanzpunkte in den höheren Frequenzbereich verschieben. Die grösseren an die Sammelschiene angeschlossenen aktiven Lasten (z. B. Schnellladestationen) dämpfen die Parallelresonanz etwas. Dieser Effekt ist nicht weiter untersucht worden.

Die Analyse von Fig. 11 führte zu folgender Schlussfolgerung: Die von einem Wechselrichter durch PWM-Modulation erzeugten Stromüberschwingungen fliessen kaum zum Transformator, wenn die Trafostation relativ weit entfernt ist, da die Impedanz bis zur Trafostation wesentlich höher ist als die Impedanz zu anderen Geräten, die an dieselbe Sammelschiene angeschlossen sind.

Da sowohl die Stromüberschwingungen als auch die Impedanz der einzelnen Abgänge bei 8.1 kHz gemessen wurden, war ein Vergleich bei dieser Frequenz möglich. Bei dieser Frequenz konnten Stromüberschwingungen auf die Wechselrichter der PV-Anlage zurückgeführt werden, wie Langzeitmessungen gezeigt haben. Der von der PV-Anlage bezogene Strom bei 8.1 kHz floss jeweils in den Abgang mit der niedrigsten Impedanz. Fig. 12 vergleicht die Impedanz und den Strom der Abgänge. Da die Messungen in den Abgängen nacheinander durchgeführt wurden, weicht die Summe der Ströme aller Abgänge etwas vom Gesamtstrom der PV-Anlage ab. Zudem ist zu berücksichtigen, dass bei der Summation der einzelnen Abgangsströme auch die Stromwinkel zu berücksichtigen sind, welche hier nicht aufgeführt sind. Fig. 12 zeigt, dass der von den PV-Wechselrichtern bezogene Strom hauptsächlich in die Büros und die Werkstatt fliesst, also dorthin, wo die Impedanz bei 8.1 kHz am niedrigsten ist.

Abgang	Impedanz, Betrag @ 8.1 kHz in Ω	Strom @ 8.1 kHz in mA
PV-Anlage (Quelle der Stromüberschwingung)	-	29
Schnellladestation (ohne ladendes Auto)	1.51	5.9
Ladestation für on-board-Ladegeräte	2.69	6.8
Trafostation, Zuleitung	1.55 (mit mathematischem Modell berechnet)	7.1 (gemessen)
Büros und Werkstatt	0.41	28

Fig. 12: Gemessene Impedanz und Ströme bei 8.1 kHz der verschiedenen Abgänge

Die durchgeführten Untersuchungen lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Die Wechselwirkungen zwischen benachbarten Gebäuden sind minimal, wenn die Versorgungsleitungen eine bestimmte minimale Länge haben. Eine sternförmige Anbindung der Gebäude an eine Trafostation oder an eine Verteilkabine dürfte aufgrund einer höheren Impedanz zwischen den benachbarten Gebäuden günstiger sein als eine Anbindung über Muffen ab einem einzelnen Stammkabel.
- Falls Störeinflüsse zu hohen Stromüberschwingungen führen würden, könnte die Leistung der EMV-Filter einzelner Geräte durch die Sättigung der Gleichtaktdrosseln reduziert werden. Dies könnte indirekt weitere Störungen verursachen, die vom betroffenen Gerät erzeugt würden.
- Beeinträchtigungen der PLC-Kommunikation können auf zwei Arten auftreten: Einerseits direkt durch emittierte Störpegel der Geräte und andererseits indirekt durch eine zu niedrige Netzimpedanz bei der PLC-Frequenz, welche zu gedämpften Kommunikationspegeln führen könnte.

4.7 Gerätestabilität abhängig von der fNI und der U-Verzerrung – Normierung

Ein Vertreter der HES-SO Valais-Wallis ist Mitglied der Working Group 8 (WG 8) des technischen Komitees IEC TC 77A der IEC. Die WG 8 ist verantwortlich für die Beschreibung der elektromagnetischen Umgebung im Zusammenhang mit Störungen in Stromversorgungsnetzen. Analysen der elektromagnetischen Interferenzphänomene in Bezug auf die Versorgungsqualität werden ausgeführt. Die Bereiche, die sich mit dem Projekt OptiQ überschneiden sind Oberschwingungen, Zwischenharmonische und Rundsteuerung/Datenübertragung. Die WG 8 beschreibt die elektromagnetische Umgebung in Bezug auf die oben genannten Phänomene, um typische Störpegel und Verträglichkeitspegel festzulegen, aus denen Emissions- und Immunitätspegel gewonnen werden können. Eine weitere Verantwortlichkeit sind neue Richtlinien für den Anschluss von Lasten, die grössere Störungen auf Frequenz bis zu 150 kHz verursachen können, an das Stromversorgungsnetz.

Während des letzten Jahres wurden drei neue Aktivitäten, die den WP-4-Zielen gut entsprechen, durchgeführt:

- Vorschlag, einen technischen Bericht über das Thema «Stabilität von Umrichtern» zu publizieren
- Überarbeitung der Norm IEC 61000-2-4
- Vorschlag für Grenzen von nichtbeabsichtigten Emissionen im Frequenzbereich von 2 bis 150 kHz

Ausgelöst wurden diese Aktivitäten durch elektromagnetische Störungen zwischen mehreren Ladegeräten für Elektrofahrzeuge, die zu einer Unterbrechung des Ladevorgangs führten [10].

Der vorgeschlagene Titel für den technischen Bericht lautet: «Description of the characteristics of networks with high penetration of power electronics equipment». Der Bericht ist beim Abschluss des Projekts OptiQ noch in Vorbereitung. Er könnte sich unter anderem mit folgenden Hauptphänomenen befassen, die sich auf die Stromqualität eines modernen Verteilnetzes mit hoher Durchdringung von leistungselektronischen Wandlern auswirken:

- Theoretische Beschreibung zur Erzeugung von Oberschwingungen, zur Ausbreitung von Oberschwingungen im Netz und zum Einfluss von Oberschwingungen auf Geräte
- Der Einfluss massiver Oberschwingungsinjektionen aufgrund einer erhöhten Anzahl leistungselektronischer Wandler und damit verbundene Messprobleme [11]
- Die Messung der frequenzabhängigen Impedanz des Stromnetzes
- Resonanzen, Modellierung und Validierung vor Ort
- Stabilitäts-/Instabilitätsprobleme mit netzgebundenen Umrichtern

Gemäss bisheriger Forschungsarbeiten und Erfahrungen mit Wechselrichtern wird die Stabilität von netzgebundenen Stromrichtern von folgenden Faktoren beeinflusst:

- **Netzimpedanz:** Die Stabilitätsreserve für den Ausgangsstromregler verringert sich in einem schwachen Netz. Die beeinflussende Netzimpedanz ist frequenzabhängig und die schlimmsten Fälle treten im Fall von Parallel-Resonanzen auf.
- **Anzahl der parallel geschalteten Umrichter:** Durch Parallelschalten von passiven Filtern wird die Resonanz in niedrigere Frequenzbereiche verschoben.
- **Spannungsoberschwingungen:** Klassische Reglertopologien oder Regler mit ungeeigneten Zeitkonstanten können Stromüberschwingungen verstärken. Instabilitäten treten auf, wenn der Pegel der Spannungsharmonischen erhöht wird.
- **Synchronisation mit dem Netz:** Die Frequenzbandbreite der Phasenregelschleife (phase-locked-loop oder PLL) ist entscheidend für die Stabilität. Im Falle einer hohen Spannungsverzerrung könnte die Synchronisation nicht mehr funktionieren.
- **Belastung im Arbeitspunkt:** Eine Änderung der Regelstrategie, wenn die Last ausgehend von der Nennleistung des Wandlers reduziert wird, kann die Stabilität beeinträchtigen.
- **EMV-Filter:** Der LCL-Ausgangfilter verfügt über eigene Resonanzfrequenzen. Resonanz kann Regelkreise in allen Fällen stören.
- **Pulsweitenmodulation (PWM) oder Vektorregelung und deren Taktfrequenz** können die Oberschwingungen, insbesondere im Neutralleiter, beeinflussen.

- Die Digitalisierung verursacht **Verzögerungen in der Vektorregelung**. Verzögerungen sind entscheidend für die Stabilität eines Reglers.

Den verschiedenen Themen und Faktoren wurde bisher keine Priorität eingeräumt. Die WG-8-Mitglieder, welche die Umrichter-Industrie vertreten, unterstützten jedoch Aktivitäten im Bereich der Messung der Netzimpedanz. Sie haben erkannt, dass die Netzimpedanz aufgrund der zunehmenden Anzahl der an das Netz angeschlossenen EMV-Filter generell verkleinert wird, wegen der Kapazität in solchen Filtern. Dies führt dazu, dass die in der Testspezifikation definierten Standard-Netzimpedanzen im Vergleich zur Realität zu hoch sind, was zu strengeren Anforderungen an die Emissionspegel für Geräte führt. Eine genaue und aktuelle Übersicht über die an realen typischen Verteilnetzen gemessene frequenzabhängige Impedanz wird als vorrangige Notwendigkeit angesehen.

Im Kapitel 4.16 wurde erwähnt, dass sich einzelne Harmonische nicht unbedingt auf die Wärmeverluste auswirken, insbesondere bei höheren Frequenzen. Wenn die Umrichter-Industrie eine Erhöhung der zulässigen einzelnen Oberwellenpegel anstrebt, erscheint jedoch eine Klärung der Auswirkungen erhöhter einzelner Spannungsüberschwingungspegel auf die Umrichter-Stabilität erforderlich.

Schliesslich führt die Parallelschaltung von Umrichtern im Allgemeinen dazu, dass die niedrigste Resonanzfrequenz in Richtung der kritischen Frequenz eines Reglers verschoben wird. Mit Hilfe einer Messung der frequenzabhängigen Netzimpedanz vor Ort könnten die Phänomene antizipiert und die Regler-Abstimmung erleichtert werden.

4.8 Dämpfung des Rundsteuersignals durch PV-Anlagen

Ein Projektpartner hatte in einer Trafostation tagsüber stark abgeschwächte Rundsteuerpegel (RST-Pegel) festgestellt. Es wurde vermutet, dass der Grund bei der Vielzahl an PV-Wechselrichtern, die in diesem NS-Netz verbaut sind, zu finden ist. Um dies zu prüfen, wurden im betroffenen Trafokreis in der Trafostation, in zwei Verteilnkabinen und bei drei PV-Anlagen mit insgesamt 15 Wechselrichtern die RST-Pegel während zwei Wochen mit PQ-Messgeräten erfasst. Zusätzlich erfolgten Messungen in einem benachbarten Trafokreis, der aber NS-seitig nicht mit dem ersten Trafokreis verbunden war. Im zweiten Trafokreis erfolgten Messungen in der TS, in einer Kabelkabine (KK) und bei einer PV-Anlage.

Die früheren Messungen des Netzbetreibers konnten bestätigt werden. Das Verhalten mit den tagsüber abgeschwächten RST-Pegeln trat zudem nicht nur in der TS, sondern an jedem Messpunkt auf (Fig. 13). An allen Messpunkten zeigte sich ein ähnliches Verhalten. 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. Der RST-Pegel war tagsüber wesentlich niedriger als nachts. Auffällig war auch das Verhalten an der Trafostation (TS in Fig. 13) von 00:00 bis um 05:00 Uhr. Der Pegel war merklich tiefer als an den anderen Punkten.

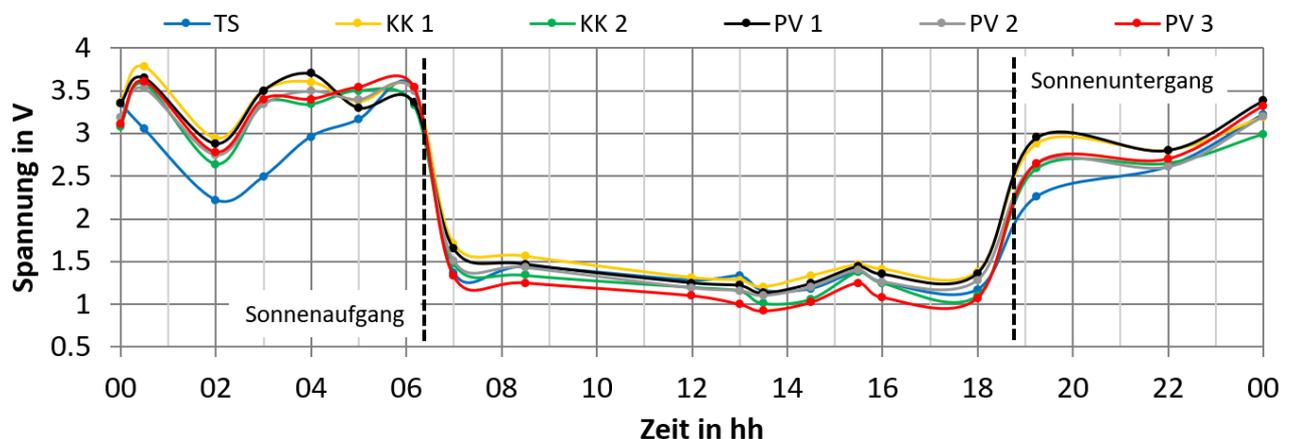


Fig. 13: Gemessener Verlauf der RST-Spannungspegel über einen Tag

Die Analyse hat ergeben, dass die Ströme an den Messstellen bei der RST-Frequenz am Tag signifikant andere Beträge aufwiesen als in der Nacht. Jedoch wurden an einigen Messstellen die Ströme tagsüber höher und an anderen Stellen niedriger. Dass die Ströme abhängig von der Tageszeit unterschiedlich wa-

ren, liegt an der frequenzabhängigen Netzimpedanz. Diese wurde an jedem Messpunkt aufgezeichnet. In Fig. 14 ist zu sehen, wie sich die frequenzabhängige Netzimpedanz am Anschlusspunkt einer PV-Anlage mit 210 kWp (14 Wechselrichter) in Abhängigkeit des Betriebszustands veränderte.

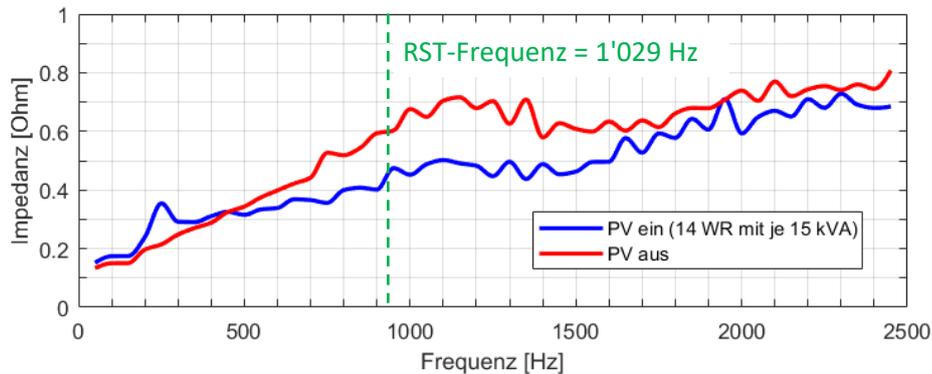


Fig. 14: Veränderung der fNI durch den Betrieb einer 210-kVA-PV-Anlage

Beim Auftreten eines Rundsteuerpegels mit 1'029 Hz ergab sich also je nach Betriebszustand der PV-Anlage ein anderer RST-Strom. Dabei variierte nicht nur der Betrag des Stromes, sondern teils auch der Winkel, der aber mit den vorhandenen Messgeräten nicht erfasst werden konnte.

