

Power Quality Index: Erfahrungen und Umsetzung

DI Dr. Werner Schoeffer

ARTEMES GmbH

Hauptplatz 105

A-8552 Eibiswald

+43 664 5403106

werner.schoeffer@artemes.org

www.artemes.org

Kurzfassung: Bereits beim letzten Grazer Energie-Innovationssymposium wurde über Überlegungen zu einem Power Quality Index berichtet [1]. In einer einfachen Kennzahl sollte die nicht geringe Menge an Kennwerten der Spannungsqualität zusammengefasst werden [2]. Ziel war es einerseits Langzeitbeobachtungen durchführen zu können und andererseits dem/der nicht so im Detail versierten Anwender_in eine Übersicht über die Netzqualität zu geben.

Spannungsqualität wird auch aufgrund einer ständig steigenden Anzahl an Energiekonzepten für Industrie- und Gewerbebetriebe auf der Anwender_innenseite immer aktueller. Die interne und die externe Versorgungssicherheit sollte ja eben auch in solchen Konzepten ein integraler Bestandteil sein.

Aktuelle Entwicklungen der Verbraucherstruktur, speziell der Leistungselektronik, und neue Normen mit Limits für höhere Frequenzbänder [4, 5] weiten das Thema Spannungsqualität bis 150 kHz aus.

In diesem Paper sollen jetzt erste Erfahrungen mit diesem Wert gezeigt und auch aktuelle Fragestellungen angesprochen werden.

Wie kann so ein Wert als integraler Bestandteil von Energiekonzepten Anwendung finden?

Wie verhält sich der Wert in der Realität tatsächlich und können daraus wirklich Rückschlüsse gezogen werden?

Wie könnten die neuen Frequenzbänder bis 150 kHz in so einem Wert einbezogen werden?

Keywords: KPQ, Power Quality Index, PQ Monitoring

Inhalt

1	Einleitung	3
2	KPQ Berechnung	3
2.1	Das Verfahren der Berechnung im Einzelnen.....	5
2.1.1	Zeitreihen	5
2.1.2	Berechnung der Wochenwerte	5
2.1.3	Berechnung des Abstandes vom Grenzwert	5
2.2	Behandlung der höheren Harmonischen	5
2.3	Berechnung des KPQ.....	6
2.4	Berechnung des gesamten KPQ mehrerer Messstellen	7
2.5	Berechnung der Gradienten	7
3	Beispiel PV Wechselrichter	8
4	KPQ Praxisbeispiel.....	10
5	Bewertung mit neuen Methoden der künstlichen Intelligenz	12
6	Messtechnik	13
6.1	Gemessene Parameter	13
7	Zusammenfassung und Ausblick	14
7.1	Ausblick.....	14
8	Verzeichnisse	15
8.1	Literaturnachweis:	15
8.2	Abbildungsverzeichnis.....	15
8.3	Tabellenverzeichnis.....	15

1 Einleitung

In diesem Paper wird der an der letzten Energie-Innovationstagung vorgestellte KPQ Parameter (Kubischer Power Quality Index, [1]) um die neuen Frequenzbänder bis 150 kHz erweitert [4,5].

Weiters soll ein Praxisbeispiel mit einem Photovoltaik Wechselrichter verdeutlichen, warum diese Frequenzbänder an Bedeutung zunehmen.

Der KPQ wird in Folge anhand des Beispiels berechnet und die Ergebnisse werden erläutert.

Wie der KPQ künftig zur Betrachtung von mehreren Messtellen in Netzen verwendet werden könnte und was moderne Methoden der künstlichen Intelligenz (machine learning) aus den Netzqualitätsparametern ableiten können, werden in einem weiteren Abschnitt angesprochen.

Zuletzt wird ein Ausblick gegeben, wie somit künftig das Thema Monitoring zur Lösung von Netzqualitätsproblemen aussehen könnte.

