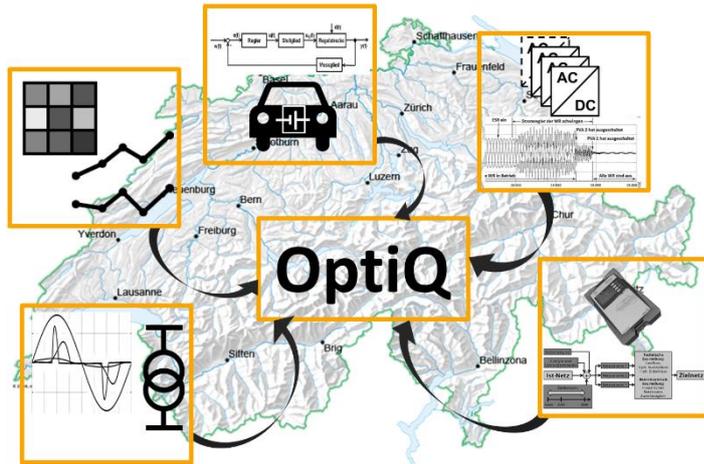




Berner  
Fachhochschule



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 Electrical Research

# OptiQ – Bericht WP 1 und WP 2

PQ-Analysen (Schwingungen und Langzeitmessungen)

<b>Autor:</b>	Stefan Schori
<b>Co-Autoren:</b>	Michael Höckel, Lukas Heiniger, Thiago Novais, Ron Buntschu Steffen Wienands, Patrick Noth
<b>Auftraggeber:</b>	Bundesamt für Energie BFE
<b>Projektpartner:</b>	AEW, BKW, Energie Service Biel/Bienne, Energie Thun, ewz, Repower, Schaffner, Service Industriels de Genève, HES-SO Valais-Wallis
<b>Unterstützt durch:</b>	SCCER FURIES (Innosuisse)
<b>Version:</b>	2.0
<b>Ort:</b>	Nidau
<b>Datum:</b>	30.10.2020

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

# 1 Abstract

## Deutsche Version

In den Arbeitspaketen WP 1 und WP 2 des Projekts OptiQ wurde die Ausbreitung der Power-Quality-Phänomene (PQ-Phänomene) auf den Netzebenen (NE) 5 und 7 mittels Messungen und Simulationen untersucht. Messungen in drei Verteilnetzen lieferten Erkenntnisse zum Einfluss der Variation der Netztopologie auf den Netzebenen 5 und 7. Eine Analyse betrachtete die Übertragung von PQ-Größen über Transformatoren der Netzebene 6. Die Eignung von induktiven Spannungswandlern für die Spannungsmessung auf der Netzebene 5 wurde geprüft. Um die PQ-Parameter in Verteilnetzen möglichst umfassend aber mit optimierten Kosten zu erfassen, wurde eine Methodik zur Identifikation von PQ-Hotspots und zur Verlagerung von dezentralen Messpunkten (in Häusern) an zentrale Messpunkte (in Trafostationen) entwickelt und in realen Stromnetzen getestet. Softwaretools zur Auswertung von Langzeitdaten wurden weiterentwickelt, um damit Trends und die Qualitätsreserve der PQ-Parameter zu den Norm-Grenzwerten im Netz analysieren zu können. Eine Methodik zur Berechnung eines Qualitätsindex zur Bezifferung der Spannungsqualität an einem Netzknoten wurde entwickelt. Die analysierten Stromnetze wiesen für die PQ-Parameter in der Regel grosszügige Qualitätsreserven auf. Probleme treten heute in der Regel nur an einzelnen Knoten und nur für ein spezifisches PQ-Phänomen auf. Dies ist klaren Vorgaben für den Anschluss von Kundenanlagen zu verdanken, aber auch dem Stromnetz selbst, welches in der Vergangenheit mit genügend Reserve gebaut wurde. Diese hohe Qualität des heutigen Stromnetzes kann nur beibehalten werden, wenn die Effekte durch die Zunahme moderner Geräte bekannt sind und in der Netzplanung sowie im Netzbetrieb berücksichtigt werden.

## English version

The work packages WP 1 and WP 2 of the project OptiQ were investigating the propagation of the PQ phenomena on the grid levels 5 and 7 by means of measurements and simulations. Measurements in three distribution grids showed the influence of the variation of the grid topology on the grid levels 5 and 7. An analysis considered the transmission of PQ parameters via transformers of the grid level 6. The suitability of inductive voltage transformers for the voltage measurement on the grid level 5 was tested. To record the PQ parameters in distribution grids as complete as possible but at optimized costs, a methodology for the identification of PQ hotspots and for the relocation of decentralized measurement points (in houses) to central measurement points (in transformer stations) was developed and tested in real power grids. Software tools for the evaluation of long-term data were further developed to examine trends as well as the quality reserve related to the standard limits of the PQ-Parameters in the grids. A methodology was developed to calculate a quality index to quantify the power quality at grid nodes. In general, the analyzed power grids had generous quality reserves for the PQ parameters. Today, problems usually only occur at individual nodes and only for a specific PQ phenomenon. This is due to clear specifications for the assessment of grid disturbances, but also due to the power grid itself, which was built with sufficient reserves in the past. This high quality of the actual electricity grid can only be maintained if the effects of the increase in modern equipment are known and considered in grid planning and operation.

## 2 Management summary

Die Analysen im Mittelspannungsnetz (MS) zeigten für alle PQ-Phänomene tendenziell eine mittlere bis hohe Korrelation zwischen der gemessenen Ausprägung in der Trafostation (TS) und dem Unterwerk (UW). Netzurückwirkungen breiteten sich folglich über das gesamte MS-Netz aus. Eine Ausnahme bildeten Abgänge mit hoher Leistung. Sie wiesen teils andere Ausprägungen der PQ-Phänomene auf. Untersuchungen in Niederspannungsnetzen (NS) zeigten, dass PQ-Phänomene an nahe beieinanderliegenden Netzknoten mit wenigen oder leistungsschwachen Kunden oftmals ähnliche Amplituden und Formen aufweisen. Sind die Distanzen zwischen Netzknoten eher gross und sind viele Endkunden an den Verknüpfungspunkten angeschlossen, ist die Korrelation zwischen den Netzknoten eher schwach oder gar nicht vorhanden.

Messdaten haben gezeigt, dass die NS-Ströme die Mittelspannung an der TS weniger stark als die Niederspannung beeinflussten. Es wurde erkannt, dass von einer Dominanz der MS-Spannung gegenüber einzelnen MS-Bezügern ausgegangen werden kann. Die Summe aller Oberschwingungsströme (OS-Ströme) bestimmte die OS-Spannungen auf der MS-Ebene so stark, dass OS-Ströme von einzelnen Trafostationen keinen dominanten Einfluss hatten, auch wenn leistungsstarke Bezüger angeschlossen waren. Diese Ergebnisse stehen aber auch im Zusammenhang mit der jeweiligen frequenzabhängigen Netzimpedanz ( $fNI$ ).

Die Datenauswertung einer MS-Messkampagne zeigte eine allgemein hohe Reserve zu den Grenzwerten gemäss EN 50160 und nur einen geringen Einfluss des Schaltzustandes (Topologie) der MS-Ebene auf die Ausprägung der einzelnen PQ-Parameter im MS-Netz und in den NS-Netzen. Auch weitere PQ-Messungen in zwei NS-Netzen vor und nach Topologieumbauten zeigten im alten und neuen Zustand an den meisten Messstellen ähnliche Ergebnisse und keine generelle Verschlechterung der Spannungsqualität.

Bei 25 untersuchten TS war das Verhalten der Grundschwingung und 5. Spannungsharmonischen auf beiden Seiten der Transformatoren ähnlich. Die Ausprägung von Flicker auf der MS-Seite des Transformators war gleich oder kleiner als auf der NS-Seite. Für die Unsymmetrie, den Gesamtoberschwingungsgehalt der Spannung ( $THD_U$ ) und die 7. sowie 11. Spannungsharmonische lag für mehr als die Hälfte der untersuchten Transformatoren keine Korrelation zwischen der MS- und NS-Seite vor. Die 3. und 9. Spannungsharmonische zeigten bei Dy-Transformatoren keine Korrelation zwischen der NS- und MS-Seite.

Für Messungen im MS-Netz werden oftmals induktive Spannungswandler eingesetzt. Der Grossteil der geprüften MS/NS-Spannungswandler hielt die Richtwerte für Übertragungsfehler ein, aber einzelne Wandler überschritten diese dennoch. Oberhalb der 25. Harmonischen (1.25 kHz) nahm der Übertragungsfehler teils stark zu (bis zu -40 %). Es wird daher empfohlen, bei MS-Messungen oberhalb von 1.25 kHz die Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten und eher qualitative denn quantitative Aussagen zu treffen, auch weil oberhalb von 1.25 kHz Phasenverschiebungen von bis zu  $-5.6^\circ$  gemessen wurden.

Zur Analyse von Langzeitdaten wurden Software-Tools weiterentwickelt und eine Methodik für einen Qualitätsindex beschrieben. Der Qualitätsindex beschreibt die Güte eines Netzknotens in Bezug auf die PQ-Parameter. Als Basis für den Qualitätsindex dient die Qualitätsreserve jedes PQ-Parameters, also die Differenz zwischen Grenzwert gemäss EN 50160 und gemessenem/simuliertem Wert.

Um nur die kritischsten Netzknoten mit Messgeräten überwachen zu müssen, ist es nötig, PQ-Hotspots zu erkennen. Massgeblich für die Beurteilung von PQ-Hotspots ist der Übergabepunkt zwischen Netzbetreiber und dem Kunden, also der Netzanschlusspunkt. Ein einfacher Ansatz zur Identifikation potenzieller PQ-Hotspots besteht darin, die relative Spannungsänderung für symmetrische Lasten zu berechnen. Eine Methodik wurde dokumentiert. Sobald die PQ-Hotspots bestimmt sind, kann die Anzahl der Messpunkte weiter reduziert werden, indem die Messpunkte von Hausanschlusskasten (HAK) oder Verteilkabinen (VK) in Trafostationen verlegt werden. Um die PQ-Parameter in HAK und VK basierend auf Messungen in TS quantifizieren zu können, muss der Qualitätsverlust über den Leitungen für die PQ-Parameter bekannt sein. Ein Verfahren zur Bestimmung des Qualitätsverlusts wurde erarbeitet.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>I</b>
<b>2</b>	<b>Management summary</b> .....	<b>II</b>
<b>3</b>	<b>Ausgangslage und Forschungsfragen</b> .....	<b>1</b>
3.1	Ausgangslage .....	1
3.2	Forschungsfragen .....	1
<b>4</b>	<b>Ergebnisse WP 1</b> .....	<b>2</b>
4.1	Ausbreitung und Übertragung von Spannungs- und Stromharmonischen .....	2
4.2	Übertragung/Dämpfung von U- und I-Harmonischen auf der NE 6 .....	3
4.3	Übertragungsverhalten von MS/NS-Spannungswandlern .....	4
4.4	Einflüsse durch Topologieveränderungen.....	5
4.5	Einfluss von grossen MS/HS-Bezüglern.....	6
4.6	Repräsentative Spannungsqualitätsprofile .....	7
<b>5</b>	<b>Ergebnisse WP 2</b> .....	<b>9</b>
5.1	Entwicklung eines Qualitätsindex (PQ-Index).....	9
5.2	Identifikation von Punkten mit potenziell schlechter Spannungsqualität .....	11
5.3	Abschätzen der Spannungsqualität beim Endkunden .....	12
<b>6</b>	<b>Empfehlungen</b> .....	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Zielerreichung</b> .....	<b>15</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>15</b>
<b>9</b>	<b>Danksagung</b> .....	<b>16</b>
<b>10</b>	<b>Glossar</b> .....	<b>16</b>
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>16</b>
<b>12</b>	<b>Referenzen</b> .....	<b>17</b>
<b>13</b>	<b>Versionskontrolle</b> .....	<b>17</b>

## 3 Ausgangslage und Forschungsfragen

### 3.1 Ausgangslage

Die Arbeitspakete WP 1 und WP 2 trugen die folgenden Titel:

- WP 1: PQ-Analysen (Schwingungen)
- WP 2: PQ-Analysen (Langzeitmessungen)

Die Arbeitspakete wurden aufgrund von thematischen Überschneidungen zusammengelegt. Ergebnisse aus den Messungen und Datenanalysen flossen somit in beide Arbeitspakete ein.