Die Amplitude des Stromes bei der RST-Frequenz in die PV-Anlagen war umso höher, je mehr Solarwechselrichter installiert waren. Dies unterstreicht die Empfehlung, dass es eher vorteilhaft ist, eine kleine Anzahl von Wechselrichtern mit hoher Leistung zu installieren als eine grosse Anzahl von Wechselrichtern mit niedriger Leistung. Diese Empfehlung gilt bereits im Zusammenhang mit Netzstörungen durch Oberschwingungsströme. Simulationen mit der Software PowerFactory haben gezeigt, dass die hohen Spannungsabfälle des RST-Signals während des Tages hauptsächlich auf die dominierenden induktiven Komponenten des Transformators und der Leitungen zur PV-Anlage bei der RST-Frequenz zurückzuführen sind. Aufgrund dieser induktiven Komponenten der Impedanzen ist der Winkel des Stroms bei der RST-Frequenz von hoher Bedeutung, da er die resultierenden Knotenspannungen entscheidend beeinflusst. Dementsprechend konnte im Modell die RST-Spannungsamplitude am Anschlusspunkt der PV-Anlage 4 durch Verschieben des Stromwinkels um ca. 3 V erhöht werden (Fig. 15). Die praktischere Lösung wäre jedoch, den Strom bei der RST-Frequenz, die von den Solarwechselrichtern aufgenommen wird, zu reduzieren. In diesem Fall könnte der RST-Spannungspegel am Anschlusspunkt der PV-Anlage 4 gemäss der Simulation auf ca. 2.5 bis 3 V erhöht werden, wenn der Stromfluss in die Wechselrichter bei der RST-Frequenz eliminiert werden kann.

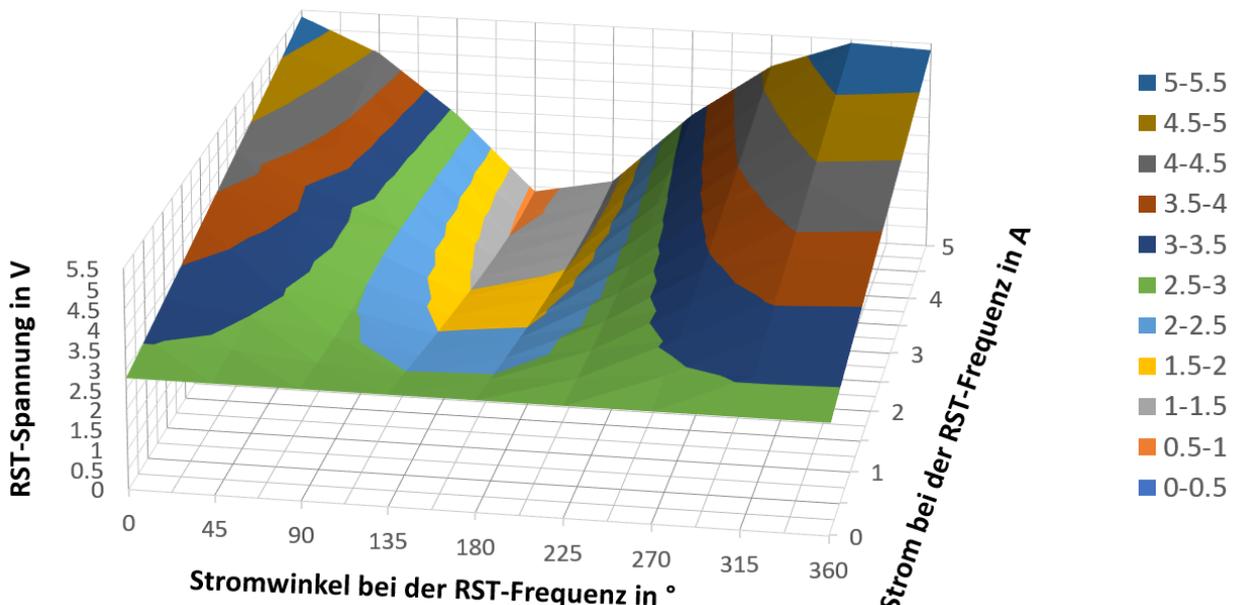


Fig. 15: Simulierter Spannungspegel bei der RST-Frequenz am Anschlusspunkt der PV-Anlage 4 in Abhängigkeit von Amplitude und Winkel des Stroms bei der RST-Frequenz

4.9 Störung von LED durch Rundsteuersignale

Um Lasten zu steuern und dem Stromzähler den Tarifwechsel zu signalisieren, wird in der Schweiz die Rundsteuertechnik eingesetzt. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass kein zusätzliches Kabel für die Kommunikation verlegt werden muss. Die Kommandos werden mit unterschiedlichen Verfahren eingekoppelt und über das bestehende Stromnetz geschickt. Da die Signale nicht nur ausgewählte Geräte erreichen, sondern im ganzen Netz vorhanden sind, können dadurch jedoch auch Geräte gestört werden. Als empfindlich haben sich dabei LED-Lampen herausgestellt. Ein Netzbetreiber war in einigen Fällen mit entsprechenden Reklamationen seitens der Kunden konfrontiert, bei denen die LED-Beleuchtung bedingt durch das Rundsteuersignal flackerte. Daraufhin hat der Netzbetreiber reagiert und mit verschiedenen Filtern versucht das Problem zu beheben. Die entsprechenden Filter funktionierten jedoch teilweise noch nicht wunschgemäss oder wurden nicht mehr produziert.

Das Flackern der LED-Lampen wurde im Labor und im Feld mittels Messungen untersucht. Dazu wurden verschiedene LED-Lampen und Dimmer-Typen eingekauft. Mit dem PQ-Simulator im Labor der BFH konnte die Rundsteuerfrequenz mit verschiedenen Frequenzen simuliert werden. Ausserdem konnten Messungen bei betroffenen Kunden durchgeführt werden. Das Projekt wurde in zwei Hauptaufgaben aufgeteilt: Das Analysieren und Untersuchen des LED-Flackerns sowie das Entwickeln eines geeigneten Filters zur Unterdrückung der Rundsteuerung.

Nach Messungen mit verschiedenen LED-Lampen und Dimmern konnte das Flackern auf die Funktionsweise des Dimmers und das Zusammenspiel von LED-Treiber und Dimmer zurückgeführt werden. Die Problematik besteht in der Erkennung des Nulldurchgangs durch den Dimmer, welcher durch die Rundsteuersignale verschoben wird. Um die Rundsteuerfrequenzen des beteiligten Netzbetreibers zu unterdrücken, wurde ein Filterprototyp berechnet, simuliert und gebaut (Fig. 16). Dieser erlaubte es, die Frequenz von 1029 Hz mit 24 dB zu dämpfen. Somit konnte diese Untersuchung aufzeigen, warum gewisse LED-Beleuchtungssysteme im Zusammenspiel mit Dimmern flackern und wie eine mögliche Gegenmassnahme mittels Filter gestaltet werden könnte.

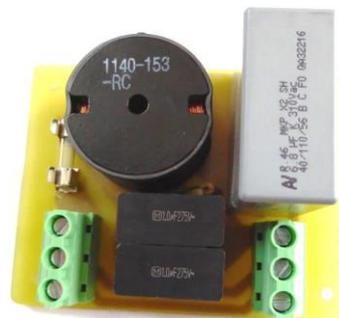


Fig. 16: Prototyp zur Filterung des Rundsteuersignals

4.10 Störung der PLC-Datenübertragung in Niederspannungsnetzen

Diese Arbeit untersuchte mögliche Störeinflüsse auf die G3-PLC-Kommunikation [12]. Mittels einer Umfrage bei Schweizer Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) konnten die praxisnahen Erfahrungen mit PLC-Systemen dokumentiert werden. Als häufigste Langzeit-Störquellen sind Schaltnetzteile und USV erwähnt. Als kurzzeitige und «selbsteheilende» Störungen werden Schaltungen (Veränderung der Netzimpedanz), Pegelabsenkungen durch Kapazitäten im Netz (Resonanz durch Filter in Wechselrichtern), Pegelabsenkungen durch Störfrequenzen und Oberwellen erwähnt. Selbsteheilend bedeutet, dass sich die Kommunikationsverbindung zu einem späteren Zeitpunkt automatisch wiederaufbaut.

Mit einer Pilotanlage wurde gezeigt, dass die Emissionen von Wechselrichtern im CENELEC-A-Frequenzband einen negativen Einfluss auf die G3-PLC-Kommunikationsverfügbarkeit haben. Die Pilotanlage zeichnete sich durch eine grosse Vielfalt an unterschiedlichen Solarmodulen und Wechselrichtern aus. Dieser Standort eignete sich gut, um den Einfluss unterschiedlicher Wechselrichter zu untersuchen. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Emissionen der Wechselrichter unterschiedlich sind. Einige Wechselrichtertypen weisen höhere Emissionen im CENELEC-A-Frequenzband auf als andere. Gewisse Wechselrichter haben die G3-PLC-Kommunikation – je nach Pegelstärke – gestört oder sogar verhindert. Die de-

zentrale Energieproduktion mit Photovoltaik-Anlagen wird gefördert, weshalb dieser Problematik vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Des Weiteren wurden in der Arbeit mögliche Störquellen und Massnahmen zur Behebung aufgezeigt. Aus den Messerfahrungen wurde eine Prozedur entwickelt, welche die Störungssuche im Feld effizienter gestaltet.

In der Schweiz gibt es viele kleine EVU, bei denen die Störungssuche meist durch das Zählerinstallations-team erfolgt. Das Wissen im Bereich Powerline Communication ist dort meist begrenzt. Es besteht die Möglichkeit, den «Clean-up-Prozess» durch eine externe Firma mit Spezialisten durchführen zu lassen. In grösseren EVU ist meist ein Spezialist vorhanden, der sich mit der Störungssuche befassen kann.

Um eine Störungssuche effizient und optimal zu gestalten, stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Typischerweise wird vom Feldtechniker eine Erstanalyse durchgeführt. Dazu eignet sich die Messung mit dem Swemet MFA500 oder einem ähnlichen Messgerät, das die Pegel im Frequenzbereich visualisiert und einfach zu bedienen ist. Es gibt schnell einen Überblick über die vorhandenen Rauschpegel und Bereiche, in denen der Spannungspegel das PLC-Signal überlagert. Ein Spezialist kann mittels der Aufnahme auf mögliche Gerätetypen schliessen, die dann ausfindig gemacht werden sollen. In den Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass PQ-Ereignisse im Bereich der EN 50160 keinen Einfluss auf die Funktionalität des G3-PLC haben. Somit ist die PQ-Messung nach EN 50160 für die Störungssuche keine Hilfe. In dieser Arbeit wurden die in Fig. 17 ersichtlichen Geräte zur PLC-Störungsanalyse eingesetzt. Nebst dem Spektrum und den G3-PLC-Protokollen kann dabei die an den jeweiligen Messpunkten gemessene Netzimpedanz entscheidende Hinweise zur Findung von Störungen liefern.

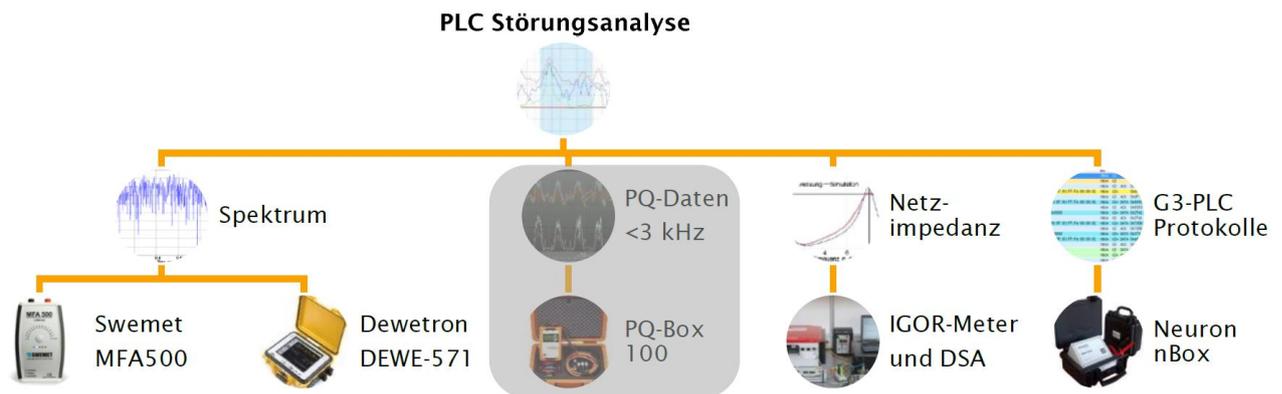


Fig. 17: Messgrößen und mögliche Messgeräte für die Störungsanalyse (Quelle: [12])

4.11 Projekt REMIGATE

Das Forschungsprojekt REMIGATE hatte das Ziel, den Einfluss verteilter Energieproduktion auf die Powerline-Kommunikation zu untersuchen. Um die Interferenzen zwischen PLC-Signal und leistungselektronischen Geräten sichtbar zu machen, wurden neue Messgeräte und Messmethoden entwickelt. Diese erlauben ebenfalls die Charakterisierung des Niederspannungsnetzes als Kommunikationskanal. Drei wichtige Elemente konnten identifiziert werden:

- Access Impedance → Netzimpedanz am Einspeisepunkt des Senders
- Grid Transfer Function → Übertragungsfunktion des Netzabschnitts zwischen Sender und Empfänger
- Noise → Non intentional emissions (unbeabsichtigte/unerwünschte Emissionen) in der Nähe des Empfängers

In diesem Zusammenhang wurde unter anderem der Einfluss dezentraler Produktion, welche über leistungselektronische Geräte an das Niederspannungsnetz angeschlossen wird, auf diese drei Elemente untersucht (Fig. 18).