2 KPQ Berechnung

Die Spannungsqualität wird üblicherweise durch folgende Faktoren beschrieben:

- Spannung
- Frequenz
- Flicker
- Oberschwingungen und THD
- Symmetrie
- Einsenkungen und Überhöhungen

Wie in den Anhängen zur IEC 6100-2-2 [4, 5] definiert, kommen jetzt höherfrequente Phänomene neu hinzu, welche in Frequenzbändern bis 9 kHz bzw. 150 kHz beschrieben werden. D.h. es ist anzuraten, künftig eine Betrachtung der höherfrequenten Anteile in das Monitoring der Spannungsqualität einzubeziehen, da durch neue leistungselektronische Komponenten, die höhere Schaltfrequenzen erlauben, weniger die bisher erfassten Harmonischen als vielmehr die höherfrequenten Bänder in den Vordergrund treten werden. Neue finanziell vertretbare Wandler-Technologien lassen eine Betrachtung dieser Frequenzen im Mittelspannungsnetz ebenfalls zu.

Zusätzlich zu den genannten Faktoren wird auch die Verfügbarkeit aufgezeichnet, welche aber im hier dargestellten Index, der die stationären Größen wiedergeben soll, ausgeklammert bleibt.

Zu jedem der genannten Faktoren werden in der europäischen Netzqualitätsnorm EN 50160 bzw. IEC 61000-2-2 (höherfrequente Bänder) ein oder mehrere Grenzwerte definiert. Spannung und Frequenz müssen innerhalb eines Bandes bleiben, die anderen Parameter besitzen einen Höchstwert.

Für ein effizientes Monitoring, welches sowohl für detaillierte Analysen als auch für simple Trenderkennung geeignet sein soll, wird ein neuer kubischer Power Quality Index (KPQ) eingeführt, welcher die Ausnutzung des Grenzwertbandes jedes Parameters berücksichtigt und in einem Summenwert wiedergibt.

Daher werden die Werte zunächst in Prozent der Nutzung des Toleranzbandes berechnet.

- 0% = Null (THD, PLT, U₂) oder Nominalwert (U, f)
- 100% = Grenzwert erreicht (positiver oder auch negativer bei U und f)
- 50%...z.B. bei Flicker PLT=0.5 (1 wären 100%)

Die Werte werden im Anschluss mit folgender Formel addiert, wobei bei Mehrphasensystemen immer der höchste Phasenwert herangezogen wird.

$$KPQ = \sqrt[3]{U_{max}^3 + THD_{max}^3 + PLT_{max}^3 + U_2^3 + f^3 + \sum U_{hmax_i}^3 + HF9^3 + HF150^3}$$

Formel 1: KPQ

U_{max} ... höchster Phasenwert der 99% Wochenwerte der 10 Minuten Spannungshübe (bzw. 95% in der Niederspannung)

THD_{max} ... höchster Phasenwert der 95% Wochenwerte der 10 Minuten THD Werte

PLT_{max} ... höchster Phasenwert der 95% Wochenwerte der 2 Stunden Flickerwerte

U_2 ... 95% Wochenwert der 10 Minuten Mittelwerte des Gegensystems (Symmetrie)

f ... 99% Wochenwert der 10 Sekundenwerte

U_{hmax_i} ...95% Wochenwert jeder einzelnen zu betrachtenden Harmonischen

$HF9$...95% Wochenwert des Höherharmonischen Faktors bis 9kHz

$HF150$... 95% Wochenwert des Höherharmonischen Faktors bis 150kHz

Der Wert wird durch die kubische Summierung auf große Werte hin gewichtet. Für Netze, deren Spannungsqualitätsparameter im Normbereich sind, ergibt sich immer ein Wert zwischen 0 und 1 (100%), bei Grenzwertverletzungen ist dieser über 1.

Ist nur ein Wert groß, wird der gesamte Wert groß. Sind mehrere Werte groß, wird der Gesamtwert meist aber nicht größer 1. Erst wenn ein Wert größer 1 ist, wird der KPQ insgesamt größer 1.

- D.h.: sind alle Werte im Toleranzbereich, bleibt der Wert nahezu immer unter 1.
- Wird mindestens ein Wert verletzt, wird der KPQ automatisch größer 1.

Der Trend des KPQ zeigt deutlich die Charakteristik einer Messstelle: ob die Power Quality besser oder schlechter wird bzw. ob ein oder mehrere Grenzwerte verletzt werden.

2.1 Das Verfahren der Berechnung im Einzelnen

2.1.1 Zeitreihen

Im ersten Schritt werden die Datenreihen der einzelnen Parameter gemessen. Sind die Daten nicht bereits im genormten Zeitintervall verfügbar, dann werden sie im nächsten Schritt auf die Zeitnormale interpoliert.