Um die im Projektantrag formulierten Themen zu den Arbeitspaketen zu analysieren, wurden gemeinsam mit den Projektpartnern verschiedene Untersuchungen definiert. Sie umfassten Messungen mit mobilen Messgeräten in den Nieder- und Mittelspannungsnetzen, Analysen von bestehenden Daten der Netzbetreiber und die Programmierung von Software-Tools:

- Einfluss verschiedener MS-Schaltzustände auf das MS- und NS-Netz: MS- und NS-Messungen beim Energie Service Biel/Bienne (ESB) während verschiedener Schaltzustände des MS-Netzes
- Auswirkungen von Topologie-Umbauten im NS-Netz auf PQ und fNI. NS-Messungen zur Untersuchung des Umbaus der NS-Netztopologie in zwei NS-Netzen des ESB (total 4 Messkampagnen)
- Messkampagnen in NS-Netzen des ESB und bei AEW zur Entwicklung des PQ-Index
- Messen des Übertragungsverhaltens von induktiven MS/NS-Spannungswandlern
- Erweiterungen der Analysesoftware PQoverview (Eigenentwicklung von BFH und ESB) und Programmierung von Auswertesoftware in der Webanwendung Jupyter [1]
- Sammeln und Analysieren von Langzeitdaten des ESB, von ewz, von Repower und von SIG. Die Daten stammen von den Netzebenen 3, 5 und 7
- MS/NS-Messkampagnen im BKW-Netz zur Untersuchung der Ausbreitung von Harmonischen auf der NE 5 und zur Analyse des Übertragungsverhaltens der PQ-Parameter auf der NE 6
- Messkampagnen im BKW-Netz:
  - zur Erarbeitung einer Methodik zur Erkennung von PQ-Hotspots und
  - zur Abschätzung der Spannungsqualität beim Endkunden basierend auf Messungen an zentralen Netzknoten wie Trafostationen und Verteilnkabinen

### 3.2 Forschungsfragen

Basierend auf den in Kapitel 3.1 erwähnten Untersuchungen wurden für die Arbeitspakete WP 1 und WP 2 nachfolgende Ziele definiert:

WP 1: PQ-Analysen (Schwingungen)

- Ausbreitung und Übertragung von Spannungs- und Stromharmonischen
- Übertragung und Dämpfung von Spannungs- und Stromharmonischen auf der NE 6
- Übertragungsverhalten von MS/NS-Spannungswandlern
- Einflüsse durch Topologieveränderungen
- Einfluss von grossen MS/HS-Bezügern
- Repräsentative Spannungsqualitätsprofile

WP 2: PQ-Analysen (Langzeitmessungen)

- Entwicklung eines Qualitätsindex
- Identifikation von Punkten mit potentiell schlechter Spannungsqualität
- Abschätzen der Spannungsqualität beim Endkunden aufgrund von Messungen an zentralen Knotenpunkten

Die aufgelisteten Ziele wurden als Forschungsfragen für WP 1 und WP 2 übernommen. Die Beantwortung der Forschungsfragen befindet sich in den Kapiteln 4 und 5 in zusammengefasster Form. Detaillierte Analysen sind für die Projektpartner in den Berichten zu den einzelnen Untersuchungen zugänglich.

## 4 Ergebnisse WP 1

### 4.1 Ausbreitung und Übertragung von Spannungs- und Stromharmonischen

In [2] wurde die Ausbreitung von Netzurückwirkungen auf der MS-Ebene in Abhängigkeit der MS-Leitungen zu den TS untersucht. Für jede TS wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. In Fig. 1 sind die Ergebnisse für 25 Leitungen zwischen den TS und den Abgängen der UW dargestellt. Die Darstellung zeigt, wie stark die Spannung, der Flicker, die Unsymmetrie und der THD<sub>U</sub> am UW-Abgang mit den Werten in der jeweiligen TS korrelierten. Ein Beta von 1 bedeutet, dass im Regressionsmodell das Phänomen im UW genauso auftritt wie in der TS. Einige Punkte weisen ein Beta von grösser 1 auf, was bedeutet, dass die Ausprägung für diese Punkte im UW höher ist als in der TS. Für jede Leitung wurde die Korrelation berechnet und als einzelner Punkt in Abhängigkeit der Leitungslänge dargestellt. Entspricht das Modell den Messwerten gut, ist der Farbenpunkt kräftig, bei zunehmender Abweichung der Messwerte vom Modell ist die Farbe blasser.

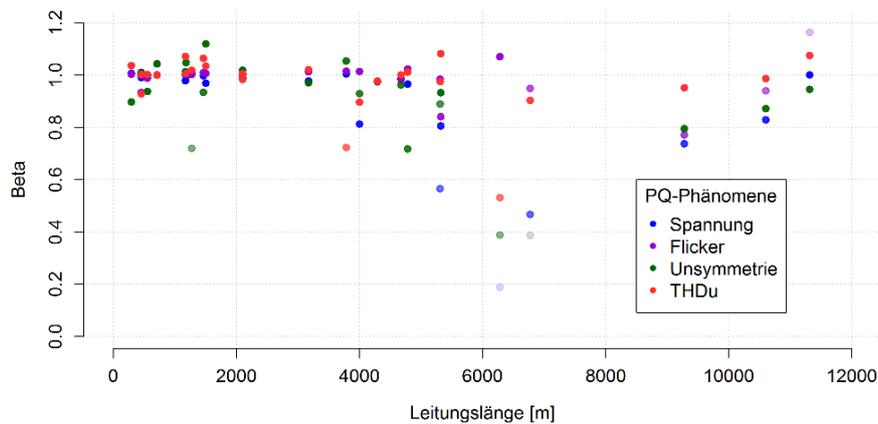


Fig. 1: Korrelation der PQ-Phänomene zwischen 25 TS und deren UW

Die Darstellung zeigt, dass TS mit Leitungslängen von 300 m bis 11 km verwendet wurden und der Parameter Beta praktisch nicht von den Leitungslängen abhängig sind. Im Bereich von 6 km wird eine geringe Abhängigkeit vermerkt da der Wert Beta insbesondere für die Spannung und die Unsymmetrie tief ausfällt. Bei diesen Messpunkten handelte es sich um zwei Industriebetriebe, eines davon mit einer PV-Anlage (3.1 MVA), was die vom UW unabhängiger Spannung erklärt. Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- Die Spannung in der TS wurde in den meisten Fällen stark vom UW bestimmt
- Der Wert des Langzeit-Flickers korrelierte in 92 % der TS stark mit dem Wert im UW
- Die unsymmetrische Belastung in den TS war in 80 % der Fälle ähnlich zu jener im UW
- In 92 % der TS wurde beim THD<sub>U</sub> eine hohe Korrelation zwischen den TS und UW erkannt
- Die 3. Spannungsharmonische zeigte eine geringe Korrelation, die 5. und 7. Spannungsharmonische zeigten eine hohe Korrelation
- In den meisten Fällen passte das Regressionsmodell bei kleinerem Beta schlechter mit den Messwerten überein als bei einem Beta um den Wert 1

Die Analysen zeigten für alle PQ-Phänomene tendenziell eine mittlere bis hohe Korrelation zwischen der gemessenen Ausprägung in der TS und dem UW. Netzurückwirkungen breiteten sich folglich über das gesamte MS-Netz aus. Dies lässt sich durch die eher kleinen Ströme im Vergleich mit den Leitungsströmen auf der NS-Ebene erklären. Eine Ausnahme bildeten Abgänge mit hoher Leistung, welche lokal zu anderen Ausprägungen der PQ-Phänomene führen können. Es wurde festgestellt, dass die Grundschwingung und OS-Spannungen zwischen TS und UW während der untersuchten Zeitperiode stark korrelierten, diese jedoch nur geringfügig durch den Strom im jeweiligen Abgang bestimmt wurden. Es ist deshalb zu vermuten, dass Einflüsse der weiteren MS-Abgänge im UW und Einflüsse der oberen Spannungsebenen überwogen. Auch Untersuchungen in Niederspannungsnetzen haben gezeigt, dass PQ-Phänomene an nahe beieinanderliegenden Netzknoten mit wenigen oder leistungsschwachen Kunden oftmals ähnliche Amplituden und Formen aufwiesen. Waren die Distanzen zwischen Netzknoten eher gross und waren viele Endkunden an den Verknüpfungspunkten angeschlossen, war die Korrelation zwischen den Netzknoten eher schwach oder gar nicht vorhanden. Dies liegt daran, dass OS-Ströme bereits «vor Ort» kompensiert wurden. Dabei ist die frequenzabhängige Netzimpedanz der Geräte und der Leitungen zwischen den Netzknoten entscheidend.

## 4.2 Übertragung/Dämpfung von U- und I-Harmonischen auf der NE 6

Das Übertragungsverhalten von MS/NS-Transformatoren der NE 6 wurde in [2] mittels Regressionsanalyse basierend auf Messdaten untersucht. Dabei wurden die Parameter Spannungsänderung, Langzeit-Flicker,  $THD_U$  sowie die 3./5./7./9./11. Spannungsharmonischen betrachtet. Für die untersuchten 25 TS war das Verhalten der Grundschiwingung und 5. Spannungsharmonischen auf beiden Seiten der Transformatoren ähnlich. Dabei war die Ausprägung der Grundschiwingung auf der MS- und NS-Ebene fast identisch, die 5. Spannungsharmonische war hingegen auf der MS-Ebene teils höher. Die Ausprägung von Flicker auf der MS-Seite des Transformators war gleich oder kleiner als auf der NS-Seite. Dies lässt sich durch den Standort des Erzeugers von Flicker erklären: Befindet sich dieser auf der NE 7, wird der Flicker nur gering auf die MS übertragen. Wird Flicker im MS-Netz erzeugt, wird dieser jedoch fast mit der gleichen Ausprägung auf die NS-Ebene transferiert. Für die Unsymmetrie,  $THD_U$  und die 7. sowie 11. Spannungsharmonische lag für mehr als die Hälfte der untersuchten Transformatoren keine Korrelation zwischen der MS- und NS-Seite des Transformators vor. Aufgrund der unterschiedlichen Ausprägungen der PQ-Phänomene erlauben Messungen auf der NS-Ebene keine zuverlässige Abschätzung der Spannungsqualität auf der MS-Ebene, und umgekehrt auch nicht. Die PQ-Phänomene Spannungsänderung und Flicker waren auf der MS-Seite des Transformators stets gleich oder geringer als auf der NS-Seite. Für die anderen Phänomene liess sich aufgrund der grossen Streuung kein einheitlicher Übertragungsfaktor ermitteln. Die Grundschiwingungs- als auch die Oberschiwingungsströme einer Last beeinflussten die Nieder- und Mittelspannung unterschiedlich stark. Es ist zu vermuten, dass verschiedene Schaltzustände im MS-Netz sowie Stufenstellungen der UW-Transformatoren dafür verantwortlich waren.

Die Übertragung eines Dyn5-Transformators wurde im Detail untersucht: Beim Betrachten der OS-Spannungen fiel auf, dass die Übertragung von der NS-Seite auf die MS-Seite bei der 5. Spannungsharmonischen hoch war und sich mit zunehmender Frequenz verringerte. Dies bedeutet, dass die OS-Spannungen höherer Ordnung, welche auf der NS-Ebene erzeugt wurden, nur gedämpft auf der MS-Ebene auftraten. Dies wird durch die bei höherfrequenten Strömen zunehmende Impedanz des Transformators begründet. Die 3. und 9. Spannungsharmonische zeigten keine Korrelation zwischen der NS- und MS-Seite. Aufgrund der Schaltungsart Dyn5 des Transformators war dies zu erwarten. Denn symmetrische Stromharmonische mit durch 3 teilbarer Ordnungszahl werden bei Dy-Transformatoren nicht von der NS-Ebene auf die MS-Ebene übertragen.