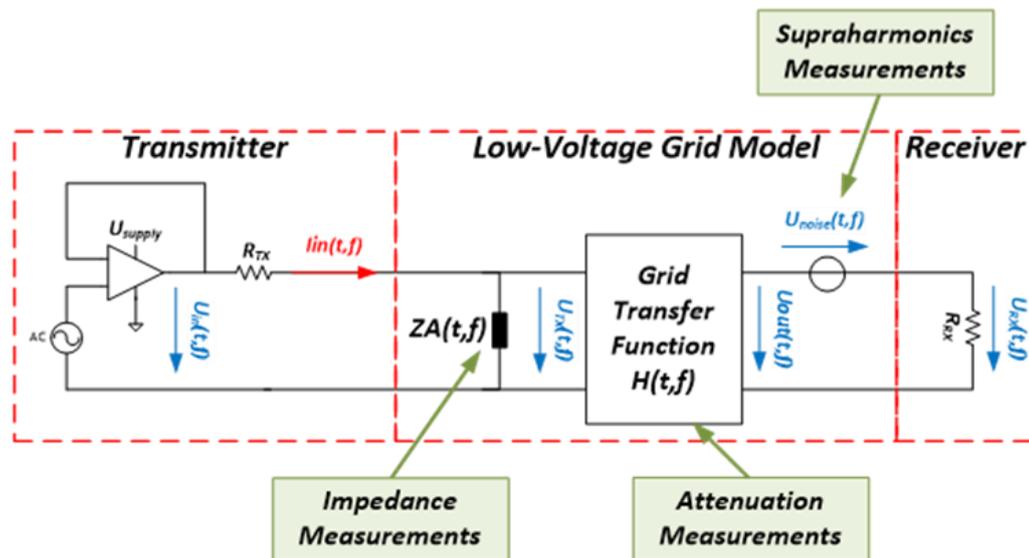


Fig. 18: Vereinf. Schema eines Powerline-Kommunikationskanals zwischen Sender und Empfänger

Weiter konnten durch zahlreiche Messungen kritische Punkte für die Powerline-Kommunikation zwischen Smart Meter und Datenkonzentrator ausgemacht werden. Diese sind in Fig. 19 ersichtlich. Der kritische Punkt wurde in der Nähe von Endkunden identifiziert. An diesem Punkt des Netzes und für den PLC-Frequenzbereich wird die Netzimpedanz mehrheitlich von der Eingangsimpedanz dieser Verbraucher definiert. Somit entstehen starke Unterschiede von einem Verbraucher zum nächsten, was eine zuverlässige Kommunikation erschwert.

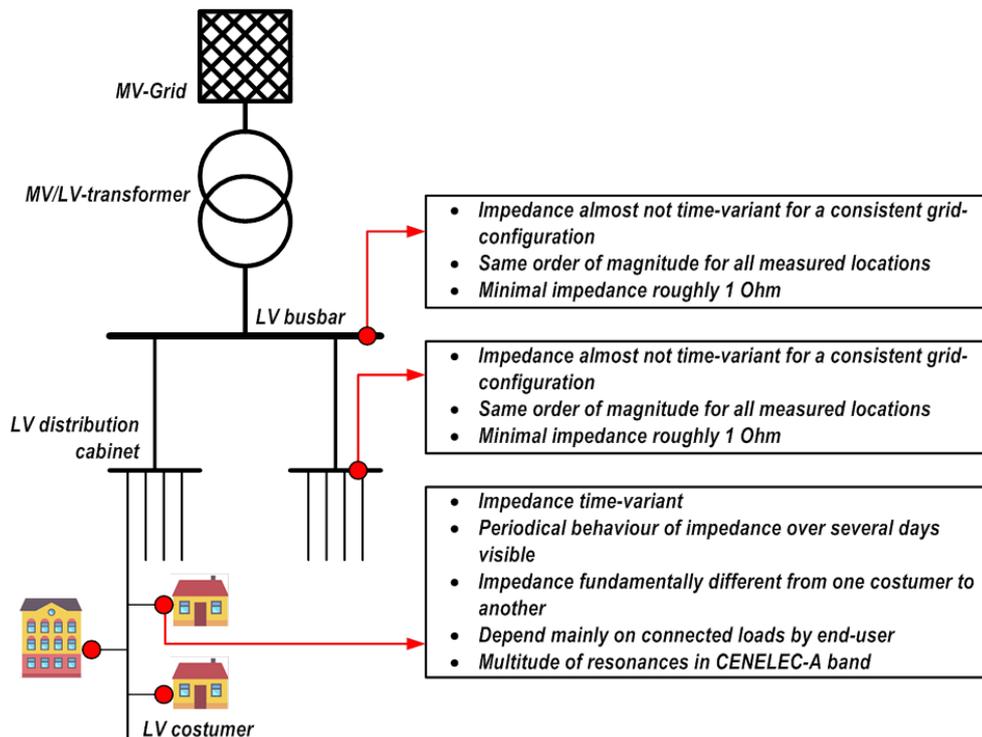


Fig. 19: Erkenntnisse der Impedanzmessungen im PLC-Frequenzbereich an diversen Netzpunkten

4.12 Portables Impedanzmessgerät IGOR V

Im Projekt REMIGATE wurde das Impedanzmessgerät IGOR der HES-SO laufend an die neuen Anforderungen angepasst und weiterentwickelt. Aktuell ist die fünfte Version im Einsatz (Fig. 20). Diese beinhaltet eine eigens entwickelte Signalverarbeitungseinheit (HiRADDa) basierend auf einem High-End FPGA und einem verbrauchsarmen Signalverstärker um den Teststrom zu erzeugen sowie eine Batterie um das Messgerät portabel und unabhängig vom Stromnetz zu machen. All diese Komponenten wurden in einem Standard-19-Zoll-Gehäuse untergebracht.

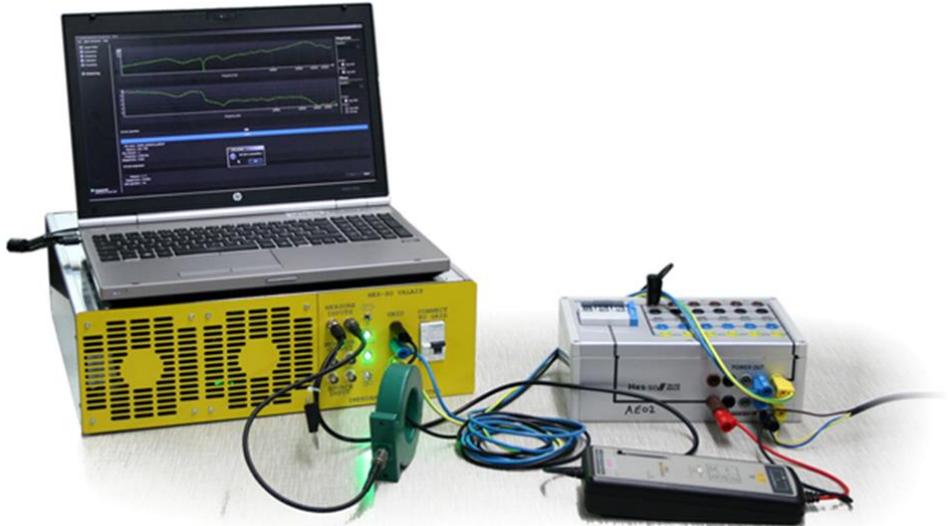


Fig. 20: IGOR-V-Gehäuse mit integrierter Energieversorgung und ext. Strom- und Spannungssonden

Die neueste Version hat folgende Charakteristik:

- Frequenzbereich: 1 kHz bis 500 kHz
- Messstrom: 200 mA
- Laufzeit pro Batterieladung: 6 Stunden
- Gewicht: ca. 8 kg

Diese Weiterentwicklung bietet ein flexibles und portables Impedanz-Messgerät für Netzstudien im Feld.

4.13 PLC-Clean-Up

Ein Quartier mit mehreren grossen Wohnblocks wurde komplett mit Smart Metern der PLC-Technologie G3-PLC ausgestattet. In zwei dieser Wohnblocks funktionierte die Kommunikation nur ungenügend und die Smart Meter waren durch den Verteilnetzbetreiber nur beschränkt erreichbar. Nachfolgend wird die Situation in Wohnblock 4 erläutert.

Im Wohnblock Nummer 4 gibt es vier Verteilkasten, welche je zirka 20-30 Wohnungen versorgen. Jeder Abgang zu einer Wohnung ist mit einem Smart Meter ausgestattet. Der Datenkonzentrator (DC), welcher das Bindeglied zwischen den intelligenten Stromzählern und dem Verteilnetzbetreiber darstellt, befindet sich in der Trafostation. Diese ist mit einem zirka 100 Meter langen Niederspannungskabel mit dem Verteilkasten 4B verbunden. Die Situation im Wohnblock 4 ist in Fig. 21 zusammengefasst. Die Smart Meter an den Punkten 4A, 4B, 4C und 4D weisen im Durchschnitt eine Erreichbarkeit von unter 30 Prozent auf.

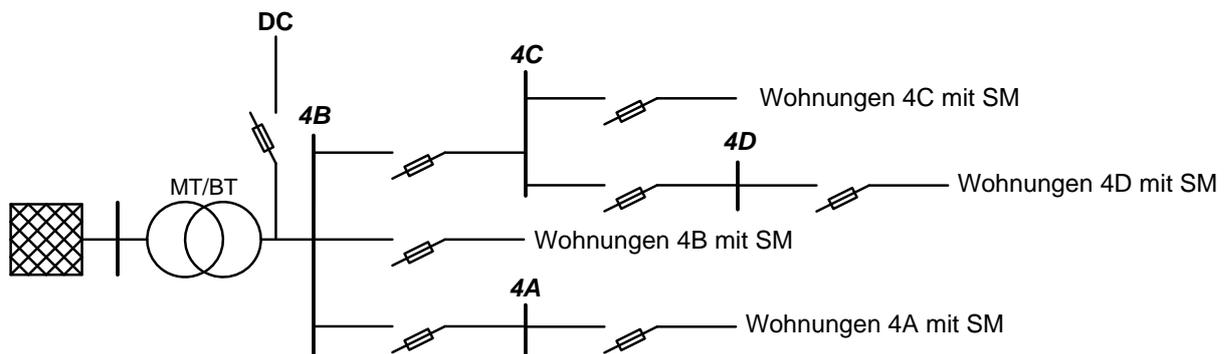


Fig. 21: Schema Wohnblock 4 mit den vier Verteilkasten 4A bis 4D

Das Vorgehen bei der Fehlersuche erfolgte nach dem folgenden Flussdiagramm (Fig. 22). Dieses basiert direkt auf den Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt REMIGATE.

Guideline for PLC Troubleshooting

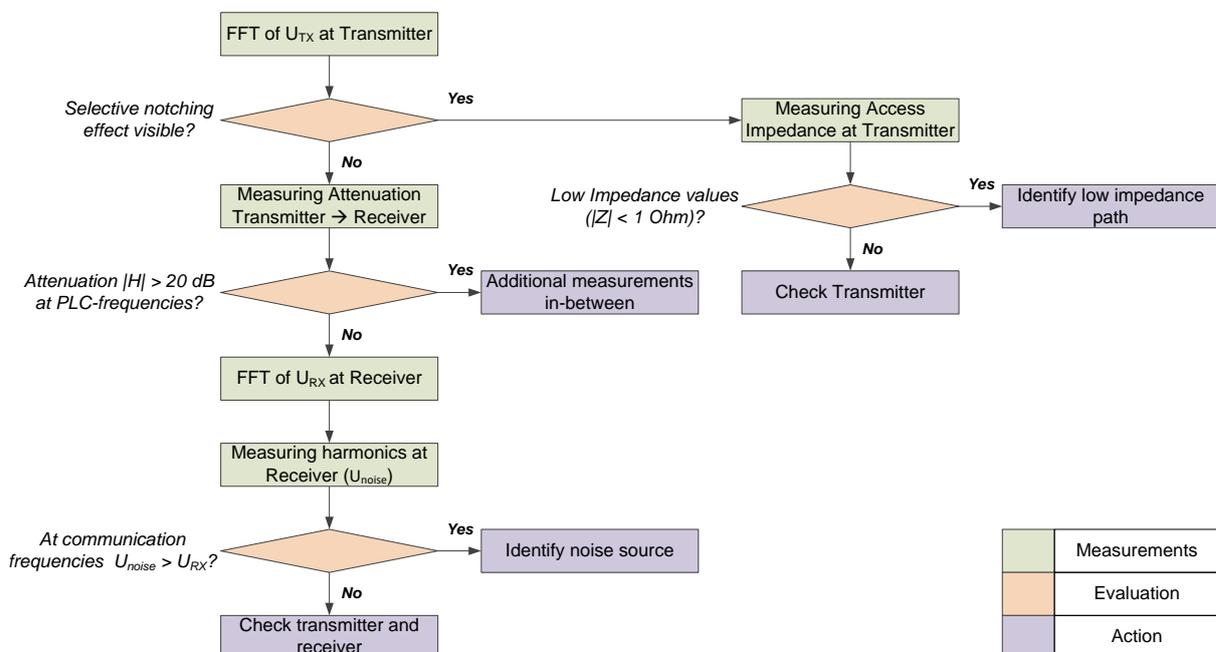


Fig. 22: Vorgehen für die Fehlersuche in einem Powerline-Kommunikationspfad

Messungen (Fig. 23) zeigten, dass die Dämpfung bereits zwischen der Trafostation und dem Verteilkasten 4B im CENELEC-A-Band fast 35 dB beträgt (Fig. 24 und Fig. 25). Dies erklärt den sehr tiefen PLC-Signalpegel, welcher an diesem Netzpunkt gemessen wurde.



Fig. 23: PLC-Clean-Up in Isaak-Anken

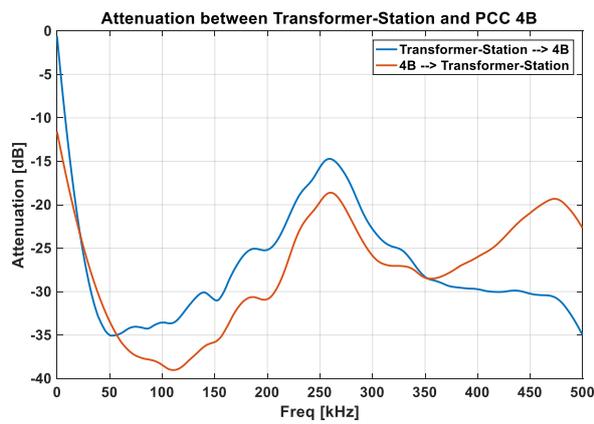


Fig. 24: Dämpfung zwischen der Trafostation und dem Netzpunkt 4B

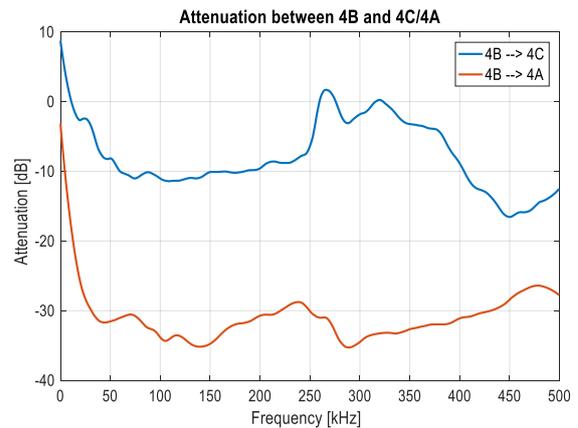


Fig. 25: Dämpfung zwischen dem Netzpunkt 4B und den Netzpunkten 4A und 4C

Weiter wurden zahlreiche Impedanzmessungen durchgeführt. Nachfolgend sind die Messungen am Netzpunkt 4B ersichtlich (Fig. 26 und Fig. 27). An diesem Verteilpunkt wurden die Impedanzen von allen Abgängen gemessen. Dies machte sichtbar, dass die Impedanz in Richtung des Transformators bis zu zehnmal höher ist, verglichen mit den anderen Abgängen. Dadurch erfährt das PLC-Signal an diesem Punkt eine zusätzliche Dämpfung bei einer Kommunikation vom Smart Meter in Richtung des Datenkonzentratoren (siehe zusätzliche Dämpfung in Fig. 24).