- Spannung, THD, Unbalance, Harmonische, Höherfrequente Bänder... 10 Minuten
- F...10 Sekunden
- PLT 2 Stunden

2.1.2 Berechnung der Wochenwerte

Im nächsten Schritt werden die Wochenwerte gebildet. Dazu werden die Zeitreihen auf die einzelnen Kalenderwochen aufgeteilt. Der charakteristische Wochenwert wird immer zum jeweiligen Quantilwert berechnet.

- Spannung ... 99% (Hub in der Mittelspannung) bzw. 95% (Niederspannung)
- THD ... 95%
- PLT Flicker ... 95%
- Symmetrie U2 ... 95% (nur Niederspannung)
- Harmonische und Höherfrequente Bänder ... 95%

Für die Mittelspannung wird für die Ermittlung der Spannung auf die Spannungshubmethode nach [1] verwiesen: *„Der Spannungshub ist definiert als die Differenz zwischen höchster und tiefster Spannung innerhalb des Beobachtungszeitraums. Für die Auswertung der Messergebnisse werden die beiden Werte $Hub_{max} = Q_{100\%} - Q_0\%$ und $Hub_{99} = Q_{99\%} - Q_1\%$ berechnet.“* In der Niederspannung wird das Band von +/-10% bezogen auf die Nennspannung (230V) herangezogen.

2.1.3 Berechnung des Abstandes vom Grenzwert

Die Wochenwerte werden im nächsten Schritt gegen die Grenzwerte hin berechnet, wobei immer die Ausnutzung des Grenzwertbandes benötigt wird, d.h.:

- Ist der Flicker z.B. 0,4 bei einem Grenzwert von 1, nutzt er den Bereich daher zu 40% aus.
- Ist der Flicker 1,5, dann wäre der Wert 150%.
- Ist die Spannung z.B. 105% bei einem Toleranzband von 90%-110%, ist der Wert 50%, selbiges gilt bei 95%.

2.2 Behandlung der höheren Harmonischen

Für die höheren Harmonischen wird die Einführung eines Kennwertes empfohlen, welcher sich wiederum aus der Ausnutzung der Werte zum Grenzwert hin bildet. Da in der derzeit gültigen EN 50160 noch keine Grenzwerte definiert sind bzw. diese Werte noch nicht berücksichtigt werden, werden jene aus IEC 61000-2-2:2018 Amd1 und Amd2 herangezogen. Die Grenzwerte bis 150 kHz gelten dabei nur für Niederspannung. Für die Mittelspannung bis 9 kHz werden dieselben wie für die Niederspannung verwendet.

$$HF9 = \sqrt{\sum_{i=1}^{i_{\max}} \left(\frac{SH_i}{SHLIM_i} \right)^2} \quad \text{Formel 2: HF9}$$

i..Index der Höherharmonischen, wobei diese als Frequenzbänder von 2 bis 9kHz mit einer Schrittweite von 200Hz angegeben werden (Siehe EN 61000-4-30 Ed3; Anhang C.2 bzw. IEC 61000-4-7:2002 Anhang B).

i..Index der Höherharmonischen, wobei diese als Frequenzbänder von 8 bis 150kHz mit einer Schrittweite von 2kHz angegeben werden (Siehe EN 61000-4-30 Ed3, Anhang C.3).

i_{\max} ...Anzahl an Schritten von i

SH_i ...Wert der Höherharmonischen; Maximum der 3 Phasenwerte

$SHLIM_i$...Grenzwert der Höherharmonischen nach [4]

Entsprechend ergibt sich auch ein Faktor für die Höchstharmonischen (nur Niederspannung) wie folgt:

$$HF150 = \sqrt{\sum_{i=1}^{i_{\max}} \left(\frac{SH_i}{SHLIM_i} \right)^2} \quad \text{Formel 3: HF150}$$

i..Index der Höherharmonischen, wobei diese als Frequenzbänder von 8 bis 150kHz mit einer Schrittweite von 2kHz angegeben werden (Siehe EN 61000-4-30 Ed3, Anhang C.3).

i_{\max} ...Anzahl an Schritten von i

SH_i ...Wert der Höherharmonischen; Maximum der 3 Phasenwerte

$SHLIM_i$...Grenzwert der Höherharmonischen nach [5]

2.3 Berechnung des KPQ

Zunächst werden jeweils die Maxima der einzelnen Phasen gebildet.