Mit der Kenntnis, dass die Spannungen der Grundschiwingung auf der NS- und MS-Ebene ähnlich sind, interessierte die Frage, wie stark die NS-Verbraucher die beiden Spannungen beeinflussen. Folgende Erkenntnisse gingen daraus hervor: Eine Regressionsanalyse zwischen NS-Strom und MS-Spannung eignete sich nicht zur Untersuchung deren Korrelation. Erst beim Betrachten der Daten im Zeitbereich wurde ersichtlich, dass der Strom der Grundschiwingung die NS stark, jedoch die MS weniger deutlich beeinflusst. Es kann somit bei der Grundschiwingung auf der MS-Ebene von einer gewissen Dominanz des MS-Netzes gegenüber den NS-Verbrauchern ausgegangen werden. Die Zusammenhänge zwischen den OS-Strömen auf der NS-Seite der Transformatoren und den Spannungen der NE 5 und NE 7 waren weniger klar erkennbar. Es werden Kompensations- oder Additionseffekte der OS-Ströme vermutet.

Die Übertragung von OS-Spannungen eines MS/NS-Transformators wurde anhand von Netzmodellen simuliert. Beim Vergleich der simulierten OS-Spannungen mit den Messdaten traten jedoch Differenzen von bis zu 49 % auf, mit zunehmender Ordnung nahmen die Fehler ab. Der Grund dafür könnte eine mit zunehmender Frequenz geringere Abweichung der Transformatorimpedanz aus dem Modell vom realen Impedanzverlauf sein. Die Simulationen zeigten, wie wichtig es ist, die Vorbelastung aus dem MS-Netz in Form der MS-Spannung im Modell zu verwenden. Wurde die im MS-Netz gemessene Spannung nicht verwendet, sondern eine ideale 50-Hz-Sinusspannung hinterlegt, wiesen Simulation und Messung grosse Abweichungen auf. Die simulierten OS-Spannungen wichen auf der MS-Ebene um bis zu einem Faktor 10 und auf der NS-Ebene bis zu einem Faktor 1.6 von den Messdaten ab. Bei der Beurteilung von OS-Spannungen hat die Vorbelastung der höheren Spannungsebene somit einen signifikanten Einfluss und führt bei Nichtberücksichtigung zu unzuverlässigen Ergebnissen, die sich nicht zur Beurteilung der OS-Spannungen nach EN 50160 eignen. Damit zuverlässige Modelle geschaffen werden können, sind deshalb Überlegungen zur vereinfachten Mitberücksichtigung des MS-Netzes anzustellen. In [2] wurden Faktoren aufgelistet, die es zu beachten gilt, um möglichst zuverlässige Simulationsergebnisse zu erhalten.

### 4.3 Übertragungsverhalten von MS/NS-Spannungswandlern

Ziel der Untersuchung war, zu prüfen, ob sich die im Verteilnetz verwendeten induktiven Spannungswandler eignen, um Oberschwingungen auf der MS-Ebene im Bereich von 50 Hz bis 2.5 kHz mit genügender Genauigkeit zu messen. 84 induktive MS/NS-Wandler für Spannungsmessungen im Mittelspannungsnetz von drei verschiedenen Herstellern wurden ausgemessen. Insgesamt umfasste der Test fünf verschiedene Typen von Wandlern. Die Messungen wurden mit dem Gerät Omicron CMC 256-6, das von einer Matlab-Software der TU Dresden gesteuert wurde, durchgeführt [3]. Die Auswertung zeigte betreffend Übertragungsfehler (Fig. 2 und Fig. 3) und Phasenverschiebung deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Wandlertypen. So wies der Wandler Typ 1 bei 1.25 kHz (25. Harmonische) mit 2.2 % im Vergleich zu den anderen Wandlertypen einerseits den grössten mittleren Übertragungsfehler auf, dafür war andererseits die mittlere Phasenverschiebung mit 0.3° vergleichsweise am kleinsten. Die grösste Phasenverschiebung bei 1.25 kHz wurde mit 2.2° beim Typ 2 gemessen. Auch beim Vergleich der Wandler eines bestimmten Typs zeigten sich Unterschiede, zum Beispiel bei Wandlern, die in unterschiedlichen Jahren hergestellt wurden. Richtwerte für den maximalen Übertragungsfehler wurden aus [4] übernommen und betragen für Frequenzen kleiner 1 kHz  $\pm 2\%$ , für Frequenzen kleiner 2 kHz  $\pm 4\%$  und für Frequenzen kleiner 2.5 kHz  $\pm 6\%$ :

- Alle 10 Wandler des Typs 4 und alle 28 Wandler des Typs 3 erfüllten diese Vorgaben
- 1 von 2 Wandlern des Typs 5 erfüllte die Vorgabe bei 2.5 kHz nicht
- 1 von 23 Wandlern des Typs 2 erfüllte die Vorgabe bei 2.5 kHz nicht
- 1 von 23 Wandlern des Typs 2 erfüllte keine Vorgabe

Keiner der Wandler von Typ 1 des Herstellers 1 hielt alle Richtwerte ein. Insbesondere bei Frequenzen grösser 2 kHz wies der Typ 1 auffällig höhere Übertragungsfehler auf als die anderen Typen. Es wird empfohlen, diesen Typ nur für Messungen bis zu 1.25 kHz einzusetzen. Der maximale gemessene Übertragungsfehler betrug dort -3 %. Weiter war aufgefallen, dass einige Wandler unterschiedlicher Typen bei 50 Hz einen grösseren Übertragungsfehler als 0.5 % (Angabe auf dem Typenschild) aufwiesen.

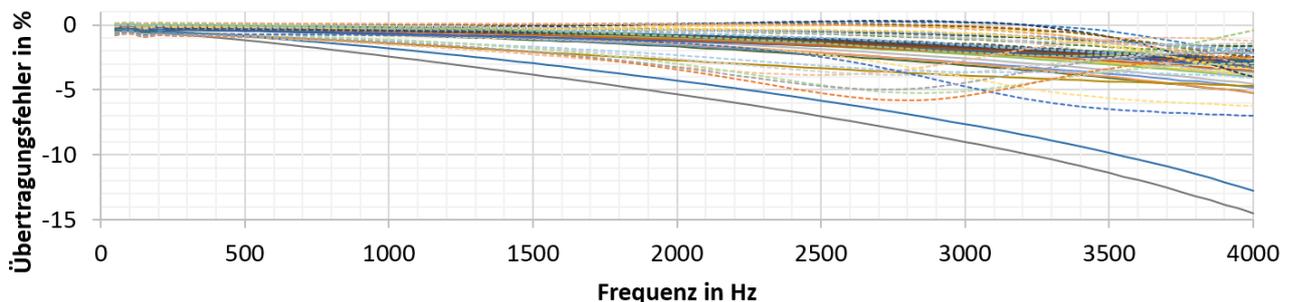


Fig. 2: Gemessene Übersetzungsfehler von Typ 2 (durchgezogen) und Typ 3 (gestrichelt)

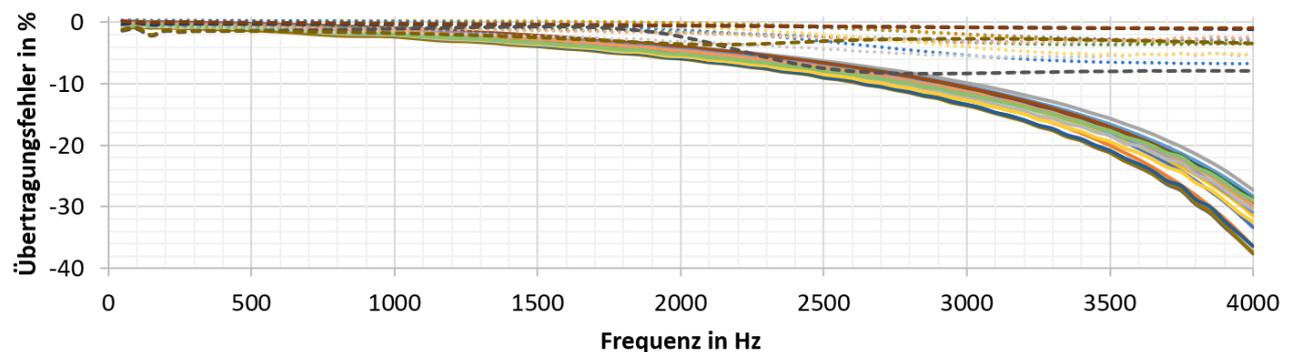


Fig. 3: Gemessene Übertragungsfehler von Typ 1 (durchgezogen), 4 (gepunktet) und 5 (gestrichelt)

Der Grossteil der Wandler hielt die Richtwerte ein, aber einzelne Wandler überschritten diese dennoch. Bis zur 25. Harmonischen (1.25 kHz) war der Übertragungsfehler bei den gemessenen Wandlern nie grösser als -3.1 %. Oberhalb davon nahm der Übertragungsfehler teils stark zu. Es wird daher empfohlen, bei Messungen oberhalb von 1.25 kHz die Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten und eher qualitative denn quantitative Aussagen zu treffen, auch weil oberhalb von 1.25 kHz Phasenverschiebungen von bis zu -5.6° gemessen wurden. Die Messung des THD<sub>U</sub> ist dann als brauchbar anzusehen, wenn sich die Oberschwingungen mit den höchsten Amplituden unterhalb von 1.25 kHz befinden, was meist der Normalfall ist.

### 4.4 Einflüsse durch Topologieveränderungen

Ein MS-Netz des Energie Service Biel/Bienne mit vier verschiedenen Schaltzuständen (Ändern des Schaltzustands der Schalter 1-6 in Fig. 4) wurde überwacht. Der Einfluss der Schaltzustände auf die Spannungsqualität wurde analysiert. Die Datenauswertung zeigte eine allgemein hohe Reserve zu den Grenzwerten gemäss EN 50160 und nur einen geringen Einfluss des Schaltzustandes (Topologie) auf die Ausprägung der einzelnen PQ-Parameter im MS-Netz und in den NS-Netzen. Die Spannungsänderungen, die Oberschwingungsspannungen, der Gesamtüberschwingungsgehalt der Spannung THD<sub>U</sub>, der Langzeit-Flicker und die Unsymmetrie der Versorgungsspannung variierten von Topologie zu Topologie nicht signifikant.