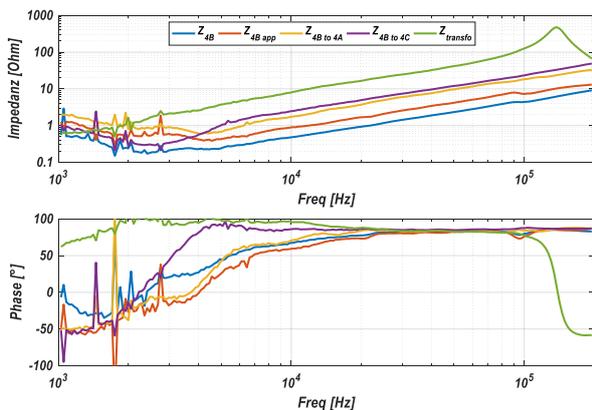


Fig. 26: Impedanz-Situation am Messpunkt 4B

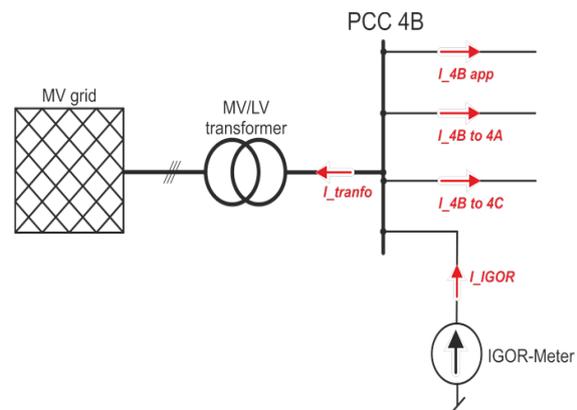


Fig. 27: Netzschema am Netzpunkt 4B mit Anschlusspunkt des IGOR-Meter

4.14 Einfluss der Distanz und Topologie auf die PLC-Kommunikation

Die HES-SO Valais-Wallis führte mit Unterstützung des Services industriels de Genève eine Messkampagne an einem Pilotstandort mit G3-PLC-Technologie durch. Eine Messkampagne und eine Analyse der Ergebnisse ermöglichten es, die Schwachstelle des PLC-Netzwerks aufzudecken und eine Lösung zur Behebung dieser Schwachstelle vorzuschlagen. Die Ausgangssituation erlaubte es, die Schwachstelle des gesamten Quartiers Nord schnell zu bestimmen, wobei die zwei intelligenten Zähler 5E und 65, die am wenigsten weit weg vom Datenkonzentrator in der MS/NS-Trafostation positioniert waren, als Repeater dienten. Die beiden Häuser, in denen die Zähler 5E und 65 installiert waren, sowie etwa acht weitere Häuser wurden von der Verteilkabine 002 versorgt. Die Verteilkabine 002 speiste zudem die Verteilkabine 001, an die auch rund zehn Häuser angeschlossen waren (Fig. 28).

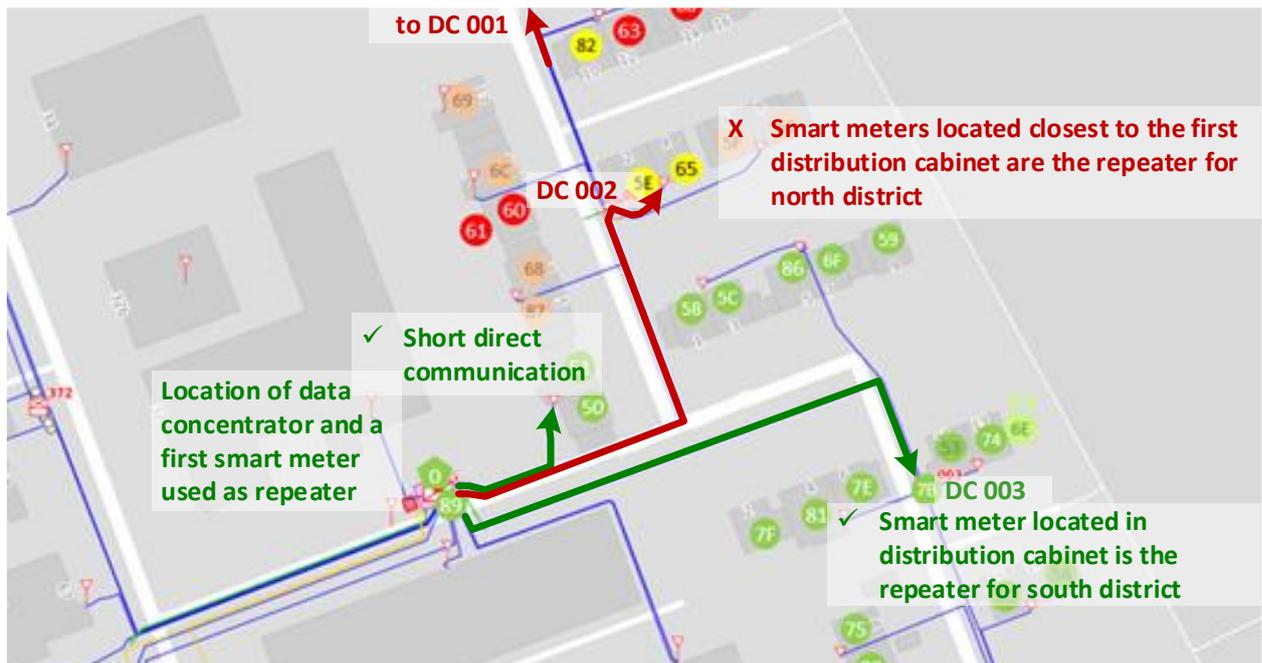


Fig. 28: Ausgangslage des G3-PLC-Piloten mit instabiler Kommunikation zum Quartier Nord

In der Verteilkabine 002 und in der Trafostation wurde die frequenzabhängige Netzimpedanz gemessen (Fig. 29).

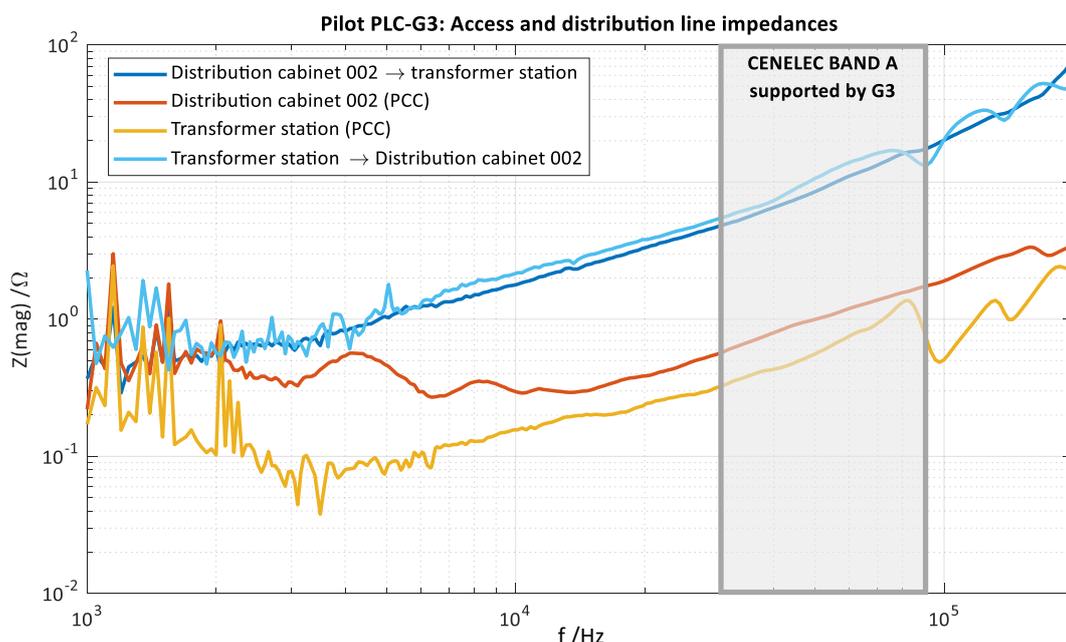


Fig. 29: Frequenzabhängige Netzimpedanz in der Trafostation und in der Verteilkabine 002

Im Frequenzband, das von der G3-PLC-Technologie genutzt wird (30 kHz bis 90 kHz) war das Verhältnis zwischen den Impedanzen am Verknüpfungspunkt (PCC) und der Verteilleitung nahezu konstant und betrug etwa 0.1. Dieses Verhältnis entspricht einer Dämpfung von mindestens 20 dB zwischen der Trafostation und der Verteilkabine, unabhängig von der Übertragungsrichtung. Zu dieser Dämpfung muss die Dämpfung der Leitungen zwischen der Verteilkabine 002 und den Zählern addiert werden. Parallel zur Impedanzmessung wurde in der Trafostation ein Paketanalysator installiert, der eine Dekodierung der von allen Zählern erzeugten Datenframes ermöglichte und den Datenverkehr eine Woche lang aufzeichnete. Bei der Nachbearbeitung der Aufzeichnungen wurden die von jedem Zähler fehlerfrei empfangenen Datenframes identifiziert. Für jeden Zähler wurde der maximale stündliche Durchschnittswert des Kommunikationspegels angegeben (Fig. 30). Die Bezeichnung SM im Schema steht für Smart Meter (Deutsch: Zähler).

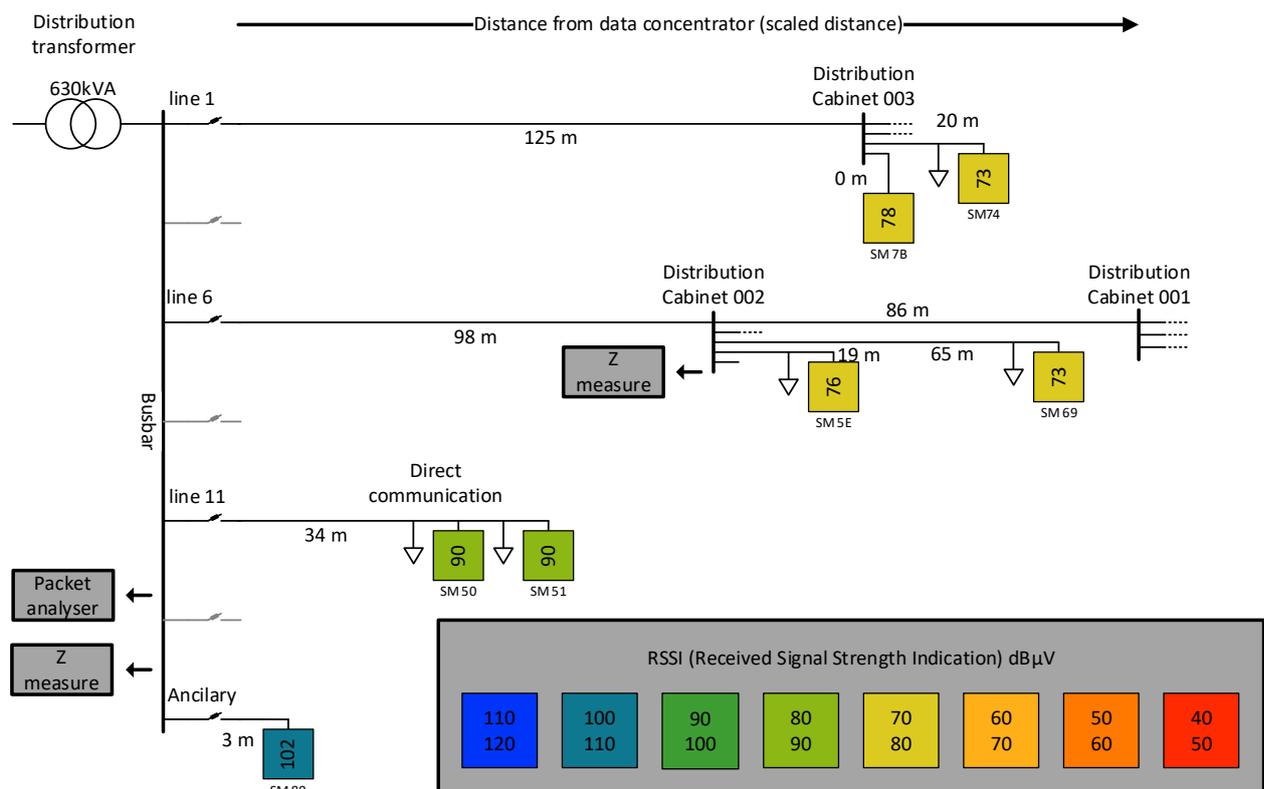


Fig. 30: Aufzeichnung der maximalen stündlichen Durchschnittspegel – Ausgangssituation

Das vereinfachte Schema aus Fig. 30 stellt die wichtigsten Punkte für die Analyse des PLC-Netzwerkes dar. Der Zähler 89, der direkt an die Trafostation mit dem Paketanalysator angeschlossen war, definierte den maximalen Übertragungspegel (102 dBµV). Die beiden Zähler 74 und 69 waren die zwei am weitesten entfernten Zähler, die noch fehlerfrei empfangbare Datenframes sendeten. Sie zeigten also den Mindestpegel an, der die Übertragung eines Datenpaketes erlaubte (73 dBµV). Noch weiter entfernte Zähler konnten keine fehlerfrei empfangbaren Datenframes aussenden. Mit einem maximalen Übertragungspegel von 76 dBµV lag der Zähler 5E, der sich am Knoten mit Kommunikationsproblemen befand, nur knapp über dem Mindestpegel, weshalb die Kommunikation manchmal unterbrochen wurde. Interessant ist, dass der in der Verteilkabine 003 installierte Zähler einen nur geringfügig besseren Pegel (78 dBµV) lieferte, die Kommunikation aber nie unterbrochen wurde.

Als Mittel zur Erhöhung des Übertragungspegels der Zähler im Quartier Nord wurde der Einbau des Repeater-Zählers 8C in der Verteilkabine 002 vorgesehen. Eine einfache Modellierung der Übertragung (nur eine Frequenz, keine Berücksichtigung der Phasenverschiebung) wurde durchgeführt, um die Verbesserung abzuschätzen, die durch diese Modifikation erreicht werden könnte. Die Ausgangssituation wurde simuliert, um die Realitätsnähe des gewählten Modells zu überprüfen (Fig. 31).