Leiterspannungen: typischerweise Mittelspannung

- $U_{\max} = \text{MAX}(U12, U23, U31)$
- $\text{THD}_{\max} = \text{MAX}(\text{THD12}, \text{THD23}, \text{THD31})$
- $\text{PLT}_{\max} = \text{MAX}(\text{PLT12}, \text{PLT23}, \text{PLT31})$
- $U_{\text{hmax}i} = \text{MAX}(U_{h12i}, U_{h23i}, U_{h31i})$

Phasenspannungen: typischerweise Niederspannung

- $U_{\max} = \text{MAX}(U1, U2, U3)$
- $\text{THD}_{\max} = \text{MAX}(\text{THD1}, \text{THD2}, \text{THD3})$
- $\text{PLT}_{\max} = \text{MAX}(\text{PLT1}, \text{PLT2}, \text{PLT3})$
- $U_{\text{hmax}i} = \text{MAX}(U_{h1i}, U_{h2i}, U_{h3i})$

Der KPQ wird jetzt für jede Woche aus den einzelnen Werten wie folgt berechnet:

$$KPQ = \sqrt[3]{U_{max}^3 + THD_{max}^3 + PLT_{max}^3 + U_2^3 + f^3 + \sum U_{hmax_i}^3 + HF9^3 + HF150^3}$$

Formel 4: KPQ

U_{max} ... höchster Phasenwert der 99% Wochenwerte der 10 Minuten Spannungshübe (bzw. 95% in der Niederspannung)

THD_{max} ... höchster Phasenwert der 95% Wochenwerte der 10 Minuten THD Werte

PLT_{max} ... höchster Phasenwert der 95% Wochenwerte der 2 Stunden Flickerwerte

U_2 ... 95% Wochenwert der 10 Minuten Mittelwerte des Gegensystems (Symmetrie)

f ... 99% Wochenwert der 10 Sekundenwerte

U_{hmax_i} ...95% Wochenwert jeder einzelnen zu betrachtenden Harmonischen

$HF9$...95% Wochenwert des Höherharmonischen Faktors bis 9kHz

$HF150$... 95% Wochenwert des Höherharmonischen Faktors bis 150kHz

Sind an einer Messstelle einzelne Parameter nicht vorhanden, dann können diese einfach weggelassen werden. Das wären z.B. die Höherharmonischen bei klassischen Messstellen. Ebenso erlaubt die Formel die Einbindung von Messstellen, welche nicht alle Parameter messen. Das könnten z.B. Smart Meter sein, welche zwar teilweise nach der Messgerätevorschrift [3] messen, aber z.B. Flicker nicht.

2.4 Berechnung des gesamten KPQ mehrerer Messstellen

Werden mehrere Messstellen betrachtet und möchte man einen gesamten Index berechnen, gibt es je nach Fragestellung wiederum mehrere Möglichkeiten.

- Median...Trenderkennung
- Maximalwert...Ausreißer erkennen
- Q95...Extrema erkennen und einzelne Ausreißer eliminieren

Daher wir hier die bisher gängige Betrachtung [6] einzelner Spannungsqualitätsparameter empfohlen. Es sind die Werte Max, Q95, Median, Q5 und Min über alle zu betrachtenden Messstellen zu bilden.

2.5 Berechnung der Gradienten

Für die Betrachtung, wie sich ein Netz verändert, ist nicht der absolute Wert des KPQ wichtig, sondern die Veränderung. Eine Bildung eines zeitlichen Gradienten ist daher notwendig.

3 Beispiel PV Wechselrichter

Im folgenden Kapitel wird die Funktion des KPQ mit dem Beispiel eines PV Wechselrichters gezeigt.

Gemessen wurde am Hausanschluss eines Einfamilienhauses mit einer typischen Photovoltaikanlage mit einer Spitzenleistung von 5kW. Die folgende Grafik zeigt den zunächst unspektakulären Spannungsverlauf über 3 Tage.