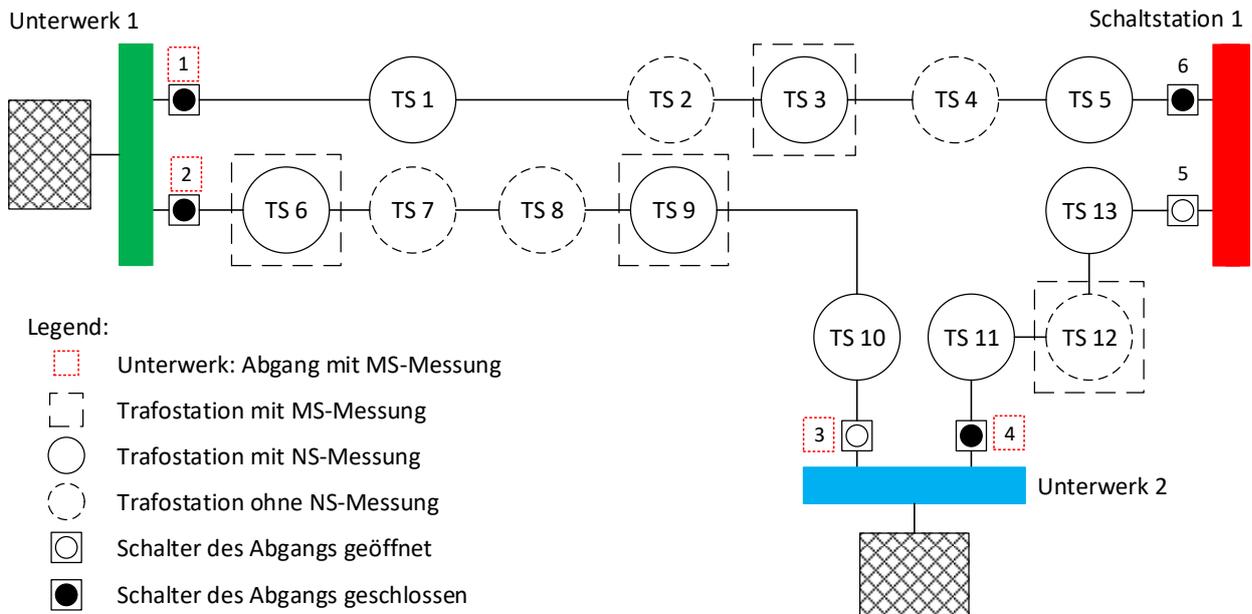


Fig. 4: Schema des analysierten MS-Netzes mit Standard-Schaltzustand

Wie in Fig. 5 dargestellt, wurde die Netzstruktur zweier Niederspannungsnetze des Energie Service Biel/Bienne umgebaut. Die PQ-Messungen im alten und neuen Zustand zeigten an den meisten Messstellen ähnliche Ergebnisse und waren im Netz 1 vergleichbar mit den Messwerten an der VK, welche das analysierte Niederspannungsnetz speiste. Kritische Veränderungen der Netzzrückwirkungen wurden anhand der analysierten Daten nicht erkannt. Im Netz 1 nahmen einige harmonische Spannungsamplituden leicht ab, andere leicht zu. Die Spannungsqualität im Netz 2 ist in beiden Jahren aufgrund der eher kurzen Leitungen zur Trafostation sehr hoch. Die neue Topologie beeinflusste die fNI (die zusammen mit der HES-SO gemessen wurde) nicht derart, dass dies einen signifikanten Einfluss auf die Spannungsqualität hatte. Die neuen Hausanschlussleitungen sind in der Regel länger als die alten, aber die Querschnitte wurden meistens vergrößert, was die Zunahme der Netzimpedanz am HAK durch die längere Leitung teils kompensieren konnte. Im Netz 1 führte dies an zwei der sieben gemessenen Netzknoten zu einer um 295 bis 385 kVA höheren dreiphasigen Kurzschlussleistung und an fünf Netzknoten wurde diese um 232-964 kVA reduziert. Im Netz 2 wurde die dreiphasige Kurzschlussleistung in vier Häusern gemessen, wobei sie nach dem Umbau an einem Knoten um 1.1 MVA niedriger war und an drei Knoten um 81 bis 880 kVA höher.

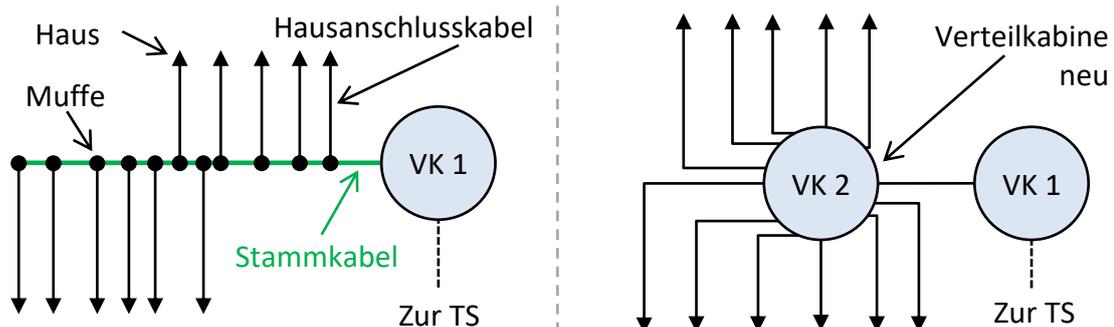


Fig. 5: NS-Netztopologie vor (links) und nach (rechts) dem Umbau

## 4.5 Einfluss von grossen MS/HS-Bezügern

Wie Fig. 1 in Kapitel 4.1 zeigt, hatten Industriebetriebe, einer davon mit einer grossen PV-Anlage, einen stärkeren Einfluss auf die MS-Spannung in der zugehörigen Trafostation als leistungsschwache Bezüger. Es konnte bei diesen leistungsstarken Bezügern gezeigt werden, dass die MS-Spannung in der Trafostation stärker durch den Bezug auf der NS-Seite beeinflusst wurde als bei den leistungsschwachen Bezügern, bei denen die MS-Spannung in der TS stärker mit der Spannung im UW korrelierte. Folglich hatte der Spannungsabfall über den MS-Leitungen bei leistungsstarken Bezügern einen signifikanten Einfluss auf die MS-Spannung an der TS. Ein solcher Einfluss kann sich generell auch auf andere Trafostationen auswirken, die in der Nähe an die Mittelspannung angeschlossen werden, insbesondere, wenn es sich um TS handelt, die im Strang weiter entfernt vom Unterwerk angeschlossen sind als die Trafostation mit den leistungsstarken Bezügern. Allerdings war der Einfluss von leistungsstarken Bezügern auf die Spannung am Unterwerk selbst abgeschwächt, was sich durch die geringere Netzimpedanz des vorliegenden Netzes erklärt. Die Spannung wird hier also einerseits durch die Hochspannung und andererseits durch die Summe aller Verbraucher auf der MS-Ebene vorgegeben. Einzelne leistungsstarke Bezüger hatten deshalb in starken MS-Netzen (niedrige Leitungsimpedanzen) mit vielen Kunden keinen sichtbaren Einfluss auf den Spannungseffektivwert. Für den  $THD_U$  war das Bild bei den untersuchten Bezügern nicht eindeutig. In einem Fall korrelierte der  $THD_U$  am UW mit jener TS mit leistungsstarkem Bezüger, im anderen Fall korrelierte er nicht. Leistungsstarke Bezüger hatten auch einen direkten Einfluss auf die Spannungsunsymmetrie auf der MS-Seite der Trafostation, an welche der leistungsstarke Bezüger angeschlossen waren. Jedoch war der Einfluss auf das gesamte MS-Netz nur schwach. In [2] wurde gezeigt, dass die NS-Ströme die Mittelspannung an der TS weniger stark als die Niederspannung beeinflussten (Kapitel 4.2). Es wurde erkannt, dass von einer gewissen Dominanz der vorhandenen MS-Spannung gegenüber einzelnen MS-Bezügern ausgegangen werden kann. Das heisst auch, dass die Summe aller OS-Ströme die OS-Spannungen auf der MS-Ebene so stark bestimmte, dass OS-Ströme von einzelnen Trafostationen keinen dominanten Einfluss hatten. Diese Ergebnisse stehen aber auch im Zusammenhang mit der jeweiligen frequenzabhängigen Netzimpedanz ( $fNI$ ). Die untersuchten Netze waren stark (niedrige Leitungsimpedanzen) und somit war der Spannungsabfall bei niedrigen Frequenzen gering. Im dem Fall, dass einzelne leistungsstarke Bezüger signifikante Amplituden gewisser OS-Ströme im Mittelspannungsnetz erzeugen und diese OS-Ströme durch ein schwaches Netz (hohe Netzimpedanz) fließen würden, könnten diese OS-Ströme auch auf der MS-Ebene signifikante OS-Spannungen erzeugen. Hierbei ist es ein Vorteil, dass mit zunehmender Frequenz die Trafoimpedanz (NE 6) zunimmt und einen dämpfenden Effekt für OS-Ströme hat. Die Analyse von Mittelspannungsmessungen zeigte, dass grosse Bezüger mit Leistungsänderungen von mehreren 100 kVA zwar vermehrt einzelne Stromoberschwingungen im MS-Netz erzeugten, dass diese aber keinen signifikanten Einfluss auf die Spannungsoberschwingungen des MS-Netzes hatten. Es wurden einerseits Kompensations- oder Additionseffekte der OS-Ströme der verschiedenen Trafostationen vermutet. Andererseits wies das Netz bei den betrachteten Frequenzen wohl genügend niedrige Impedanzen auf, so dass keine dominanten Netzurückwirkungen entstanden.

Zusätzlich zu den Betrachtungen im MS-Netz wurde am Beispiel einer Schreinerei untersucht, wie sich der erzeugte Kurzzeit-Flicker der Schreinerei im gesamten NS-Netz verteilte. Die Schreinerei bestimmte massgebend die Ausprägung der Flickerwerte in der TS, was daran liegt, dass kein anderer Grossverbraucher in unmittelbarer Nähe zur TS vorhanden war. Als Konsequenz davon wurden alle von dieser TS versorgten Netzanschlüsse durch die Schreinerei beeinflusst. Dies war insbesondere bei Netzanschlüssen mit passiven Lasten, also Geräten, die nicht zur Kurzschlussleistung beitragen, wie z.B. Haushaltsgeräte und Unterhaltungselektronik, der Fall. Dabei übertrugen sich die Flickerpegel von der TS ohne Reduktion an die Netzanschlüsse. Waren an diesen Stellen Erzeuger von Flicker vorhanden, erhöhten diese den Pegel zusätzlich. Anders verhielten sich aktive Elemente wie z.B. Motoren und Generatoren, welche für den Flicker dämpfend wirkten. In diesen Fällen wurde der übertragene Pegel am Netzanschluss reduziert.

Weiter wurden in NS-Netzen mit PVA tendenziell höhere OS-Spannungen sowie bis zu doppelt so grosse Schwankungen im Vergleich zu Netzen ohne einspeisende Anlagen festgestellt. Eine PVA mit hoher Leistung konnte die OS-Spannungen des gesamten Trafokreises dominieren, die höchsten Werte traten jedoch am Netzanschluss der PV-Anlage auf. Messungen in 8 TS mit PVA (installierte Leistung > 90 kVA) zeigten Schwankungen des  $THD_U$  zwischen 1 und 2 % über den Tag und erreichten Maximalwerte von 3.3 %. Im Gegensatz dazu zeigten 8 TS ohne PVA Schwankungen des  $THD_U$  von nur 1 % mit Maximalwerten von 2.2 %. In Netzen mit PVA sind deshalb tendenziell höhere OS-Spannungen zu erwarten.

### 4.6 Repräsentative Spannungsqualitätsprofile

Das Ziel war, auf der Basis von bestehenden Messdaten von mehreren Jahren allgemeine Spannungsqualitätsprofile für die Merkmale Langzeit-Flicker, Spannungsunsymmetrie,  $THD_U$  und die Spannungsharmonischen sowie für  $THD_I$  und die Stromharmonischen zu erstellen. Repräsentative Profile sollten für verschiedene Niederspannungsnetzgebiete (beispielsweise Innenstadt, Wohngebiete, Industriegebiete, ländliche Gebiete, Sonderanlagen (ÖV)) ab Trafostation erstellt werden. Die Profile sollten für unterschiedliche Zeiträume (z.B. nur Sonntage im Sommer etc.) erarbeitet werden. Um die Profile aus den PQ-Messdaten zu erstellen, wurde die von der BFH und dem ESB entwickelte Software «PQoverview» weiterentwickelt. Sie kann Profile der verschiedenen PQ-Parameter über verschiedene Zeiträume darstellen (Fig. 6).