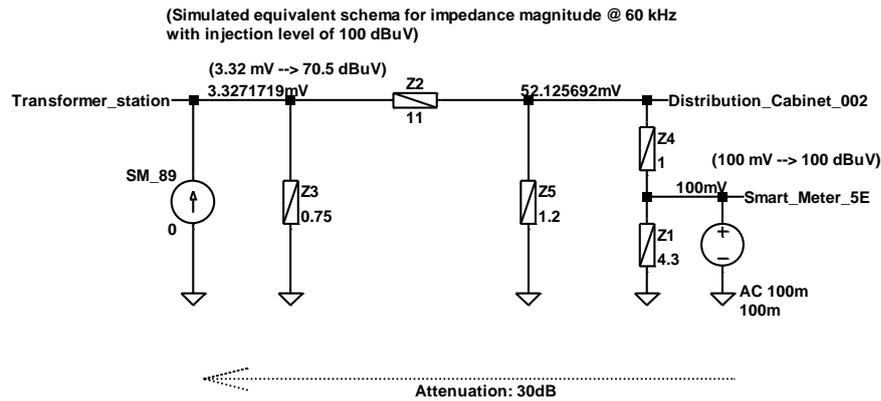


Fig. 31: Vereinfachtes Modell der Ausgangssituation bei instabiler Übertragung

In der Richtung vom Zähler zum Datenkonzentrator betrug die Dämpfung des Übertragungssignals des Zählers 5E etwa 30 dB. Dieses Ergebnis, verglichen mit der tatsächlichen Dämpfung von 26 dB, war genügend genau, um den Nutzen der Installation eines zusätzlichen Zählers in der Verteilkabine 002 abzuschätzen. Die neue Situation wurde simuliert, um zu prüfen, wie hoch die Dämpfung des Übertragungssignals des neuen Zählers in der Verteilkabine 002 in der Richtung vom Zähler zum Datenkonzentrator sein würde. Durch den Einbau des zusätzlichen Zählers ist eine Erhöhung des Übertragungspegels um 6 dB zu erwarten (Fig. 32).

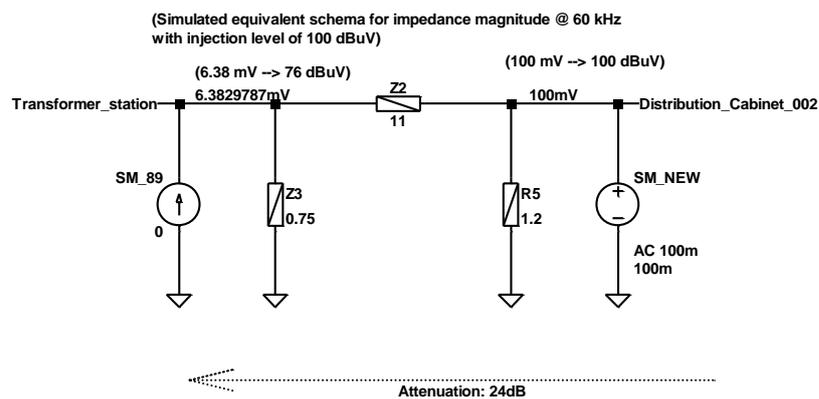


Fig. 32: Vereinfachtes Modell der Situation mit zusätzlichem Zähler in der Verteilkabine 002

Die von der HES-SO vorgeschlagene Änderung des PLC-Netzes (zusätzlicher Zähler in der Verteilkabine 002) wurde vom Netzbetreiber umgesetzt. Nach der Modifikation wurde der Paketanalysator wieder während sechs Tagen in der Trafostation installiert und die Ergebnisse wie in der Ausgangssituation betrachtet (Fig. 33).

Da der installierte Paketanalysator nicht derselbe war wie bei der ersten Messung, waren die abgelesenen Pegel alle etwas höher (2 bis 3 dB) als bei der ersten Messkampagne. Es war daher notwendig, die empfangenen Pegel der Zähler mit dem empfangenen Pegel des Zählers aus der Trafostation zu vergleichen, um die Ergebnisse vor und nach der Modifikation zu vergleichen. Die Dämpfung des Signals des kritischen Zählers 5E betrug nach der Modifikation 24 dB. Wird dieser Wert als Referenz genommen und anhand des Modells angenommen, dass die Dämpfung des Signals des Zählers 8C in der Verteilkabine 002 um 6 dB geringer ist, so ergibt die Modellrechnung eine Dämpfung von 18 dB für den Zähler 8C. Die gemessene Signaldämpfung des neuen Zählers 8C in der Verteilkabine 002 war mit 15 dB folglich sogar niedriger als die durch die vorgängige Modellierung berechnete Dämpfung. Durch diese Massnahme konnte die Kommunikation im gesamten betrachteten Gebiet sichergestellt werden.

Diese Messkampagne ergab folgende Ergebnisse:

- Die Netztopologie mit einer Leitung zwischen Trafostation und Verteilkabine sowie mehreren Abgängen ab der Verteilkabine kann die Kommunikation kritisch beeinflussen, insbesondere wenn der erste als Repeater fungierende Zähler weit von der ersten Verteilkabine entfernt ist. Für das

PLC-Frequenzband wird das vom Zähler erzeugte Signal durch die Abgänge der Verteilkabine gedämpft, und die Leitung zwischen der Verteilkabine und der Trafostation hat eine erhöhte Impedanz. Der daraus resultierende Spannungsteiler wirkt sich ungünstig auf den empfangenen Kommunikationspegel aus.

- Die Installation von Repeater-Zählern in jeder Verteilkabine ist eine einfache und leicht zu handhabende wirtschaftliche Lösung zur Erhöhung der Pegel der übertragenen Signale.
- Die Messung der frequenzabhängigen Netzimpedanz ist nicht leicht durchführbar. Eine wirtschaftliche und industrielle Alternative ist die Installation eines Paketanalysators. Die Analyse der Ergebnisse kann die Hilfe von Spezialisten erfordern, damit die Ergebnisse verständlich dargestellt werden können. Der LQI (Link Quality Indicator) wurde in diesem Bericht nicht erwähnt, obwohl er in Verbindung mit dem RSSI (Received Signal Strength Indicator) verwendet wurde, um kritische Signalwege festzulegen. In einem zweiten Schritt könnte im Falle von Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Fehlerursache die Impedanzmessung eine grosse Hilfe sein.
- Eine lediglich einmalige, kurzzeitige Messung würde es unter Umständen nicht erlauben, die Situation an einem Standort korrekt zu beschreiben. Es könnten beispielsweise falsche Schlüsse gezogen werden, falls in einem Zeitraum gemessen wird, in dem keine Kommunikationsfehler auftreten.
- Die Norm ETSI TS 103 909 [13] spezifiziert eine mittlere Dämpfung von 40 dB pro 100 Meter Verteilleitung, ohne die Impedanz am Anschlusspunkt zu erwähnen. Am oben beschriebenen Pilotstandort war die Dämpfung geringer (fast um den Faktor 10) und schon bei dieser Dämpfung war die Kommunikationsqualität schlecht. Die Abstände zwischen den verschiedenen Zählern sollten deshalb bereits in der Planungsphase überprüft und berücksichtigt werden.

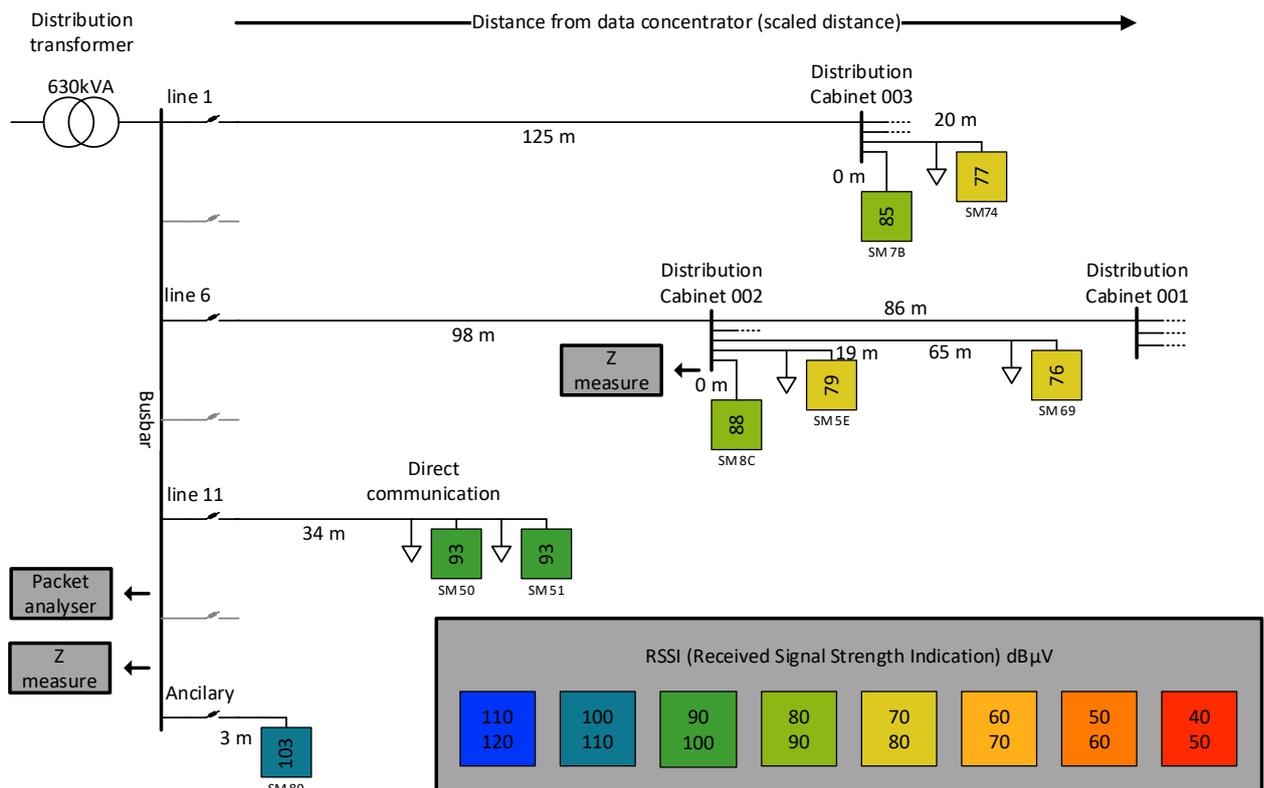


Fig. 33: Aufzeichnung der maximalen stündlichen Durchschnittspegel – Situation nach Modifikation mit Zähler 8C

4.15 PLC-Testaufbau

Der Testaufbau (Fig. 37) der HES-SO ermöglicht, unterschiedliche PLC-Technologien (PLAN+, G3-PLC, PRIME, usw.) zu vergleichen und den Einfluss verschiedener Geräte auf ebendiese zu quantifizieren. Durch den standardisierten Aufbau ist die Wiederholbarkeit der Tests gewährleistet. Über einen veränderbaren Widerstand kann die Signaldämpfung zwischen Sender und Empfänger stufenlos zwischen ca. 0 dB und 90 dB eingestellt werden. Durch eine geeignete Entkopplung vom Versorgungsnetz kann sichergestellt werden, dass das hochfrequente PLC-Signal durch VR1, sprich den veränderbaren Widerstand, fließt (Fig. 34).

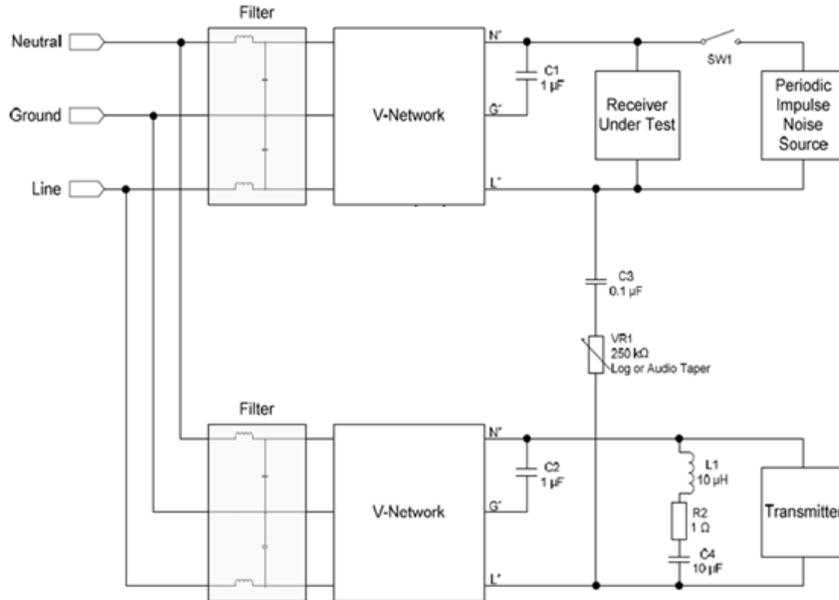


Fig. 34: Schematische Darstellung des Testaufbaus

Über den Schalter SW1 können Betriebsmittel zum Aufbau hinzugeschaltet werden, um deren Einfluss auf die Übertragungsqualität zu beziffern. Die Qualität der Kommunikation wird durch die erreichte Fehlerrate ausgedrückt. Je kleiner die Fehlerrate, desto besser und stabiler ist die Kommunikation. In Fig. 35 ist die Verschlechterung der Übertragungsqualität durch das Anschliessen eines Wechselrichters in der Nähe des Empfängers ersichtlich. Ohne angeschlossene Störquelle funktionieren beide untersuchten Technologien bis zu einer Signaldämpfung von 65 dB und mehr. Wird nun jedoch der Wechselrichter parallel zum Empfänger angeschlossen, sinkt die Schwelle für eine zuverlässige Kommunikation auf unter 10 dB, weil der WR das Kommunikationssignal durch Emissionen stört. Dies bedeutet, wenn zwischen Sender und Empfänger mehr als 10 dB Dämpfung vorliegen, ist keine Kommunikation zwischen diesen möglich.