Abbildung 1: Spannungsverlauf am Hausanschluss, PV Wechselrichter 5kW

Betrachtet man die Spannung im Detail in hoher zeitlicher Auflösung, dann wird man feststellen, dass zwar der Sinus vom idealen Sinus bereits stark abweicht, die Verzerrung (THD) aber im Toleranzbereich liegt. Dieser Kurvenverlauf verhält sich im gesamten Zeitbereich ähnlich. Eine tageszeitliche Abhängigkeit ist nicht zu beobachten.

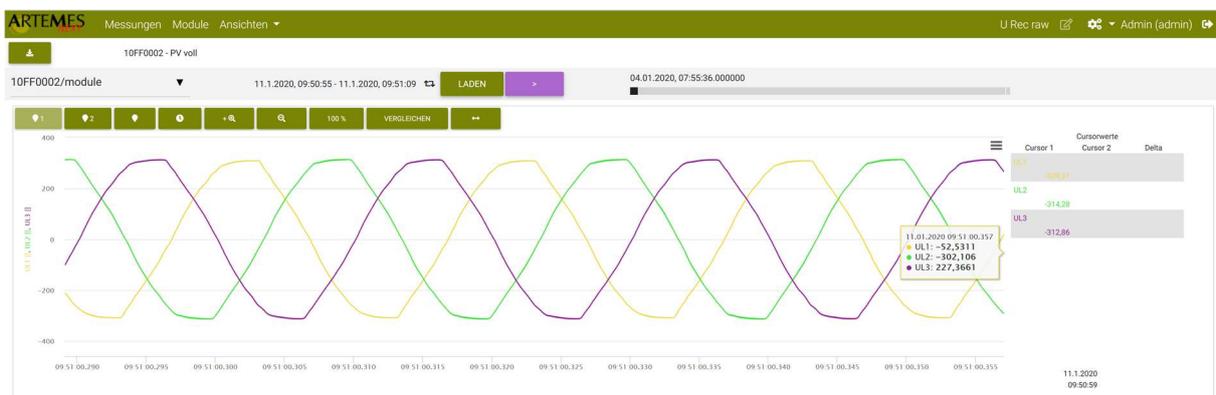


Abbildung 2: Spannungssinus: zunächst zeigt dies die heute übliche Verformung durch Schaltnetzteile

Betrachtet man aber z.B. den Scheitel im Detail und löst die Zeit noch höher auf (dargestellt sind hier 2ms), dann wird man eine nicht unwesentliche Schwingung mit 20 kHz entdecken. Man wird auch feststellen, dass diese Schwingung nur bei Sonneneinstrahlung, also der Arbeitszeit des Wechselrichters existiert.



Abbildung 3: Detail am Scheitel des Sinus: ca. 20 kHz Schwingung, wenn der PV Wechselrichter arbeitet

Hier kommen die Frequenzbänder 8-150 kHz zum Einsatz. Man erkennt in der folgenden Grafik deutlich die dominanten Bänder rund um 20kHz. Die Grenzwertkurve entspricht der neuen Erweiterung der Grenzwertnorm für öffentliche Niederspannungsnetze [5].

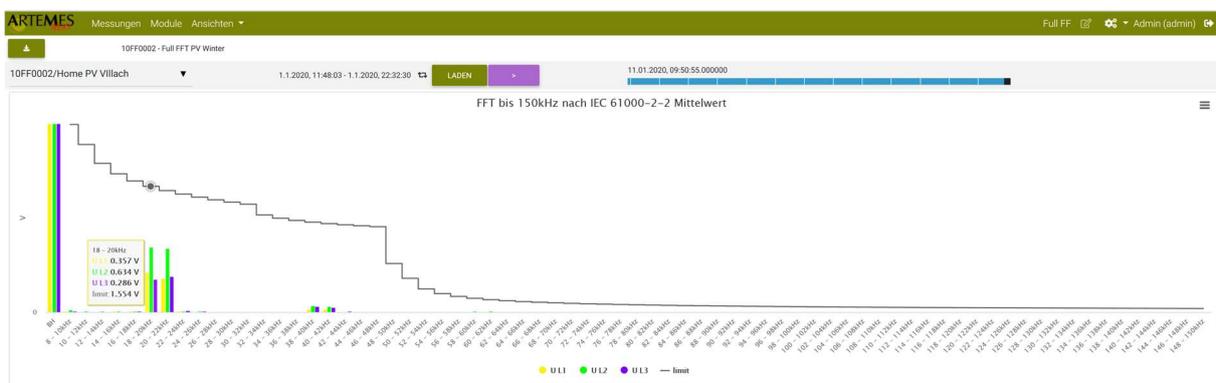


Abbildung 4: Betrachtung in Frequenzbändern und Limit nach IEC 61000-2-2 [5]