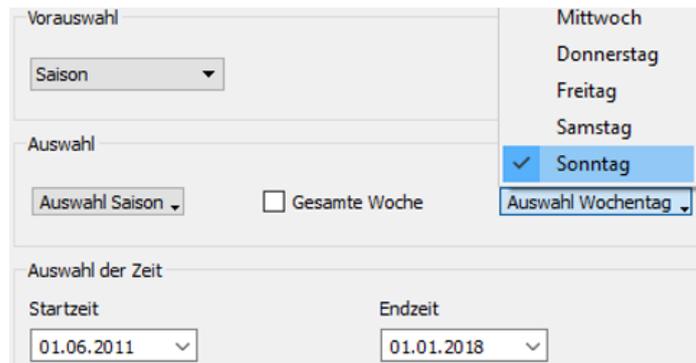


Fig. 6: Auswahl des auszuwertenden Zeitraums für einen Messpunkt

Dabei wird ein Diagramm für den gewählten Messpunkt erstellt, das den Median und die Verteilung aller verfügbaren Daten für den gewünschten Zeitraum über einen Tag zusammengefasst abbildet. Fig. 7 stellt alle Sonntage des Sommers dar, wobei die Datenverfügbarkeit auf der zusätzlichen Zeitachse mit grünen, vertikalen Strichen dargestellt ist.

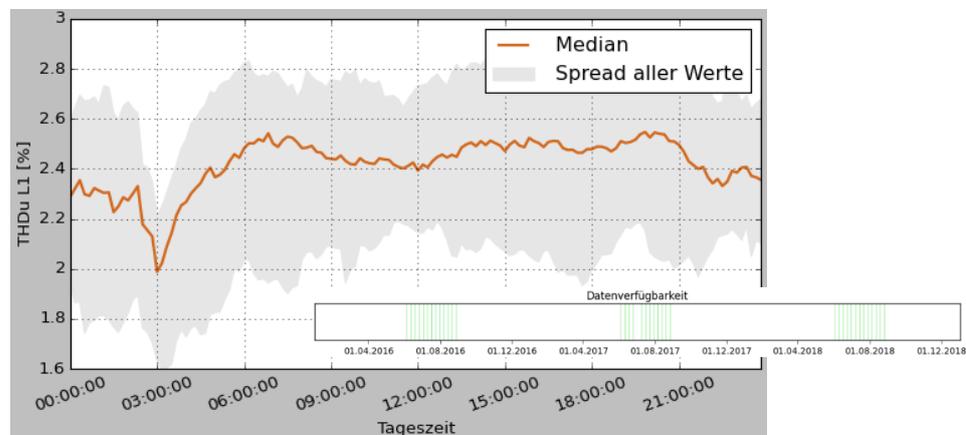


Fig. 7: Streuung der Messdaten inkl. Median an einem Messpunkt während mehrerer Jahre

Messdaten von vier Netzbetreibern standen zur Verfügung. Diese waren über verschiedene Zeiträume und aus der MS- und NS-Ebene vorhanden. Ein Grossteil der Daten stammte aus Stadtgebiet und zur Kundenstruktur waren kaum detaillierte Angaben vorhanden. An den Messdaten wurde erkannt, dass sich die Kundenstruktur an gewissen Messpunkten von einem zum anderen Jahr signifikant verändert hat, was Vergleiche verschiedener Jahre erschwerte. Zudem zeigten die verfügbaren Daten von Messpunkt zu Messpunkt unterschiedliche Verläufe, obwohl sie oft aus städtischem Gebiet stammten. Aus den genannten Gründen war es nicht möglich, repräsentative Qualitätsprofile wie oben beschrieben zu erstellen. Zur weiteren Verarbeitung der Daten wurde darum in der Web-Anwendung Jupyter [1] eine Auswertung in der Programmiersprache Python erstellt. Mit dieser Lösung konnten statistische Auswertungen mehrerer Messpunkte zusammen vorgenommen werden. Anstatt einzelne repräsentative Spannungsqualitätsprofile für spezifische Netztypen zu erstellen, kann damit die generelle Entwicklung in einem gesamten Versorgungsgebiet betrachtet werden.

Die 95%-Werte der gemessenen PQ-Parameter der vier Verteilnetzbetreiber (VNB) wurden visualisiert. Die unten dargestellten Messwerte aus den Niederspannungsnetzen wurden zwischen der Phase L1 und dem Neutralleiter gemessen. Die dargestellten Messwerte aus dem Mittelspannungsnetz wurden zwischen der Phase L1 und der Phase L2 gemessen. Bereits zwischen zwei Netzbetreibern konnten im Niederspannungsnetz deutliche Unterschiede ausgemacht werden (Fig. 8 und Fig. 9). Die Gründe für die starken Unterschiede wurden nicht untersucht. Sowohl die im Netz angeschlossenen Anlagen als auch die Dimensionierung des Netzes waren für die aufgetretenen Netzurückwirkungen verantwortlich.

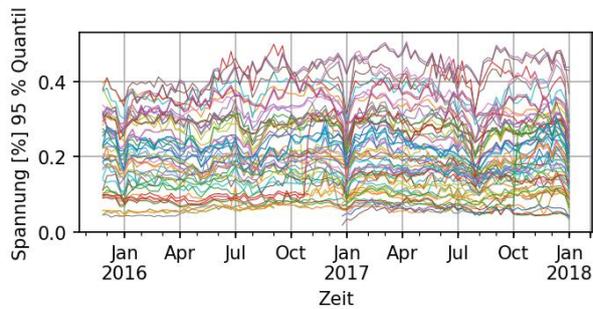


Fig. 8: 9. U-Harmonische von VNB 1 (95%-Werte)

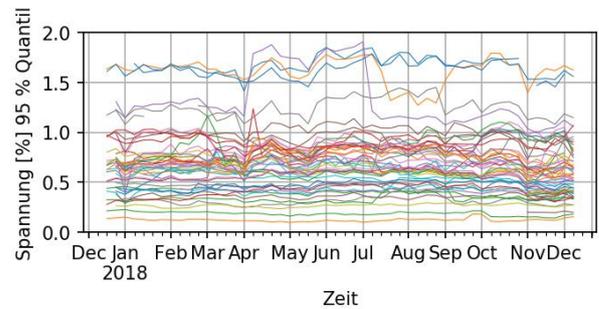


Fig. 9: 9. U-Harmonische von VNB 2 (95%-Werte)

Es fällt auf, dass Harmonische mit einem Vielfachen von drei meist auf der MS-Ebene niedriger waren als auf der NS-Ebene (Fig. 10 und Fig. 11), was an den Dyn-Transformatoren lag, welche diese Oberschwingungen von der NS- auf die MS-Seite gedämpft übertrugen. Es gilt zu beachten, dass die Messungen der MS- und NS-Ebene nicht vom gleichen Netzbetreiber stammten.

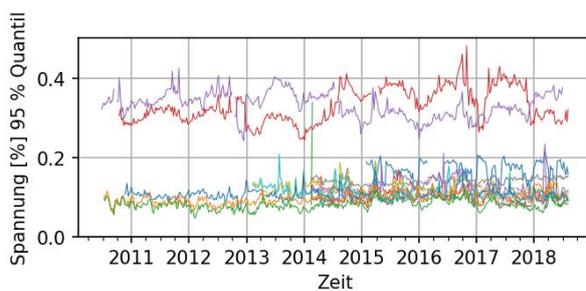


Fig. 10: 3. U-Harmonische (MS) von VNB 1 (95%-Werte)

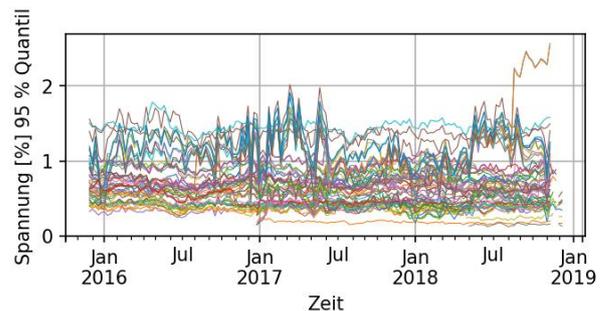


Fig. 11: 3. U-Harmonische (NS) von VNB 2 (95%-Werte)

Die Analysen zeigten, dass die PQ-Parameter keine generelle Verschlechterung über die Zeit aufwiesen. Fig. 12 stellt die 95%-Werte des  $THD_U$  von 69 Messpunkten eines Netzbetreibers im NS-Netz dar und Fig. 13 vergleicht den Verlauf des Medians der Jahre 2015-2018 aus Fig. 12. Es kann zwar erkannt werden, dass im Jahr 2018 der  $THD_U$  oftmals höhere Werte als in den Jahren zuvor aufweist, jedoch ist die Änderung in Prozent gering und die Reserve zum Grenzwert von 8 % sehr gross.

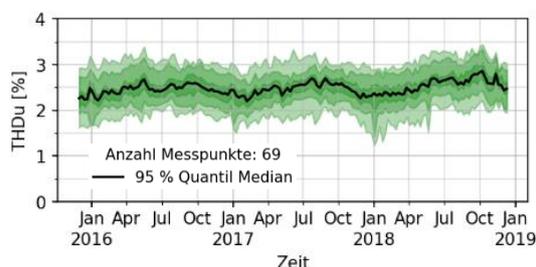


Fig. 12: Langzeitprofil des  $THD_U$  (95%-Werte)

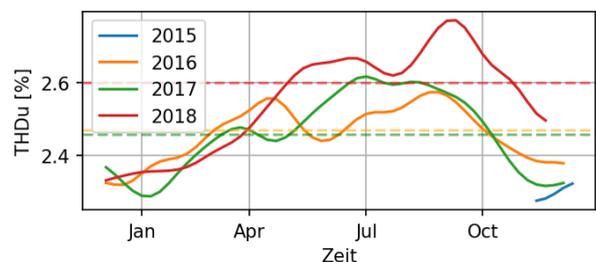


Fig. 13: Fourier-Spektrum des Profils aus Fig. 12

Schliesslich wurde in der Auswertung von verschiedenen PQ-Parametern die Qualitätsreserve in Prozent zu den Grenzwerten gemäss EN 50160 [5] berechnet. An jedem Messpunkt wurde die durchschnittliche Qualitätsreserve aller relevanten PQ-Parameter berechnet und dargestellt. Die Verläufe für die gemessenen Jahre eines Messpunktes sind in Kapitel 5.1, abgebildet.

## 5 Ergebnisse WP 2

### 5.1 Entwicklung eines Qualitätsindex (PQ-Index)

Um die PQ-Phänomene an einem Netzpunkt mit einem einzigen Indikator beurteilen zu können, soll pro Netzpunkt aus den Werten aller PQ-Parameter ein einzelner Wert berechnet und dargestellt werden: der Qualitäts- oder PQ-Index. An den PQ-Index stellen sich diverse Anforderungen. So muss dieser einfach erkennbar sein. Das heisst, der Index soll nur aus einem oder aus wenigen Werten bestehen, anhand welcher die Spannungsqualität beurteilt werden kann. Zudem müssen einzelne Ausreisser im Index zuverlässig erfasst werden: Sobald also mindestens ein Parameter eine Grenzwertverletzung aufweist, muss dies im Index repräsentiert werden. Mit dem Index muss auch erkannt werden können, wenn mehrere Parameter über die Zeit schlechter werden, auch wenn noch keine Grenzwertverletzung vorliegt. Weiter muss der Index alle Grenzwerte gemäss EN 50160 berücksichtigen und er muss die im Durchschnitt im Stromnetz vorhandenen Pegel der PQ-Parameter beachten.

Da die PQ-Parameter verschiedene Einheiten haben und sich auf unterschiedliche Grenzwerte beziehen, müssen diese zuerst in ein gemeinsames Bezugssystem gebracht werden. Im nächsten Schritt gilt es, diese «bezogenen» PQ-Parameter bei Bedarf unterschiedlich zu gewichten und anschliessend sinnvoll zu einem einzelnen gesamten Index, dem PQ-Index, zusammenzufassen (Fig. 14). Der PQ-Index soll schliesslich gemäss den Schwellwerten in Fig. 15 anzeigen, wie gut die Spannungsqualität an einem Netzknoten ist.