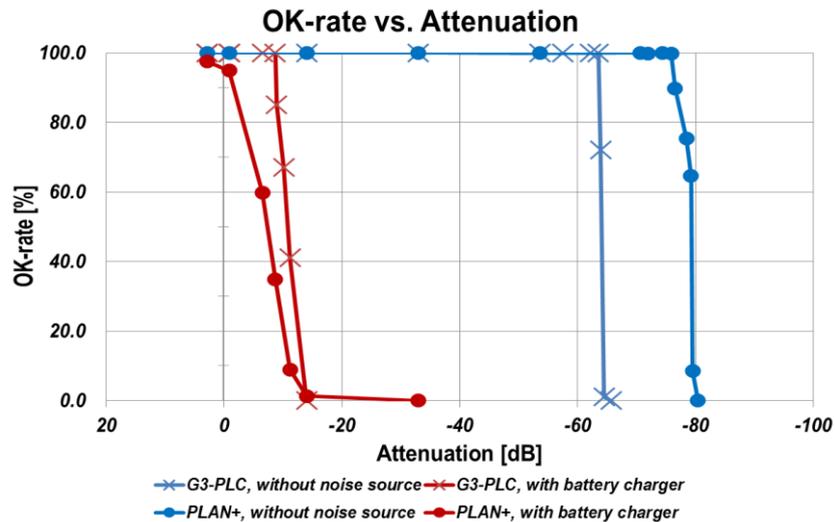


Fig. 35: Einfluss eines Wechselrichters auf zwei unterschiedliche PLC-Technologien (blau: Wechselrichter nicht angeschlossen, rot: Wechselrichter angeschlossen)

Eine ähnliche Abnahme der Kommunikationsqualität wird durch EMV-Filter provoziert. EMV-Filter werden verbaut, um leitungsgeführte Emissionen unterhalb der in den Normen definierten Grenzwerte zu halten. Somit sind solche Filter heutzutage beinahe in jedem Gerät verbaut.

In Fig. 36 ist der Einfluss eines Filters dargestellt. Es ist ersichtlich, dass durch das Filter eine Signaldämpfung von bis zu 40 dB zwischen Sender und Empfänger entsteht. Der variable Widerstand VR1 wurde für diese Messung auf 0 Ohm eingestellt, somit wurde im HF-Signalpfad keine zusätzliche Dämpfung eingestellt und die Signalabschwächung entsteht nur durch das Filter. Diese starke Dämpfung entsteht durch Resonanzstellen mit besonders tiefen Impedanzwerten der Eingangsimpedanz des Filters. Diese stellen beinahe einen Kurzschluss für die PLC-Signale dar und tragen somit nicht mehr zur Kommunikation bei.

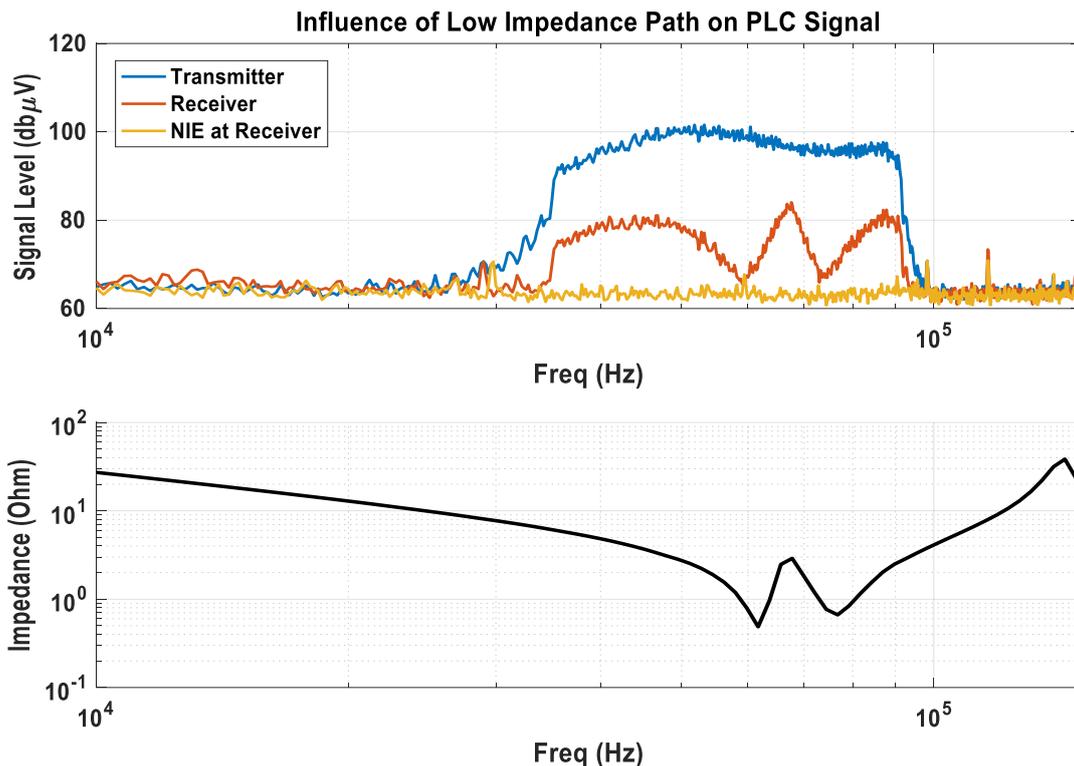


Fig. 36: Einfluss eines EMV-Filters auf das PLC-Signal und Eingangsimpedanz des Filters

Durch das obige Beispiel wird der Zusammenhang zwischen der «Eingangsimpedanz eines Geräts» und dem «Einfluss auf die PLC-Kommunikation» deutlich erkennbar.



Fig. 37: Demonstration des PLC-Testaufbaus für einen Industriepartner

4.16 Wärmeverluste der Netzelemente durch niederfrequente Oberschwingungen

Eine der wichtigsten und negativsten Auswirkungen der Verzerrung der Netzspannung ist die Erzeugung von Wärmeverlusten in Geräten, die an das Niederspannungs-Verteilnetz angeschlossen sind. Ein Teil der Verluste kann in den Netzelementen wie Leitungen, Transformatoren, Überwachungs- und Schutzgeräten auftreten. Weitere Verluste könnten in Verbraucheranlagen oder in netzgebundenen Umrichtern von verteilter Energieerzeugungs- oder Energiespeicherinfrastruktur auftreten. Obwohl diese Phänomene bekannt und erkannt sind, konnte zu diesem Thema nur sehr wenig aktuelle Dokumentation oder Messberichte gefunden werden, vor allem kaum solche, welche die Verluste quantitativ ermitteln.

Langfristiges Ziel der Forschungsgruppe EMV und Spannungsqualität an der HEVS ist die Entwicklung einer Methode zur Ermittlung der Verluste, die durch die gemeinsame Nutzung der Stromnetze von verschiedenen Verbrauchern oder Produzenten verursacht werden. Eine Bachelor-Diplomarbeit wurde in diesem Bereich im Jahr 2018 realisiert. Das Hauptziel dieses Projekts war die Abschätzung der Verluste, die wegen Oberschwingungen an Netzanlagen oder an Industrielasten auftreten können.

4.16.1 Methoden, Versuche und Ergebnisse

Die theoretischen und praktischen Forschungsarbeiten konzentrierten sich auf vier verschiedene Geräte: Zwei Dreiphasentransformatoren, ein Drehzahlwechselrichter und ein EMV-Filter. Die Untersuchungen fokussierten sich auf die 3., 5. und 7. Spannungsharmonische, für die die Norm EN 50160 die höchsten Werte zulässt, sowie auf die Spannungsharmonischen der 15. und 21. Ordnung. Gemäss einer im Rahmen des OptiQ-Projekts durchgeführten Studie verursachen bestimmte Wärmepumpentypen Oberschwingungsspannungen, die über den von der Norm festgelegten Grenzwerten liegen (bis zu 0.6 % anstelle von 0.5 % bei der 15. Spannungsharmonischen, siehe Kapitel 4.2). Darüber hinaus drängt die Umrichter-Industrie auf eine Harmonisierung der zugelassenen Niveaus verschiedener Oberschwingungen. Insbesondere sollten für harmonische Spannungen mit einer Ordnungszahl mit einem Vielfachen von 3 höhere Grenzwerte zugelassen werden. Es erscheint daher wichtig zu prüfen, ob eine signifikante Erhöhung der im Netz angetroffenen oder erlaubten Niveaus zu signifikanten zusätzlichen Verlusten in Netzelementen und angeschlossenen Geräten führen könnte.

Die betrachteten Geräte wurden in verschiedenen Konfigurationen getestet (ohne Last, mit Last usw.). Für jeden Fall wurde eine Analyse durchgeführt, um die Verluste zu bestimmen, die durch die an der Spannungsquelle eingespeisten Oberschwingungen am Gerät verursacht werden. Diese Messungen erforderten die Verwendung eines Hochleistungs-Netzsimulators zur Speisung von gezielten Spannungsüberschwingungen (3x 15 kVA TriPhase Grid Emulator). Ein Spitzenklassen-Leistungsanalysators wurde für die Ermittlung der Verluste eingesetzt (LMG 670 von Zimmer). Die erhaltenen Ergebnisse wurden immer mit denen einer digitalen Simulation verglichen.



Fig. 38: Messung der Verluste in einem Transformator Fig. 39: Messungen an einem Umrichter und EMV-Filter

Das Ergebnis der Studie war, dass kein signifikanter Anstieg der thermischen Verluste in EMV-Filtern oder leistungselektronischen Geräten aufgrund des Vorhandenseins von Spannungsüberschwingungen unterhalb des erlaubten Gesamtüberschwingungsgehalts ($THD_U < 8\%$) nachgewiesen wurde. Die Erklärung dafür ist das niederohmigen Verhalten der Netzfilter, um eine hohe Effizienz zu gewährleisten. Hohe Störströme können trotzdem wegen tiefer Impedanz bei Serienresonanz von Filtern auftreten und Verluste in anderen Komponenten verursachen, z. B. in Leitungen des Verteilnetzes.

Bei Leistungstransformatoren wurden Verluste gemessen, die keine signifikante Erhöhung der Temperatur verursachten und zu einer Wirkungsgradverminderung von weniger als 0.1 % beim maximal erlaubten Gesamtüberschwingungsgehalt der Netzspannung führten. Die aufgenommene, durch die Oberschwingungen verursachte Blindleistung (Verzerrungsblindleistung und Verschiebungsblindleistung der Harmonischen) variierte je nach Oberschwingungen, die durch die Quelle vorgegeben wurden. Bei hoher Blindleistung ist es offensichtlich, dass die Verluste der Leitungen im Verteilnetz zunehmen können, insbesondere wenn der Transformator aufgrund der hohen RMS-Spannung gesättigt ist.

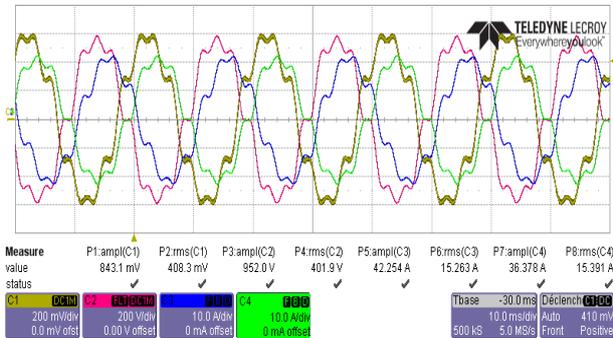


Fig. 40: Stark verzerrte Speisespannung an der Primärseite des Transformators

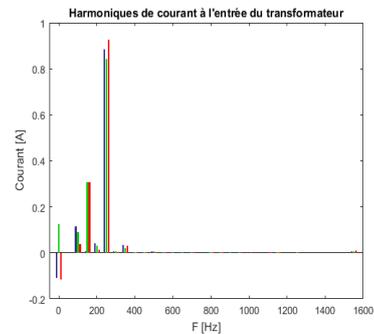


Fig. 41: Resultierende gemessene Ströme auf der Primärseite des Transformators

Das Verteilnetz kann hinsichtlich der Oberschwingungsverluste als stabil angesehen werden: Die Verluste werden durch den ohmschen Teil der Komponenten verursacht. Ein hoher Reihenwiderstand der Netzkomponenten bedeutet eine bessere Dämpfung für Schwingungen und eine Reduzierung von Oberwellen und Strom. Ein maximaler Gesamtüberschwingungsgehalt von 8 % für tiefe Frequenzen scheint ein guter Kompromiss zu sein. Die folgenden Fragen bleiben offen:

- Sollte man erhöhte Grenzwerte für einzelne Harmonische zulassen?
- Soll der festgelegte maximale Gesamtüberschwingungsgehalt auch für Oberschwingungen im Frequenzbereich von 2 bis 150 kHz gelten?
- Wie werden Verluste im Frequenzbereich von 2 bis 150 kHz überhaupt gemessen?

4.16.2 Modellierungsverfahren für die systematische Ermittlung von Verlusten

Signifikantere Verluste als in Kapitel 4.16.1 dargestellt sind, könnten in einer gesamten Installation auftreten. Ein Beispiel wäre die parallele Verbindung von Asynchronmaschinen mit spannungsverzerrenden Lasten, wie Dioden-Gleichrichtern, im Falle eines schwachen Netzes. Trotz einer relativ hohen Impedanz der Maschinen könnte eine kritische Erwärmung der Maschinen durch Oberschwingungen verursacht werden (ein Fall einer Zerstörung einer Asynchronmaschine in einer industriellen Anlage, in der ein Gesamtüberschwingungsgehalt $THD_U > 17\%$ gemessen worden ist, ist den Autoren bekannt).

Eine systematische Analyse, zum Beispiel basierend auf Simulationen, wird zur Ermittlung der Verluste nötig. Die Modellierung eines solchen Falles ist mithilfe der Netzanalysesoftware PowerFactory von DlgSILENT im quasi-dynamischen Modus möglich, wenn man eine Oberschwingungsfrequenz als Grundfrequenz einsetzt (zum Beispiel 250 Hz anstelle von 50 Hz). Dies verlangt jedoch eine sehr genaue Modellierung der Komponenten in der Maschine und der parallel angeschlossenen Umrichter im Frequenzbereich. In Bereich der tiefen Oberschwingungen reicht ein klassisches Modell des Motors aus [14]. Im hohen Frequenzbereich sind Schätzungen notwendig. Eine Modellierung von Umrichtern im Frequenzbereich ist sehr aufwendig. Hierbei kommt das Netzimpedanz-Messgerät der HES-SO zum Einsatz: Lasten oder Energiequellen können in PowerFactory mit spezifischen Impedanzwerten in Frequenzbereich modelliert werden. Es ist gelungen, eine Last mit dem Impedanz-Messgerät zu charakterisieren, die Impedanzkurve als Modell für diese Last in PowerFactory zu implementieren und Simulationen im Frequenzbereich von 150 Hz bis 2 kHz mit Frequenzstufen von 50 Hz durchzuführen. In einem nächsten Schritt wird der Prozess mit einer bekannten Asynchronmaschine durchgeführt. Falls die Simulationen mit den Messungen auf dem Prüfstand übereinstimmen werden, können die Maschinen im Frequenzbereich in einem Teilnetz zusammen eingesetzt und die Verluste im gesamten System geschätzt werden.