Löst man die Zeit noch höher auf, dann erkennt man weitere hochfrequente Anteile im Bereich von 300kHz. Hier gibt es derzeit keine Messvorschrift und auch keine Grenzwerte. Man kann aber daraus ableiten, dass auch dieser Bereich künftig zu bewerten sein wird. Die gegenwärtigen Entwicklungen im Bereich der Leistungselektronik mit Schaltfrequenzen in diesem Bereich zeigen dies auch deutlich. Die folgende Grafik zeigt 1ms der Spannung und die genannte Schwingung von 300kHz überlagert auf der 20kHz Schwingung. Die 300kHz wurden auch in der Nacht, also der Nichtbetriebszeit des PV-Wechselrichters beobachtet.



Abbildung 5: zusätzliche überlagerte Schwingung mit ca. 300kHz – über den Grenzwerten nach [5]

4 KPQ Praxisbeispiel

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie sich der KPQ mit dem Betrieb des in Kapitel 3 besprochenen PV-Wechselrichters verändert und wie man das in Einzelschritten herausarbeiten kann.

Als Erstes soll hier einfach der KPQ als Ergebnis für den Betrieb mit bzw. ohne Wechselrichter erwähnt werden. Der Unterschied von fast 10 Prozent zeigt deutlich, dass es eine Veränderung an der Messstelle gegeben hat:

Betriebsart	KPQ [%]
Ohne PV Wechselrichter	41
Mit PV Wechselrichter (5 kW)	46

Tabelle 1: KPQ bei Betrieb mit und ohne Wechselrichter

Die Veränderung wurde deutlich anhand des einfachen KPQ bereits erkannt. Jetzt gilt es den Grund der Werteänderung zu finden. Betrachtet man die Zwischenergebnisse im Einzelnen, dann stellt man fest, dass es der Wert HF150 ist, der die Erhöhung bewirkt hat.

Die folgende Tabelle zeigt die einzelnen Zwischenwerte. Gelb dargestellt sind die Werte des HF150. Bereits jetzt lässt sich vermuten, dass die Ursache bei einer Quelle höherer Frequenzen liegen muss.

	Bsp 1 Betrieb ohne PV Wechselrichter	Bsp 2 PV Wechselrichter 5 kW
U	1,9%	2,6%
THD U	34,5%	33,1%
PLT	30,0%	30,0%

f	4,1%	4,0%
Symm	9,5%	12,5%
HF9	6,2%	5,1%
HF150	12,0%	32,0%
KPQ	41%	46%

Tabelle 2: KPQ im Detail

Weitere Detailanalysen zeigen, dass die hohen Frequenzbänder 20kHz und 22kHz die Erhöhung des Wertes erwirkt haben. Man kann diese in der folgenden Grafik aus dem Spektrum 8-150 (oben rechts, gültig für den Cursorwert im Rekorderfenster) bzw. aus dem Zeitverlauf (blaue und rote Kurve) herauslesen.



Abbildung 6: Frequenzbereiche und Zeitbereich relevanter Signale

Der KPQ über die Zeit lässt deutlich auf die Betriebszeit des Wechselrichters rückschließen. Die Frequenzbänder im oberen Bereich lassen auf die Schaltfrequenzen des Wechselrichters rückschließen. Zusammen mit den Winkeln und Amplituden der Stromharmonischen lässt sich sogar mit hoher Wahrscheinlichkeit der Typ des Wechselrichters feststellen.

Jeder Verbraucher hinterlässt somit einen relativ eindeutigen Fingerabdruck in den Netzqualitätsparametern. Mit geeigneten Analysemethoden können somit Verbrauchertypen erkannt und mit den Netzqualitätsparametern korreliert werden.