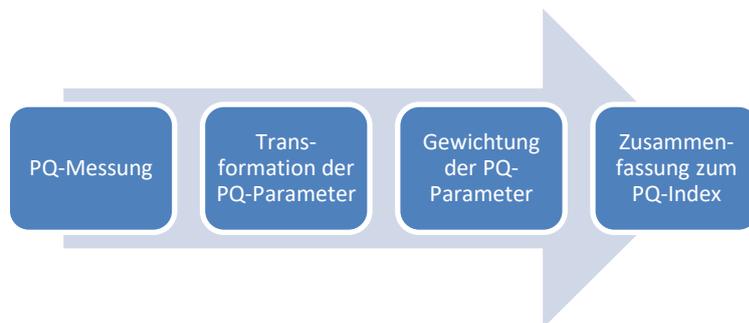


Fig. 14: Ablauf der Ermittlung des PQ-Index

PQ-Index	PQ ist:
0 < PQ-Index < 0.5	zu gut
0.5 < PQ-Index < 1.5	gut
1.5 < PQ-Index < 2	kritisch
2 < PQ-Index	schlecht

Fig. 15: Schwellwerte des PQ-Index

#### Transformation der PQ-Parameter in gemeinsames Bezugssystem

Alle gemessenen PQ-Parameter werden auf ihre Grenzwerte bezogen. Zusätzlich werden die Durchschnittswerte der im Netz auftretenden PQ-Pegel als Referenz verwendet. Die Idee ist, dass der bezogene Wert eines PQ-Parameters 1 ist, wenn der gemessene Pegel des PQ-Parameters genau dem Durchschnittswert entspricht. Die bezogenen PQ-Parameter werden auf ein Intervall von 0 bis 2 verteilt, wobei 0 dem Nennwert (N), 1 dem Durchschnittswert (D) und 2 dem Grenzwert (G) entspricht. Fig. 16 zeigt dies für den THD<sub>U</sub>. Wird ein Wert von 6 % gemessen, sind zwei Drittel des Intervalls zwischen Grenzwert und Durchschnittswert ausgenutzt. Demzufolge ist der bezogene Pegel des THD<sub>U</sub> gleich 1.66. Wird hingegen ein Pegel von 1 % gemessen, was kleiner als der Durchschnittswert von 2 % ist, liegt dieser Pegel auf der Hälfte des Intervalls zwischen Nenn- und Durchschnittswert, was einem bezogenen Pegel von 0.5 entspricht.

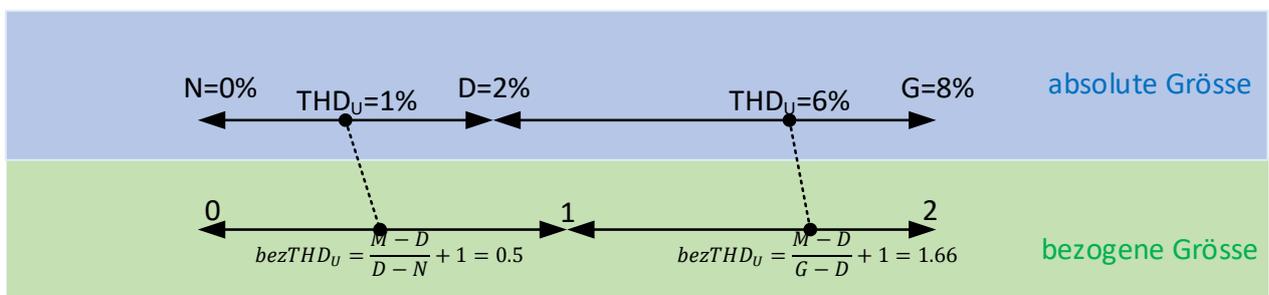


Fig. 16: Transformation des gemessenen THD<sub>U</sub> in das Bezugssystem für den PQ-Index

Ähnlich verhält es sich beim Effektivwert der Spannung. Da diese jedoch einen oberen und einen unteren Grenzwert einhalten muss, resultieren für den Spannungseffektivwert zwei bezogene Parameter. Die Durchschnittswerte sind nach den Erfahrungen des Netzbetreibers zu definieren.

## Gewichtung und Bewertung

### Lineare, quadratische und kubische Bewertung

Neben der obengenannten, linearen Bewertung können in einem weiteren Schritt die bezogenen PQ-Parameter noch unterschiedlich bewertet werden, indem diese zusätzlich quadriert oder kubiert werden. Dadurch nimmt der Wert des bezogenen PQ-Parameters stärker zu, sobald dieser den Grenzwert übersteigt, respektive stärker ab, wenn er den Durchschnittswert unterschreitet. Weitere Formen der Bewertung, wie eine logarithmische oder quartische Bewertung, wurden getestet, führten jedoch zu keinem Mehrwert, weshalb sich der PQ-Index auf die drei beschriebenen Arten der Bewertung beschränkt.

### Zusätzliche Gewichtung mittels Gewichtungsfaktor

Zusätzlich können die einzelnen bezogenen PQ-Parameter jeweils noch mit einem Gewichtungsfaktor (GF) multipliziert werden. Ziel dieses Gewichtungsfaktors ist es, auf erhöhte Pegel von kritischen PQ-Parametern eher zu reagieren als auf eine Grenzwertverletzung von weniger kritischen PQ-Parametern. Beispielsweise würde bei einem THD<sub>U</sub> von 5 bis 8 % die Norm noch eingehalten, jedoch wären bereits Auswirkungen auf Geräte möglich. Im Vergleich dazu wäre eine Grenzwertverletzung der 15. Harmonischen aufgrund des niedrigen Grenzwerts wahrscheinlicher. Da der Pegel des Grenzwerts aber relativ niedrig ist, sind nicht unbedingt negative Auswirkungen zu erwarten. Eine angemessene Gewichtung der bezogenen PQ-Parameter sollte daher von jedem Verteilnetzbetreiber individuell nach den eigenen Erfahrungen definiert werden.

## Bildung des PQ-Index

Anschließend werden die einzelnen bezogenen PQ-Parameter zu einem gesamten Index, dem PQ-Index, zusammengefasst. Der PQ-Index muss einerseits zuverlässig angeben, ob ein PQ-Parameter eine Grenzwertverletzung aufweist und andererseits auch einen Eindruck über die Entwicklung aller PQ-Parameter im Netz vermitteln. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, setzt sich der Index aus drei Teilindizes zusammen: dem arithmetischen Mittelwert der bezogenen PQ-Parameter ( $PQ_{Avg}$ ), dem maximalen bezogenen PQ-Parameter ( $PQ_{Max}$ ), sowie der 9. Wurzel des Polynoms 9. Grades aller bezogenen PQ-Parameter ( $PQ_{99}$ ):

$$PQ\ Index = \{PQ_{Avg}, PQ_{Max}, PQ_{99}\}$$

### PQ-Index von Langzeitdaten

Die BFH hat Langzeitdaten von diversen Netzbetreibern aus der Schweiz zusammengetragen. Mittels der neu programmierten Software DISQ wurden die drei Komponenten des PQ-Index,  $PQ_{Avg}$ ,  $PQ_{Max}$  und  $PQ_{99}$ , von insgesamt 122 Messpunkten berechnet und grafisch dargestellt. Fig. 17 zeigt den Teilindex  $PQ_{Avg}$ , nach welchem die mittlere Spannungsqualität im Netz im Allgemeinen sehr gut ist. Ab dem August 2018 ist eine abrupte Verschlechterung an zwei Messpunkten zu erkennen (rote Markierung). Dabei handelt es sich um einen Trafokreis in einem urbanen Wohnquartier. Die Ursache für die Verschlechterung ist vermutlich eine Sanierung der Trafostation mit gleichzeitiger Umschaltung in diesem Zeitraum.

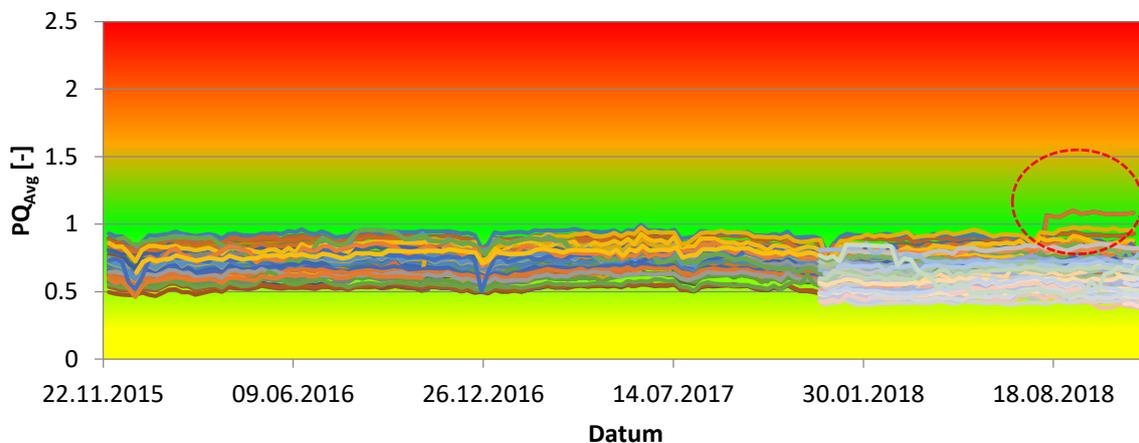


Fig. 17: Teilindex  $PQ_{Avg}$  der Langzeitdaten

## 5.2 Identifikation von Punkten mit potenziell schlechter Spannungsqualität

Massgebend für die Beurteilung von PQ-Hotspots ist der Übergabepunkt zwischen Netzbetreiber und dem Kunden, der als Netzanschlusspunkt bezeichnet wird. Ein einfacher Ansatz zur Identifizierung potenzieller PQ-Hotspots besteht darin, die relative Spannungsänderung  $d$  für symmetrische Lasten nach Formel 1 zu berechnen [6].

$$d = \frac{\Delta U}{U_V} \approx \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \cdot \cos(\Psi_{kV} - \varphi) \quad \text{Formel 1}$$

- $d$  Relative Spannungsänderung in p.u.
- $\Delta U$  Verkettete Spannungsänderung in V
- $U_V$  Verkettete Spannung am Verknüpfungspunkt in V
- $\Delta S_A$  Scheinleistungsänderung in kVA
- $S_{kV}$  Kurzschlussleistung (dreiphasig, symmetrisch) am Verknüpfungspunkt in kVA
- $\Psi_{kV}$  Netzimpedanzwinkel in °
- $\varphi$  Winkel der Laständerung in °

Wenn der Netzimpedanzwinkel  $\Psi_{kV}$  und der Winkel der Laständerung  $\varphi$  nicht gegeben sind, kann für eine Worst-Case-Betrachtung die Berechnung von  $d$  vereinfacht werden, indem der Kosinus-Term auf 1 gesetzt wird. Zur Berechnung der relativen Spannungsänderung muss die maximale Scheinleistungsänderung des/der Kunden  $\Delta S_A$  und die Kurzschlussleistung  $S_{kV}$  an allen Netzanschlusspunkten bekannt sein.  $S_{kV}$  kann in der Regel von den meisten EVU durch Netzsimulationen oder andere Tools bestimmt werden. Schwieriger ist jedoch die Leistungsänderung  $\Delta S_A$  zu bestimmen. Daher wurden verschiedene Methoden entwickelt, um  $\Delta S_A$  zu quantifizieren und  $d$  zu berechnen. Der Algorithmus mit diesen Methoden zur Bestimmung potenzieller PQ-Hotspots ist in Fig. 18 dargestellt und in [6] beschrieben.