4.17 Messung der Zählergenauigkeiten bei verzerrten Spannungen und Strömen

Laut einer Studie der Universitäten Twente und Amsterdam weisen Smart Meter unter dem Einfluss von verzerrtem Strom grosse Ungenauigkeiten auf [15]. Um die Ergebnisse dieser Studie zu überprüfen, wurden in der Schweiz eingesetzte Energiezähler auf ihre Genauigkeit geprüft. Bei Messungen mit stark verzerrtem Strom konnte so bis zu 50 % Abweichung zum realen Wert festgestellt werden. Sowohl positive als auch negative Abweichungen kamen bei einem von sechs geprüften Smart Metern wie auch bei einem elektromechanischen Ferraris-Zähler zustande.

Die Form des Stroms während der Prüfung ist in Fig. 42 zu erkennen. Position und Breite des Stroms waren verstellbar. In der Abbildung ist die Abweichung in Abhängigkeit der Position der Stromspitze gegenüber der Spannung eingezeichnet. Dabei wurde eine schmale Stromspitze, die eine konstante Leistung ergibt, eingestellt und deren Position verändert.

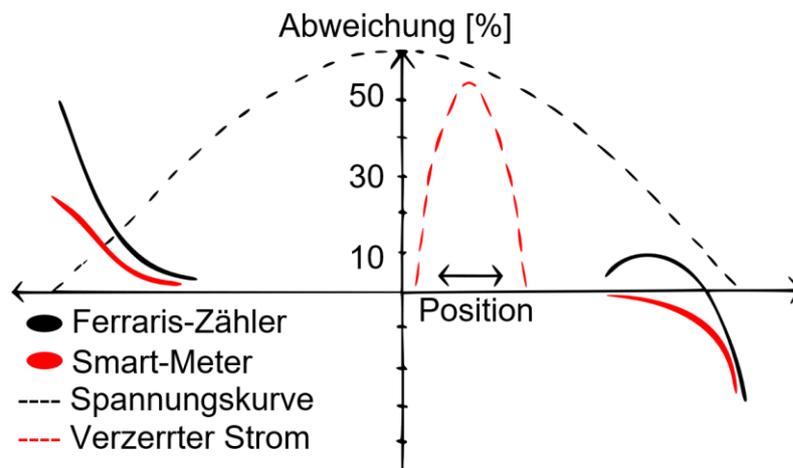


Fig. 42: Abweichungen der Energiezähler in Abhängigkeit der Position der Stromspitze

Da die getesteten Zähler unterschiedliche Abweichungen aufwiesen, kann daraus gefolgert werden, dass die Zähler die Leistung unterschiedlich erfassen, wenn Betrag und Winkel der Stromüberschwingungen verändert werden. Dies wurde mit einem CMC-Messgerät von Omicron überprüft. Dieses kann einzelne Stromüberschwingungen mit beliebigem Winkel dem Grundwellenstrom hinzufügen. Dabei wurde erkannt, dass sich der Ferraris-Zähler stark von der dritten Stromharmonischen beeinflussen lässt. Je nach Winkel führt diese Oberschwingung zu positiven oder negativen Abweichungen. Dies kann problematisch sein, da die dritte Harmonische in der Praxis häufig und mit einem hohen Anteil am Gesamtstrom auftreten kann. Beim abweichenden Smart Meter war es nicht möglich, die Abweichungen auf eine einzelne Harmonische zurückzuführen. Es ist davon auszugehen, dass ein hoher Anteil von mehreren Harmonischen diese Abweichungen bewirkt hat.

Die Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass auch einzelne der in der Schweiz verbauten Smart Meter Abweichungen bei der Erfassung der Energie aufweisen können, wenn das Stromsignal sehr stark verzerrt ist. In der Praxis dürften solche Stromverzerrungen aber nur in Ausnahmefällen auftreten, weshalb aktuell im Normalfall kaum relevante Messfehler auftreten dürften.

Ausserdem ist die Verwendung eines Ferraris-Zählers als Referenzmessung für Wirkenergie, wie dies bei der Studie in Twente durchgeführt wurde, ungeeignet. Die Gründe für die Abweichungen der Zähler wurden in der Arbeit nicht näher untersucht.

5 Empfehlungen

Wie beeinflussen nichtlineare Geräte die Ausprägung der PQ-Parameter in NS-Netzen?

- Die Untersuchung in Kapitel 4.2 hat gezeigt, dass Inverter die harmonischen Spannungspegel an allen Punkten eines Verteilnetzes erheblich beeinflussen können. Kritische harmonische Amplituden werden durch Inverter mit hoher Leistung aber genauso durch die Summe vieler verschiedener nicht-idealer Lasten, die an unterschiedlichen Anschlusspunkten angeschlossen sind, verursacht. Um mittels Simulationstools genaue Vorhersagen und Schlussfolgerungen zu treffen, müssen Amplituden und Winkel genau gemessen und im Modell hinterlegt werden.
- Aktive Oberschwingungsfilter sind in der Lage, die von den nichtlinearen Lasten erzeugten Oberschwingungsströme zu kompensieren und das lokale Spannungsprofil zu verbessern. Wenn das Netz mehrere nichtlineare Lasten aufweist, die Strom Oberschwingungen in das Netz einspeisen, ist die Korrekturwirkung eines Aktivfilters an entfernten Netzpunkten begrenzt. Um die Amplituden der Oberschwingungsspannungen im gesamten Netz zu verringern, wäre eine aktive Filterung an allen Netzknoten, an denen relevante Oberschwingungsströme verursacht werden, erforderlich. Dabei muss das Kosten/Nutzen-Verhältnis beachtet werden. Insbesondere soll geprüft/beurteilt werden, ob erhöhte Oberschwingungspegel überhaupt Beeinträchtigungen im entsprechenden Netz verursachen. Es soll vermieden werden, teure Massnahmen ohne entsprechenden Nutzen zu ergreifen.
- Der Ersatz der öffentlichen Beleuchtung mit LED hatte keinen negativen Einfluss auf die Spannungsqualität im untersuchten Niederspannungsnetz (Kapitel 4.1). Sowohl die Wirk- als auch die Blindleistung konnten gesenkt werden, was insgesamt zu niedrigeren Betriebskosten führte. Ein Ersatz von bisherigen Technologien mit LED kann deshalb aus Sicht des niedrigeren Verbrauchs empfohlen werden.

Wie ist die Ausprägung der Netzimpedanz mit und ohne dezentrale Erzeugungsanlagen im Bereich von 50 Hz bis zu einigen 100 kHz?

- Die Untersuchungen in Kapitel 4.4 haben gezeigt, dass Solarwechselrichter die Ausprägung der Netzimpedanz massgeblich beeinflussen können. Je nach Anzahl Wechselrichter wird die Impedanz im Bereich der Harmonischen (50 Hz bis 2 kHz) und der Supraharmonischen (>2 kHz) beeinflusst. Insbesondere kann die Kommunikation beeinträchtigt werden, wenn die Netzimpedanz bei der Kommunikationsfrequenz niedrig ist (Kurzschluss für das Signal). Ist von eingesetzten Geräten (z. B. auch Filter) bekannt, dass sie bei benutzten Kommunikationsfrequenzen eine niedrige Impedanz aufweisen (Kapitel 4.15), so ist von einem Einsatz abzuraten und stattdessen ein Gerät mit einem vorteilhaften Impedanzverhalten einzusetzen. In der Praxis ist diese Information jedoch meist nicht vorhanden. Hierbei können die BFH und die HES-SO mit Netzimpedanzmessungen unterstützen.
- Bei der Netzplanung ist es komplex, die frequenzabhängige Netzimpedanz an den Netzknoten vorherzusagen. Dies wäre nur dann möglich, wenn die gesamte Gerätestruktur bekannt wäre und von jedem Gerät der Verlauf der frequenzabhängigen Netzimpedanz zur Verfügung stünde. Eine solche Abschätzung könnte allenfalls durch die Wissenschaft gemacht werden (z. B. BFH und HES-SO). Für den Praktiker gibt es aktuell noch keine geeigneten Tools zur einfachen Berechnung der frequenzabhängigen Netzimpedanz an bestimmten Netzknoten.
- Selbst wenn von gewissen Geräten der Verlauf der frequenzabhängigen Eingangsimpedanz bekannt ist, so ist doch die Gesamtimpedanz an einem Netzknoten darüber hinaus von allen angeschlossenen Geräten sowie von der Netztopologie abhängig. Verallgemeinernde Aussagen sind daher in der Regel nicht möglich, sondern es muss jeder Fall einzeln betrachtet werden.
- Die Messung der Netzimpedanz empfiehlt sich immer dann, wenn Störungen von Geräten und Kommunikationssystemen auftreten. Dabei kann der Digitale Spannungsanalysator (DSA, Firma Michels) aus dem Labor der BFH oder das IGOR-Messgerät der HES-SO Valais-Wallis zum Einsatz kommen (Kapitel 4.11 und 4.12).

Wird die Rundsteuerung bzw. generell die PLC durch nichtlineare Geräte gestört?

- Mit einer Pilotanlage wurde gezeigt, dass die Emissionen von Wechselrichtern im CENELEC A-Frequenzband einen negativen Einfluss auf die G3-PLC-Kommunikationsverfügbarkeit haben können (Kapitel 4.10). Es konnte aufgezeigt werden, dass die Emissionen der Wechselrichter unterschiedlich sind und dass die Wechselrichter die G3-PLC Kommunikation – je nach Pegelstärke – stören oder gar verhindern. Auch im PLC-Testaufbau der HES-SO konnten Emissionen von WR die Kommunikation stören (Kapitel 4.15). Die dezentrale Energieproduktion mit Photovoltaik-Anlagen wird gefördert, weshalb dieser Problematik vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Aus den Messerfahrungen wurde in [12] eine Prozedur entwickelt, welche für eine effizientere Störungssuche im Feld empfohlen wird.
- In zwei NS-Netzen traten tagsüber an allen Messpunkten abgeschwächte Rundsteuer-Pegel auf (Kapitel 4.7). An allen Messpunkten zeigte sich ein ähnliches Verhalten: Der RST-Pegel war tagsüber wesentlich niedriger als nachts. Grund dafür waren die PV-Wechselrichter, in welche beim Auftreten des RST-Spannungssignals ein Strom bei der RST-Frequenz floss. Dieser Strom war in der Summe so gross, dass er über dem Transformator und den Leitungen einen Spannungsabfall bei der RST-Frequenz bewirkte. Die Amplitude des Stromes bei der RST-Frequenz in die PV-Anlagen war umso höher, je mehr Solarwechselrichter installiert waren. Dies unterstreicht die Empfehlung, dass es eher vorteilhaft ist, eine kleine Anzahl von Wechselrichtern mit hoher Leistung zu installieren als eine grosse Anzahl von Wechselrichtern mit niedriger Leistung. Diese Empfehlung gilt bereits im Zusammenhang mit Netzstörungen durch Oberschwingungsströme. Die praktischste Lösung zur Behebung dieses Problems wäre, den Strom bei der RST-Frequenz, die von den Solarwechselrichtern aufgenommen wird, zu reduzieren. Im Modell hat dies die RST-Pegel verbessert. In der Praxis konnte dies in gewissen Fällen durch die Anpassung der Reglereinstellungen der Wechselrichter erreicht werden. Diese Möglichkeit hängt aber von der Unterstützung des Wechselrichterherstellers ab und steht nicht immer zur Verfügung. Eine andere Möglichkeit wäre der Einsatz von Filtersystemen. Dieser Ansatz wurde aber nicht getestet und es sind bisher keine Standard-Lösungen bekannt.

Werden Kommunikationssysteme und Geräte durch Harmonische/Supraharmonische gestört?

- Unter dem vorherigen Punkt wurde erläutert, dass Emissionen von PV-Wechselrichtern die G3-PLC-Kommunikation stören können (siehe auch Kapitel 4.10 und 4.15).
- Ein Netzbetreiber war mit Reklamationen konfrontiert, weil LED der Kunden während dem Auftreten des Rundsteuersignals flackerten. Nach Messungen mit verschiedenen LED-Lampen und Dimmern konnte das Flackern auf die Funktionsweise des Dimmers und das Zusammenspiel von LED-Treiber und Dimmer zurückgeführt werden. Die Problematik besteht in der Erkennung des Nulldurchgangs durch den Dimmer, welcher durch die Rundsteuersignale verschoben wird. Abhilfe könnten entweder Filtersysteme, andere LED-Leuchten oder auch das Ändern der Rundsteuerfrequenz schaffen, wobei jeweils das Kosten/Nutzen-Verhältnis abzuwägen ist.
- Die Erkenntnis aus einer Untersuchung von Smart Metern und Ferraris-Zählern war, dass unter gewissen Voraussetzungen auch die in der Schweiz verbauten Smart Meter Fehler bei der Erfassung der Energiemenge ergeben, wenn das Stromsignal sehr stark verzerrt ist (Kapitel 4.17). In der Praxis treten solche Stromverzerrungen aber nur in Ausnahmefällen auf, weshalb aktuell im Normalfall kaum relevante Messfehler auftreten dürften. Bei Anlagen mit sehr stark verzerrten Strömen (hoher THD_i) würde sich jedoch zur Kontrolle eine Vergleichsmessung empfehlen, um die Genauigkeit des verwendeten Smart Meters zu testen.

Wie wirkt sich die Topologie des Verteilnetzes auf Kommunikationssysteme aus und wie kann die Kommunikationsqualität analysiert werden?

- Die Berücksichtigung der Entfernung zwischen Datenkonzentrator und Zähler alleine genügt nicht, um die Dämpfung von Übertragungssignalen zu bestimmen. Auch die Netztopologie muss berücksichtigt werden. Eine Struktur, bei der über eine einzelne Leitung ab TS mehrere Verteilkabinen angeschlossen werden, kann zu einer hohen Dämpfung der übertragenen Signale führen. Eine ein-

fache und leicht zu handhabende wirtschaftliche Lösung zur Erhöhung der Signalpegel ist die Anbringung von Repeater-Zählern in jeder Verteilkabine (Kapitel 4.14).

- Die Langzeitmessung mit einem Paketanalysator ist sehr wichtig, um die Schwachstellen einer Installation durch Vergleich der Emissionswerte zu bestimmen. Sie wird auch verwendet, wenn bestimmt werden soll, welche Schwachstellen während der unterschiedlichen Tageszeiten auftreten (Tag/Nacht, Werktag/Wochenende). Im Falle von Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Fehlerursache kann die Impedanzmessung eine grosse Hilfe sein.

Unter welchen Bedingungen führt der Einsatz von Wechselrichtern mit Spannungs- und Stromharmonischen zum instabilen Betrieb?