5 Bewertung mit neuen Methoden der künstlichen Intelligenz

Das vorangegangene Beispiel zeigt deutlich, dass Verbrauchertypen über Netzqualitätsparameter erkannt werden können. Solche "Netzqualitätsmuster" lassen sich mit Methoden der künstlichen Intelligenz erlernen und zur Identifikation in anderen Datensätzen wiederverwenden. Wie bereits in [7] gezeigt, können bereits mit einfachen Lastprofilen und entsprechenden mathematischen Methoden einzelne Verbraucher und Kundenprozesse eindeutig erkannt werden.

Moderne Methoden des Machine Learnings erlauben auch die Auswertung großer Datenmengen hinsichtlich gewisser Muster. Vor allem das Erkennen von Abnormalitäten, also nicht bekannter Zustände, wird in der Netzqualitätsanalyse an Bedeutung gewinnen.

Ordnet man die die Messwerte vieler Messstellen entsprechend an, dann kann man auch verschiedene Filter der Verbrauchertypen (X-Achse) und Messparameter (Y-Achse) anwenden. Die Betrachtung über die Zeit (Z-Achse) lässt Trendbetrachtungen zu, aber auch Blöcke um Verbrauchsmuster zu identifizieren.

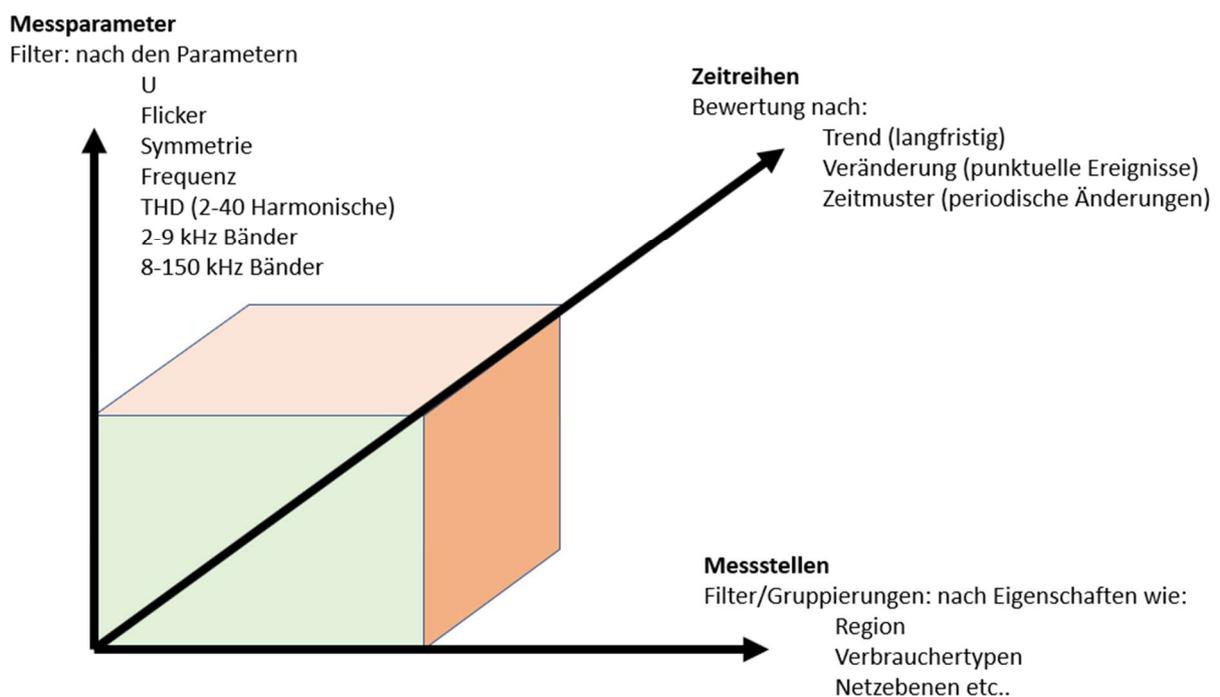


Abbildung 7: Datenmodell der KPQ Parameter

Neben der eindeutigen Erkennung von Fehlerzuständen eignen sich der KPQ und seine einzelnen Zwischenwerte somit auch zur Betrachtung von mehreren Messstellen gleichzeitig und zur automatischen Erkennung von Änderungen. Mit Methoden des Machine Learnings lassen sich auch ähnliche Änderungen in mehreren Messstellen erkennen und somit Rückschlüsse auf dortige Energienutzungen schließen.