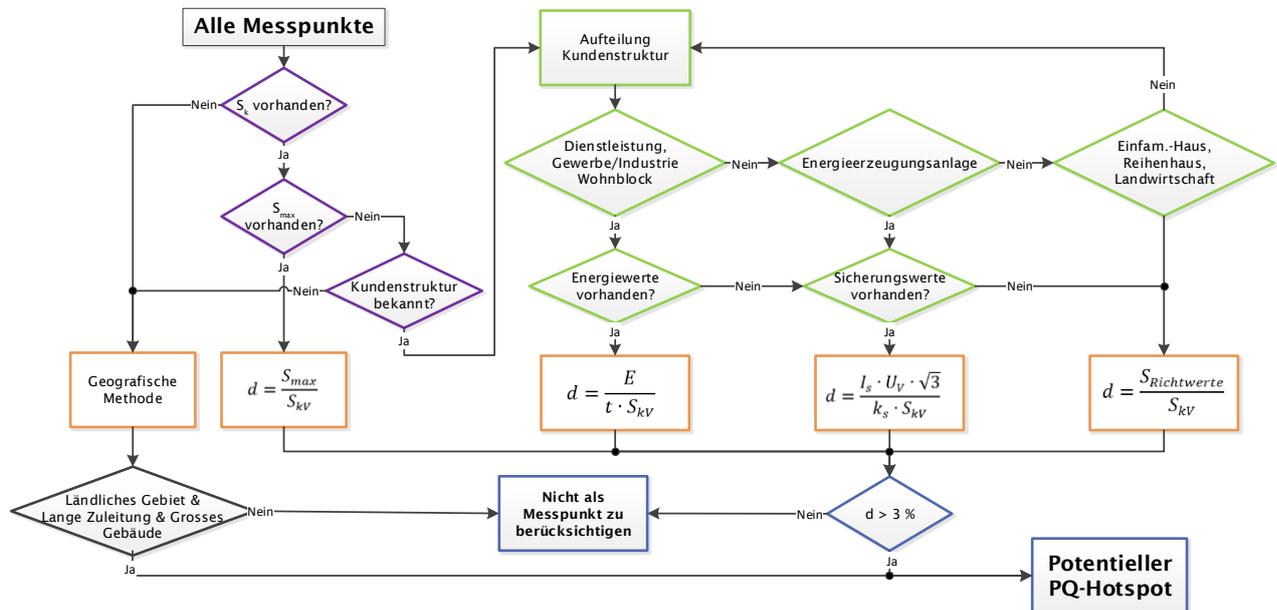


Fig. 18: Algorithmus zur Bestimmung von PQ-Hotspots

- $S_{max}$  Maximale Scheinleistungsänderung des/der Kunden in kVA (=  $\Delta S_A$  in Formel 1)
- $E$  Jährlicher Energieverbrauch in kWh
- $t$  Faktor für die Anzahl Betriebsstunden in h
- $I_s$  Bemessungsstrom der Sicherung in A
- $k_s$  Korrekturfaktor (Verhältnis zwischen dem Bemessungsstrom der Sicherung und der maximalen Stromänderungen bedingt durch die maximale Leistungsänderung)
- $S_{Richtwerte}$  Scheinleistung gemäss den Richtwerten in kVA

### 5.3 Abschätzen der Spannungsqualität beim Endkunden

Sobald die PQ-Hotspots bestimmt sind (Kapitel 5.2), kann die Anzahl der Messpunkte weiter reduziert werden, indem die Messpunkte von Hausanschlusskasten oder Verteilkabinen in Trafostationen verlegt werden. Um die PQ-Parameter in HAK und VK basierend auf Messungen in TS quantifizieren zu können, muss der Qualitätsverlust  $\Delta Q_R$  über den Leitungen für die PQ-Parameter bekannt sein (Fig. 19). Der Qualitätsverlust ist die Differenz zwischen der Qualitätsreserve  $Q_R$  von zwei Netzknoten (z.B. zwischen Knoten 1 und 2 in Formel 2).

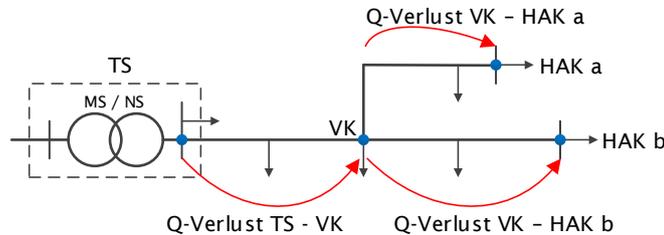


Fig. 19: NS-Netz mit zwei Netzanschlüssen (HAK a, HAK b) und die Qualitätsverluste (Q-Verlust) über den Leitungen

$$\text{Qualitätsverlust}_{1-2} = \Delta Q_{R_{1-2}} = Q_{R_1} - Q_{R_2} \quad \text{Formel 2}$$

Die Umsetzung dieses Verfahrens erfordert einen grossen Aufwand, da die kritischen Netzanschlusspunkte ermittelt werden müssen und an allen Punkten gemessen werden muss. Ziel der Studie war es daher, eine möglichst effiziente Methodik zur Bestimmung der Qualitätsverluste von Flicker- und Oberschwingungsspannungen zu finden. Das Flussdiagramm in Fig. 20 stellt das entwickelte Verfahren dar.

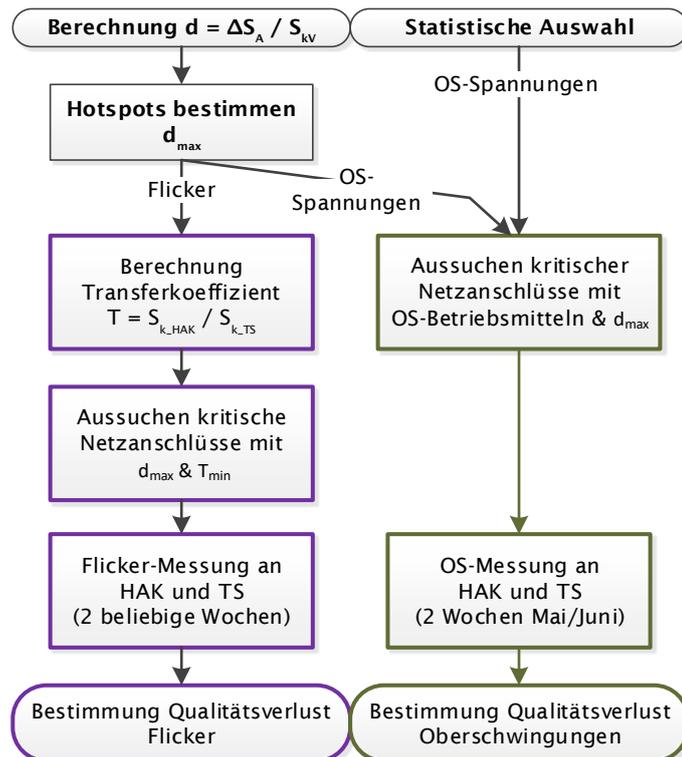


Fig. 20: Methodik zur Bestimmung des Qualitätsverlusts von Flicker und Oberschwingungsspannungen

Die erforderlichen Messungen können während rund zwei Wochen durchgeführt werden, da eine jährliche Auswertung des Langzeit-Flickers nur geringe saisonale Schwankungen ergab. Für harmonische Spannungen werden im Mai/Juni und bei hoher Sonneneinstrahlung höhere Werte erwartet. Es wird daher empfohlen, in diesen Monaten mindestens zwei Wochen lang zu messen.

Soll die Anzahl der Messstellen weiter reduziert werden, können nur jene Trafostationen mit den meisten kritischen Netzanschlüssen ausgewählt werden. Ein Vorteil der Überwachung der PQ-Parameter in einer TS besteht darin, dass ein komplettes Niederspannungsnetz abgedeckt wird und auch Informationen über die Belastung sowie über Ereignisse auf höheren Netzebenen erfasst werden können.

## 6 Empfehlungen

Die Erkenntnisse aus den unterschiedlichen Analysen haben zu praktischen Empfehlungen geführt.

### Wie wird eine PQ-Messkampagne geplant?

- Bei Messkampagnen müssen in einem ersten Schritt geeignete Messstandorte bestimmt werden. Dazu gehören ebenfalls organisatorische Abklärungen zur Zugänglichkeit der Messpunkte, die Anschlussschemata und das für die Messung erforderliche Equipment
- Vor der Installation ist abzuklären, wie die Spannungs- und Stromsensoren montiert werden können. Insbesondere bei der Installation vieler Messgeräte an einem Netzknoten ist der Platz oft begrenzt. Es empfiehlt sich eine Begehung aller Lokalitäten zur Prüfung der Anschlussmöglichkeiten.
- Nebst dem Messgerät mit seinen Strom- und Spannungssensoren ist oftmals zusätzliches Material, insbesondere für die Stromversorgung des Messgeräts (Verlängerungskabel, Steckerleisten) und für die Spannungssensoren (Abgriffe, Kabel, Sicherungen) notwendig. Der Einsatz der richtigen Messkategorie (z. B. CAT IV in TS und VK) ist zu beachten.
- Die Installation und Demontage der Messinfrastruktur ist durch geschultes Personal mit der notwendigen Schutzausrüstung durchzuführen.
- Vor dem Start der Messungen muss geprüft werden, ob die Messgeräte über die korrekte Firmware verfügen und ob die Messparameter richtig eingestellt wurden. Dazu empfiehlt sich eine Checkliste, die vor Ort bei der Geräteinstallation bzw. beim Start der Messungen ausgefüllt wird.
- Der notwendige Personenschutz für Dritte ist nach der Installation der Messgeräte wiederherzustellen. Zusätzliches Schutzmaterial kann notwendig sein, z. B. Isolationsmatten und Warnschilder.
- In einer Liste sollen das verwendete Messgerät pro Messpunkt inkl. der Bezeichnung der Strom- und Spannungssensoren dokumentiert werden.

### Was gilt es bei der Messung mit MS/NS-Spannungswandlern zu beachten?

- Unterschiedliche Messwandlertypen können verschiedene Übertragungsfehler aufweisen. Sogar einzelne Exemplare eines bestimmten Typs können vom Durchschnitt stark abweichen (Ausreisser). Wenn vorhanden, empfiehlt es sich, die Messwandler, die sich im Lager befinden, auszumessen, um einen Überblick der eigenen Messwandler zu erhalten.
- Die untersuchten Wandler (Kapitel 4.3) wiesen bis zu einer Frequenz von 1.25 kHz einen maximalen Übertragungsfehler von -3.1 % auf. In diesem Bereich können die untersuchten Wandler für Analysen von Oberschwingungsspannungen eingesetzt werden. Im Bereich von 1.25 bis 4 kHz sind je nach Wandlertyp nur noch qualitative Aussagen möglich. Gewisse Wandler weisen bei 4 kHz eine Abweichung von fast -40 % auf und sind bei dieser Frequenz nur noch für Aussagen geeignet, wenn der Messfehler des Wandlers vorgängig bestimmt und bei der Auswertung berücksichtigt wird.

### Wie können PQ-Hotspots identifiziert werden?

- Um nur kritische Netzknoten mit Messequipment auszurüsten und damit Kosten zu sparen, sollen PQ-Hotspots bestimmt und bei Bedarf mit permanenten Messungen überwacht werden. Dazu kann die relative Spannungsänderung gemäss Kapitel 5.2 verwendet werden.
- Zur Berechnung der relativen Spannungsänderung ist die maximale Leistungsänderung  $\Delta S_A$  und die Kurzschlussleistung  $S_{kV}$  an allen Netzanschlüssen zu kennen. Letztere ist für die meisten Netzbetreiber mittels Netzsimulationen oder geeigneten Tools eruiert. Schwieriger ist allerdings die Bestimmung der Leistungsänderung  $\Delta S_A$ . Es wurden in [6] verschiedene Methoden zur Erfassung von  $\Delta S_A$ , aufgezeigt. Fig. 18 in Kapitel 5.2 gibt einen Überblick.

### Wie kann die Anzahl an PQ-Messpunkten reduziert werden?

- Sobald die PQ-Hotspots bestimmt sind, kann die Anzahl der Messpunkte weiter reduziert werden, indem die Messpunkte von Hausanschlusskasten oder Verteilrkabinen in Trafostationen verlegt werden. Um die PQ-Parameter in HAK und VK basierend auf Messungen in TS quantifizieren zu können, muss der Qualitätsverlust  $\Delta Q_R$  über den Leitungen für die PQ-Parameter bekannt sein. Die Methodik ist in [6] beschrieben und in Kapitel 5.3 zusammengefasst.