- Feldmessungen haben bereits im Projekt Swinging Grids gezeigt, dass die lokale, frequenzabhängige Netzimpedanz und die Spannungsverzerrungen einen grossen Einfluss auf das Spektrum der Stromüberschwingungen von elektronischen Wandlern haben [16]. Dies kann zu einem instabilen Betrieb führen. In solchen Fällen werden ausführliche Netzimpedanz- und PQ-Messungen empfohlen, um die Gründe zu analysieren und zu beheben, beispielsweise durch den Austausch eines Geräts, das die Netzimpedanz ungünstig beeinflusst oder durch die Anpassung von Regelparametern oder auch durch die Veränderung der Netztopologie.
- Im Projekt OptiQ wurde im Prosumer-Lab der BFH untersucht, ob der Betrieb verschiedener Wechselrichter (Kapitel 4.3) an unterschiedlichen Netztopologien und mit unterschiedlichen Pegeln der Spannungsharmonischen zu einem instabilen Betrieb führt. Dabei wurde in keiner Konfiguration durch die Wechselrichter ein instabiles Verhalten verursacht. Bei der Vorgabe einer stark verzerrten Netzspannung haben sich gewisse Wechselrichter ausgeschaltet. In diesen Fällen lagen die Spannungspegel der Oberschwingungen jeweils über den Grenzwerten gemäss EN 50160. Um weitere Erfahrungen zu Instabilitäten zu untersuchen, werden weitere Messungen mit Wechselrichtern unter anderen Bedingungen (Netzimpedanz, Topologie, Anzahl/Typ der Wechselrichter) empfohlen.

6 Zielerreichung

Die Zielsetzung des Arbeitspakets WP 4, nämlich die Beantwortung der in Kapitel 3.2 definierten Forschungsfragen, wurde durch die Beantwortung der Fragen im Rahmen der Untersuchungen (Kapitel 4.1 bis 4.17) und durch die Empfehlungen in Kapitel 5 erreicht. Die Ergebnisse wurden in den Kapiteln 4.1 bis 4.17 zusammengefasst. Was im Detail untersucht werden konnte, war stark davon abhängig, welche Messkampagnen in den Netzen der Projektpartner durchgeführt werden konnten. Die Zieldefinitionen mussten deshalb teilweise während der Untersuchungen ergänzt werden. Dadurch ergaben sich zwar manchmal Einschränkungen bei der Erarbeitung der formulierten Ziele, aber dafür wurden neue Möglichkeiten zur Analyse eröffnet. Eine Einschränkung bei den definierten Zielen war die Folgende:

- Stabilitätsuntersuchungen am dynamischen Modell wurden nicht durchgeführt. Für zukünftige Stabilitätsanalysen wäre ein dynamisches Modell in einem Simulationstool wie PowerFactory oder PLECS wünschenswert. Es könnte am Modell untersucht werden, unter welchen Bedingungen die eingespeisten harmonischen Ströme und die dadurch verursachten harmonischen Spannungen zu Stabilitätsproblemen führen können. Stabilitätsanalysen am Modell wurden im Projekt OptiQ im Arbeitspaket WP 3 mittels statischer Simulationen durchgeführt. Dabei standen aber nicht Oberschwingungen im Fokus, sondern es wurde in einem Niederspannungsnetz untersucht, ob sich Schaltvorgänge von RONT und Regelvorgänge von PV-Wechselrichtern ungünstig beeinflussen.

7 Ausblick

Die Arbeiten des Arbeitspakets WP 4 werden mit diesem Bericht abgeschlossen. Im Projekt OptiQ wurden und werden weiter die Arbeitspakete WP 1, 2, 3 und 5 bearbeitet und mit einem öffentlichen Bericht dokumentiert. Die Titel dieser Arbeitspakete sind:

- WP 1: PQ-Analysen (Schwingungen)
- WP 2: PQ-Analysen (Langzeitmessungen)
- WP 3: Regelstrategien mit dezentralen Anlagen
- WP 5: Zielnetzimpedanz

Die Ergebnisse der Arbeitspakete WP 1 bis WP 4 fließen in das Arbeitspaket WP 5 ein, um Empfehlungen und Tools für die Netzplanung und den Netzbetrieb zu erarbeiten. Einzelne spezifische Arbeiten aus den Arbeitspaketen WP 1 bis WP 4 werden im Arbeitspaket WP 5 des Projekts fortgesetzt.

Für zukünftige Studien wird eine Untersuchung betreffend der Netzdienlichkeit von PV-Wechselrichtern aufgrund der harmonischen Ströme empfohlen.

8 Danksagung

Wir danken den Partnern, dem Bundesamt für Energie BFE und Innosuisse für die Unterstützung. Die Arbeiten wurden im Rahmen des Schweizer Kompetenzzentrums für Energieforschung zur zukünftigen Schweizerischen elektrischen Infrastruktur (SCCER FURIES) mit finanzieller Unterstützung der Schweizerischen Agentur für Innovationsförderung (Innosuisse - SCCER Programm) durchgeführt.

9 Glossar

BFH	Berner Fachhochschule
DC	Data Concentrator (Deutsch: Datenkonzentrator)
DSA	Digitaler Spannungsanalysator: Messgerät zur Messung der frequenzabhängigen Netzimpedanz im Bereich von 50 Hz bis 2.5 kHz
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EVU	Elektrizitätsversorgungsunternehmen
fNI	Frequenzabhängige Netzimpedanz
G3-PLC	Technologie für die Powerline Communication PLC
HES-SO	Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale
HEVS	HES-SO Valais-Wallis
IGOR	Messgerät der HES-SO zur Messung der frequenzabhängigen Netzimpedanz im Bereich von 50 Hz bis 500 kHz
KK	Kabelkabine
OeB	Öffentliche Beleuchtung
P_max	Maximale Wirkleistung
PCC	Point of common coupling (Deutsch: Verknüpfungspunkt)
PLC	Powerline Communication
PLL	Phase-locked-loop (Deutsch: Phasenregelschleife)
PowerFactory	Netzsimulationstool der Firma DigSILENT
PV	Photovoltaik
PVA	Photovoltaikanlage
RST	Rundsteuerung
SCCER FURIES	Swiss Competence Center for Energy Research, Future Swiss Electrical Infrastructure
THD _i	Gesamtoberschwingungsgehalt des Stromes
THD _u	Gesamtoberschwingungsgehalt der Spannung
TS	Trafostation
WG	Working Group (Deutsch: Arbeitsgruppe)

10 Abbildungsverzeichnis

Fig. 1: PQ-Übersicht nach EN 50160/EN 61000-2-2 am Messpunkt TS 3 (2017/2018).....	2
Fig. 2: Gemessene Spannungsamplituden der 15. Harmonischen für Phase L1 bis L3 bei drei verschiedenen Betriebszuständen ohne Aktivfilter.....	3
Fig. 3: Gemessener Einfluss des Aktivfilters auf die Ströme der 15. Harmonischen am Anschlusspunkt der Wärmepumpen	4
Fig. 4: Oszilloskop des Ausschaltzeitpunktes, 6000s.....	5
Fig. 5: Betrag der fNI, gemessen in der TS und an der PV-Anlage Süd, 50 Hz bis 2.5 kHz.....	6
Fig. 6: Winkel der fNI, gemessen in der TS und an der PV-Anlage Süd, 50 Hz bis 2.5 kHz.....	6
Fig. 7: Betrag der fNI, gemessen in der TS und an der PV-Anlage Süd, bis 200 kHz (Quelle: HES-SO).....	7
Fig. 8: Winkel der fNI, gemessen in der TS und an der PV-Anlage Süd, bis 200 kHz (Quelle: HES-SO).....	7
Fig. 9: Typische Verläufe der fNI (graue Kurven) in DE, CH, AUT und CZ mit Perzentil-Kurven [9].....	8
Fig. 10: Vereinfachtes elektrisches Modell der Anlage	9
Fig. 11: Gemessener Betrag (oben) und Winkel (unten) der fNI an der Sammelschiene	9
Fig. 12: Gemessene Impedanz und Ströme bei 8.1 kHz der verschiedenen Abgänge	10
Fig. 13: Gemessener Verlauf der RST-Spannungspegel über einen Tag	12
Fig. 14: Veränderung der fNI durch den Betrieb einer 210-kVA-PV-Anlage	13
Fig. 15: Simulierter Spannungspegel bei der RST-Frequenz am Anschlusspunkt der PV-Anlage 4 in Abhängigkeit von Amplitude und Winkel des Stroms bei der RST-Frequenz.....	13
Fig. 16: Prototyp zur Filterung des Rundsteuersignals.....	14
Fig. 17: Messgrößen und mögliche Messgeräte für die Störungsanalyse (Quelle: [12])	15
Fig. 18: Vereinf. Schema eines Powerline-Kommunikationskanals zwischen Sender und Empfänger.....	16
Fig. 19: Erkenntnisse der Impedanzmessungen im PLC-Frequenzbereich an diversen Netzpunkten	16
Fig. 20: IGOR-V-Gehäuse mit integrierter Energieversorgung und ext. Strom- und Spannungssonden	17
Fig. 21: Schema Wohnblock 4 mit den vier Verteilkasten 4A bis 4D.....	18
Fig. 22: Vorgehen für die Fehlersuche in einem Powerline-Kommunikationspfad	18
Fig. 23: PLC-Clean-Up in Isaak-Anken.....	19
Fig. 24: Dämpfung zwischen der Trafostation und dem Netzpunkt 4B	19
Fig. 25: Dämpfung zwischen dem Netzpunkt 4B und den Netzpunkten 4A und 4C	19
Fig. 26: Impedanz-Situation am Messpunkt 4B.....	19
Fig. 27: Netzschema am Netzpunkt 4B mit Anschlusspunkt des IGOR-Meter	19
Fig. 28: Ausgangslage des G3-PLC-Piloten mit instabiler Kommunikation zum Quartier Nord	20
Fig. 29: Frequenzabhängige Netzimpedanz in der Trafostation und in der Verteilkabine 002	20
Fig. 30: Aufzeichnung der maximalen stündlichen Durchschnittspegel – Ausgangssituation	21
Fig. 31: Vereinfachtes Modell der Ausgangssituation bei instabiler Übertragung	22
Fig. 32: Vereinfachtes Modell der Situation mit zusätzlichem Zähler in der Verteilkabine 002	22
Fig. 33: Aufzeichnung der maximalen stündlichen Durchschnittspegel – Situation nach Modifikation mit Zähler 8C.....	23

Fig. 34: Schematische Darstellung des Testaufbaus	24
Fig. 35: Einfluss eines Wechselrichters auf zwei unterschiedliche PLC-Technologien (blau: Wechselrichter nicht angeschlossen, rot: Wechselrichter angeschlossen).....	24
Fig. 36: Einfluss eines EMV-Filters auf das PLC-Signal und Eingangsimpedanz des Filters	25
Fig. 37: Demonstration des PLC-Testaufbaus für einen Industriepartner	25
Fig. 38: Messung der Verluste in einem Transformator.....	26
Fig. 39: Messungen an einem Umrichter und EMV-Filter	26
Fig. 40: Stark verzerrte Speisespannung an der Primärseite des Transformators.....	27
Fig. 41: Resultierende gemessene Ströme auf der Primärseite des Transformators	27
Fig. 42: Abweichungen der Energiezähler in Abhängigkeit der Position der Stromspitze	28

11 Referenzen

- [1] «Prosumer-Lab,» [Online]. Available: <https://www.bfh.ch/dam/jcr:e04efbf3-ae7e-47ed-9f6b-df5146992e0a/Prosumer-Lab%20Testanlage%20-%20Smart%20Home%20im%20Labor.pdf>.
- [2] D. Roggo, L. Capponi, F. Decorvet und C. Pellodi, «REMIGATE: Reduction of electromagnetic interferences in smart grid applications: Site tests and assessment,» Swiss Federal Office of Energy SFOE, 2018.
- [3] «EN 50160, Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen,» 2010.
- [4] «EN 61000-2-2, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Teil 2-2: Umgebungsbedingungen - Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen,» 2002.
- [5] H. Sharma, M. Rylander und D. Dorr, «Grid Impacts Due to Increased Penetration of Newer Harmonic Sources, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52, No. 1,» 2016.
- [6] «IEC TS 62578, Power electronics systems and equipment – Operation conditions and characteristics of active infeed converter (AIC) applications including design recommendations for their emission values below 150 kHz, Edition 2.0,» 2015-04.
- [7] «Schaffner ecosine active sync, active harmonic filter,» [Online]. Available: products.schaffner.com/en/ecosine-active-sync.
- [8] M. Höckel und J. Meyer, «Messung von Netzimpedanzen,» 2019. [Online]. Available: <https://www.bulletin.ch/de/news-detail/messung-von-netzimpedanzen.html>. [Zugriff am 28.09.2020].
- [9] R. Stiegler, J. Meyer, S. Schori, M. Höckel, K. Scheida, J. Drápela und T. Hanžlík, «Survey of network impedance in the frequency range 2-9 kHz in public low voltage networks in AT/CH/CZ/GE,» CIREN, Madrid, 2019.
- [10] M. Rioual, M. Lopez und T. Brincourt, «Description of the low frequency phenomena involved when connecting a 3 kW EV charger to the distribution network: modelling, validation and perspectives,» CIREN, Madrid, 2019.
- [11] S. Schori, M. Höckel, L. Heiniger, L. Dalessandro, A. Rupp und J. Greuter, «Harmonic analysis and mitigation in distribution grids with high penetration of power inverters,» CIREN, Madrid, 2019.
- [12] S. Schertz, «Bachelorthesis: Untersuchung zur Störung der PLC-Datenübertragung in Niederspannungsnetzen,» Berner Fachhochschule, Biel, 2017.
- [13] ETSI, «ETSI TS 103 909 V1.1.1, Power Line Telecommunications (PLT), Narrow band transceivers in the range 9 kHz to 500 kHz, Power Line Performance Test Method Guide,» 2012.

- [14] M. Srndović, R. Fišer und G. Grandi, «Analysis of Equivalent Inductance of Three-phase Induction Motors in the Switching Frequency Range,» MDPI Electronics Journal, 2019.
- [15] F. Leferink, C. Keyer und A. Melentjev, «Runaway Energy Meters due to Conducted Electromagnetic Interference,» IEEE, Breslau, Polen, 2016.
- [16] A. Gut, N. Schneeberger, M. Höckel, S. Schori und D. Amrein, «Swinging Grids - Messung und Modellierung von Schwingungsphänomenen in Verteilnetzen,» ESReC Grids, Nidau, 2016.

12 Versionskontrolle

Version	Datum	Beschreibung	Autor
V0.0	17.6.2019	Entwurf erstellt und an HES-SO verteilt	Stefan Schori Dominique Roggo Blaise Évéquoz
V0.1	8.7.2019	Entwurf komplettiert	Stefan Schori
V0.2	7.10.2019	Entwurf überarbeitet	D. Roggo B. Évéquoz S. Schori
V1.0	11.11.2019	Ergänzungen, Freigabe	Stefan Schori
V1.1	1.10.2020	Kapitelstruktur überarbeitet, Korrekturen	Stefan Schori
V1.2	12.10.2020	Bericht ergänzt	Blaise Évéquoz Stefan Schori
V1.3	13.10.2020	Korrekturen	Stefan Schori
V1.4	21.10.2020	Bericht ergänzt	Stefan Schori Blaise Évéquoz Dominique Roggo
V1.5	22.10.2020	Bericht ergänzt	Stefan Schori Blaise Évéquoz
V2.0	30.10.2020	Korrekturen, Freigabe	Stefan Schori