6 Messtechnik

Zur Messung wurde ein Messgerät vom Typ AM-10-PA2H von ARTEMES verwendet.

- 2 MSamples/sec/channel
- 24 bit Auflösung
- Spannungsbereich: +- 1600V



Abbildung 8: Messgerät AM-10-PA2H

6.1 Gemessene Parameter

- Spannungen
- Oberschwingungen bis 50
- THD bis 40
- Flicker PSt, Plt
- Frequenz
- Symmetrie
- Frequenzbänder 2-9 kHz @ 200Hz
- Frequenzbänder 8-150 kHz @ 2kHz

Aufzeichnungsrate:

- 2 MSamples/sec

7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, wie der KPQ um die neuen Frequenzbänder bis 150 kHz erweitert werden kann.

Mit einem aktuellen Beispiel wurde die Anwendung des KPQ gezeigt und auch die Auswirkung verschiedener Betriebszustände.

Neue Methoden der Datenbewertung mittels künstlicher Intelligenz (Machine Learning) erlauben eine messstellenübergreifende Analyse und Erkennung von Gemeinsamkeiten

7.1 Ausblick

Ich sehe gerade im Bereich des Monitorings von Industrie- und Verteilnetzen große Möglichkeiten, viele Messstellen untereinander zu vergleichen und Abnormalitäten und Veränderungen zu erkennen. Es wird künftig, neben dem täglichen sicheren Betrieb der Netze darum gehen, Änderungen der Netzqualität zu erkennen und bei negativen Trends frühzeitig dagegenzuwirken. Dies kann nur durch eine enge Zusammenarbeit von Anwender_innen und Anlagen- bzw. Geräteherstellern zum gewünschten Erfolg führen. Die Messstellen in den Stromnetzen werden die Daten liefern können und geeignete Analysen auf z.B. der Basis der hier vorgestellten Methode können gezielt die Ursachen erkennen lassen.

Im Sinne einer noch aussagekräftigeren Praxisstudie wäre an dieser Stelle eine möglichst vielfältige Modellregion wünschenswert.

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturnachweis:

- [1] Paper: Beitrag zur Definition eines Power Quality Index, 2018, Graz, Symposium Energieinnovation
- [2] ÖVE/ÖNORM EN 50160:2011: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen
- [3] ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-30:2016: Verfahren zur Messung der Spannungsqualität
- [4] IEC 61000-2-2 Ed2 Amd 1:2017
- [5] IEC 61000-2-2 Ed2 Amd 2:2018
- [6] Statistik über die Spannungsqualität in Österreich (2017), Österreichs Energie
- [7] Dissertation, Werner Schöffler, TU Graz, 2001: Die Vielkanalige Lastganganalyse - Ein Beitrag zur Analyse und Optimierung des Energiekonsums
- [8] Assessing network compliance for power quality performance, S. Elphick, V. Gosbell, V. Smith, G. Drury, R. Barr, ICHQP, 2014, DOI: 10.1109/ICHQP.2014.6842918

8.2 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: SPANNUNGSVERLAUF AM HAUSANSCHLUSS, PV WECHSELRICHTER 5KW	8
ABBILDUNG 2: SPANNUNGSSINUS: ZUNÄCHST ZEIGT DIES DIE HEUTE ÜBLICHE VERFORMUNG DURCH SCHALTNETZTEILE	8
ABBILDUNG 3: DETAIL AM SCHEITEL DES SINUS: CA. 20 KHZ SCHWINGUNG, WENN DER PV WECHSELRICHTER ARBEITET	9
ABBILDUNG 4: BETRACHTUNG IM FREQUENZBÄNDERN UND LIMIT NACH IEC 61000-2-2 [5]....	9
ABBILDUNG 5: ZUSÄTZLICHE ÜBERLAGERTE SCHWINGUNG MIT CA. 300KHZ – ÜBER DEN GRENZWERTEN NACH [5]	10
ABBILDUNG 6: FREQUENZBEREICHE UND ZEITBEREICH RELEVANTER SIGNALE	11
ABBILDUNG 7: DATENMODELL DER KPQ PARAMETER	12
ABBILDUNG 8: MESSGERÄT AM-10-PA2H	13

8.3 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: KPQ BEI BETRIEB MIT UND OHNE WECHSELRICHTER	10
TABELLE 2: KPQ IM DETAIL	11