### Was gilt es bei Topologieveränderungen zu beachten?

- Bei Topologieveränderungen im MS- und NS-Netz ist nicht mit kritischen Veränderungen zu rechnen, wenn in der Standardtopologie eine grosse Qualitätsreserve zu den Grenzwerten vorhanden ist. Befinden sich gewisse PQ-Parameter bereits nahe am Grenzwert, so kann ein Umbau eine Überschreitung zur Folge haben, bedingt durch die veränderte Netzimpedanz, welche die Netzurückwirkungen verstärken kann. Bei Umbauten sind insbesondere Erzeuger von hohen harmonischen Strömen zu berücksichtigen und mit ausreichend grossen Kabelquerschnitten anzubinden. Werden die Kabellängen durch eine Sterntopologie länger, sind die Querschnitte der neuen Leitungen so wählen, dass die Netzimpedanz an den Netzknoten nicht grösser und folglich die Kurzschlussleistung nicht kleiner wird.
- Im untersuchten MS-Netz (Kapitel 4.4) wurden mittels Umschaltung der UW-Abgänge vier verschiedene Netztopologien auf der MS-Ebene eingestellt. Es zeigten sich durch die vier unterschiedlichen Zustände keine signifikanten Einflüsse auf die Spannungsqualität. Eine Umschaltung auf der MS-Ebene sollte also in der Regel für die PQ-Phänomene unkritisch sein, insofern vor der Umschaltung alle Netzknoten genügend Qualitätsreserve aufweisen. Dabei muss aber die maximale Belastung der Netzelemente im Vorfeld validiert werden, um keine Betriebsmittel zu zerstören.

### Wie breiten sich PQ-Phänomene aus?

- Die Analysen auf der MS-Ebene (Kapitel 4.1) zeigten für alle PQ-Phänomene tendenziell eine mittlere bis hohe Korrelation zwischen der gemessenen Ausprägung in der TS und dem UW. Netzurückwirkungen breiteten sich folglich über das gesamte MS-Netz aus. Dies lässt sich durch die eher kleinen Ströme im Vergleich mit den Strömen auf der NS-Ebene erklären. Eine Ausnahme bildeten Abgänge mit hoher Leistung, welche lokal zu anderen Ausprägungen der PQ-Phänomene geführt haben. PQ-Phänomene auf der MS-Seite von NE-6-Trafostationen können also in den meisten Fällen, mit Ausnahme von leistungsstarken Bezüglern, mittels Messungen im UW abgeschätzt werden.
- Untersuchungen in Niederspannungsnetzen zeigten, dass PQ-Phänomene an nahe beieinanderliegenden Netzknoten mit wenigen oder leistungsschwachen Kunden oftmals ähnliche Amplituden und Formen aufwiesen. Waren die Distanzen zwischen Netzknoten eher gross und waren viele Endkunden an den Verknüpfungspunkten angeschlossen, war die Korrelation zwischen den Netzknoten eher schwach oder gar nicht vorhanden.
- Simulationen der NE 6 zeigten, dass es wichtig ist, die Vorbelastung aus dem MS-Netz, sprich die MS-Spannung, im Modell zu verwenden. Wurde die im MS-Netz gemessene Spannung nicht berücksichtigt, sondern eine ideale 50-Hz-Sinusspannung hinterlegt, wiesen Simulation und Messung grosse Abweichungen auf. Damit zuverlässige Modelle geschaffen werden können, sind deshalb in nächsten Studien Überlegungen zur vereinfachten Mitberücksichtigung des MS-Netzes anzustellen. In [2] wurden Faktoren aufgelistet, die es zu berücksichtigen gilt, um möglichst zuverlässige Simulationsergebnisse zu erhalten.

### Wann sind repräsentative Spannungsqualitätsprofile hilfreich?

- Für PQ-Analysen ist es von hohem Interesse, Messdaten klar zu kategorisieren (Wohngebiet, Industrie, Gewerbe etc.). Idealerweise wird zu jedem Messpunkt dokumentiert, wie viele Kunden von welchem Kundentyp versorgt werden. Sonderanlagen und signifikante Änderungen im betrachteten Versorgungsgebiet sind zu erwähnen. Dies vereinfacht das Erkennen der Erzeuger von gewissen Phänomenen.
- Das Erstellen von Spannungsqualitätsprofilen ist für einzelne Messpunkte sinnvoll, beispielsweise um die Qualitätsreserve, also die Differenz zwischen Grenzwert und dem grössten Messwert, zu berechnen und über die Jahre zu vergleichen. Dabei sollen Ausreisser nicht betrachtet werden. Es ist zu prüfen, ob zum Beispiel die Darstellung von 99.5 %, 99 % und 95 % keine Ausreisser mehr darstellen und ähnliche Ergebnisse liefern.
- In einem ersten Schritt empfiehlt es sich, die Schar der Messdaten aus dem gesamten Messgebiet zu betrachten, um einen Überblick über das Messgebiet zu erhalten. Danach können Eigenheiten der Messdaten im Detail betrachtet und allenfalls auf einzelne Anlagen zurückverfolgt werden.

- Sollen repräsentative Spannungsqualitätsprofile für einen bestimmten Netztyp/Kundentyp erstellt werden, so muss genau bekannt sein, welche Kundentypen an den betrachteten Netzknoten angeschlossen sind.

## 7 Zielerreichung

Die für die beiden Arbeitspakete WP 1 und WP 2 festgelegten Ziele wurden durch die Beantwortung der Forschungsfragen aus Kapitel 3.2 erreicht. Die Ergebnisse wurden in den Kapiteln 4 und 5 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. Zum Beispiel wurde nicht nur die Ausbreitung/Übertragungen von Spannungs- und Stromharmonischen untersucht, sondern auch von Spannungseffektivwert, Flicker und Unsymmetrie. Die Einschränkungen bei den definierten Sollzielen sind im Folgenden erklärt:

### WP 1: PQ-Analysen (Schwingungen)

- Repräsentative Spannungsqualitätsprofile: Bei der Analyse der Langzeitdaten stellte sich heraus, dass die meisten Daten aus städtischem Gebiet stammten und dass nicht spezifiziert worden war, welcher Kundentyp jeweils versorgt wurde. Repräsentative Spannungsqualitätsprofile für unterschiedliche Netztypen/Kundentypen konnten damit nicht erstellt werden. Dafür wurden umfassende Auswertungen für alle PQ-Parameter über den gesamten Zeithorizont der vorhandenen Daten angefertigt.
- Einfluss von grossen MS/HS-Bezügern: Diese Untersuchung war davon abhängig, ob sich bereits leistungsstarke Bezüger in den untersuchten Netzen befanden. Ausserdem konnte der Einfluss nur dann untersucht werden, wenn auf der Mittelspannungsebene auch Wandler zur Spannungsmessung installiert waren.

## 8 Ausblick

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

- WP 3: Regelstrategien mit dezentralen Anlagen
- WP 4: Effekt der Zunahme von nichtlinearen Geräten auf die Ausbreitung von Oberschwingungen und auf die Netzimpedanz
- WP 5: Zielnetzimpedanz

Die Ergebnisse der Arbeitspakete WP 1 bis WP 4 flossen 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 wurden im Arbeitspaket WP 5 des Projekts fortgesetzt. Die Berechnung des PQ-Index wurde im Arbeitspaket WP 5 in das Tool «ZNP light» integriert, um verschiedene Netzvarianten und Netzknoten miteinander vergleichen zu können.

Vor zukünftigen Überarbeitungen der Software PQoverview müsste überlegt werden, welche Funktionen aus der programmierten Webanwendung Jupyter implementiert werden sollen.

## 9 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.

## 10 Glossar

fNI	Frequenzabhängige Netzimpedanz
GF	Gewichtungsfaktor
HAK	Hausanschlusskasten
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
OS	Oberschwingung
PQ	Power Quality
THD <sub>U</sub>	Gesamtüberschwingungsgehalt der Spannung
TS	Trafostation
U-Harmonische	Spannungsharmonische
UW	Unterwerk
VNB	Verteilnetzbetreiber
VK	Verteilkabine
WP	Work Package (Deutsch: Arbeitspaket)

## 11 Abbildungsverzeichnis

Fig. 1: Korrelation der PQ-Phänomene zwischen 25 TS und deren UW .....	2
Fig. 2: Gemessene Übersetzungsfehler von Typ 2 (durchgezogen) und Typ 3 (gestrichelt) .....	4
Fig. 3: Gemessene Übertragungsfehler von Typ 1 (durchgezogen), 4 (gepunktet) und 5 (gestrichelt) .....	4
Fig. 4: Schema des analysierten MS-Netzes mit Standard-Schaltzustand .....	5
Fig. 5: NS-Netztopologie vor (links) und nach (rechts) dem Umbau .....	5
Fig. 6: Auswahl des auszuwertenden Zeitraums für einen Messpunkt .....	7
Fig. 7: Streuung der Messdaten inkl. Median an einem Messpunkt während mehrerer Jahre .....	7
Fig. 8: 9. U-Harmonische von VNB 1 (95%-Werte) .....	8
Fig. 9: 9. U-Harmonische von VNB 2 (95%-Werte) .....	8
Fig. 10: 3. U-Harmonische (MS) von VNB 1 (95%-Werte) .....	8
Fig. 11: 3. U-Harmonische (NS) von VNB 2 (95%-Werte) .....	8
Fig. 12: Langzeitprofil des THD <sub>U</sub> (95%-Werte) .....	8
Fig. 13: Fourier-Spektrum des Profils aus Fig. 12 .....	8
Fig. 14: Ablauf der Ermittlung des PQ-Index .....	9
Fig. 15: Schwellwerte des PQ-Index .....	9
Fig. 16: Transformation des gemessenen THD <sub>U</sub> in das Bezugssystem für den PQ-Index .....	9
Fig. 17: Teilindex PQ <sub>Avg</sub> der Langzeitdaten .....	10
Fig. 18: Algorithmus zur Bestimmung von PQ-Hotspots .....	11

Fig. 19: NS-Netz mit zwei Netzanschlüssen (HAK a, HAK b) und die Qualitätsverluste (Q-Verlust) über den Leitungen ..... 12

Fig. 20: Methodik zur Bestimmung des Qualitätsverlusts von Flicker und Oberschwingungsspannungen..... 12

## 12 Referenzen

- [1] [Online]. Available: [www.jupyter.org](http://www.jupyter.org).
- [2] P. Noth, «Spannungsqualitäts-Messungen im Mittelspannungsnetz der BKW – Projektarbeit 2,» Berner Fachhochschule, Nidau, 2017.
- [3] R. Stiegler, J. Meyer und P. Schegner, «Portable Measurement System for the Frequency Response of Voltage Transformers,» IEEE, Technische Universität Dresden, 2012.
- [4] M. Klatt, J. Meyer, M. Elst und P. Schegner, «Frequency Responses of MV voltage transformers in the range of 50 Hz to 10 kHz,» 2010.
- [5] «EN 50160, Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen,» 2010.
- [6] P. Noth, «Effizientes Spannungsqualitäts-Messmanagement,» Berner Fachhochschule, Ostermundigen, 2018.
- [7] «D-A-CH-CZ – Technical Rules for the Assessment of Network Disturbances,» VSE; VEÖ; VDN; CSRES, Aarau, 2007.

## 13 Versionskontrolle

Version	Datum	Beschreibung	Autor
V0.0	13.6.2019	Bericht erstellt und korrigiert	Stefan Schori
V1.0	17.6.2019	Freigabe	Stefan Schori
V1.1	20.7.2020	Bericht ergänzt	Lukas Heiniger
V1.2	6.10.2020	Korrekturen und Ergänzungen	Stefan Schori
V2.0	30.10.2020	Korrekturen, Freigabe	Stefan Schori