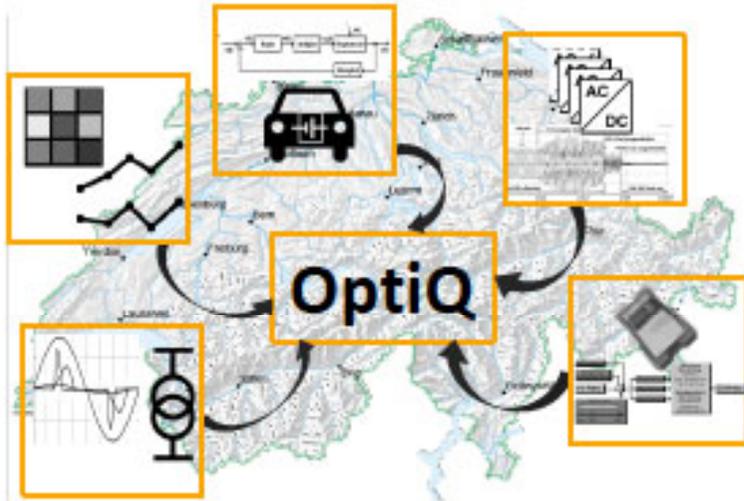




Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise
Bern University of Applied Sciences



Ergebnisse des Projekts OptiQ

Berner Fachhochschule
BFH-Zentrum Energiespeicherung
Labor für Elektrizitätsnetze

- ▶ Stefan Schori, Managing Co-Director des BFH-Zentrums Energiespeicherung

researchXchange, Biel, 18.12.2020

BFH-Zentrum Energiespeicherung

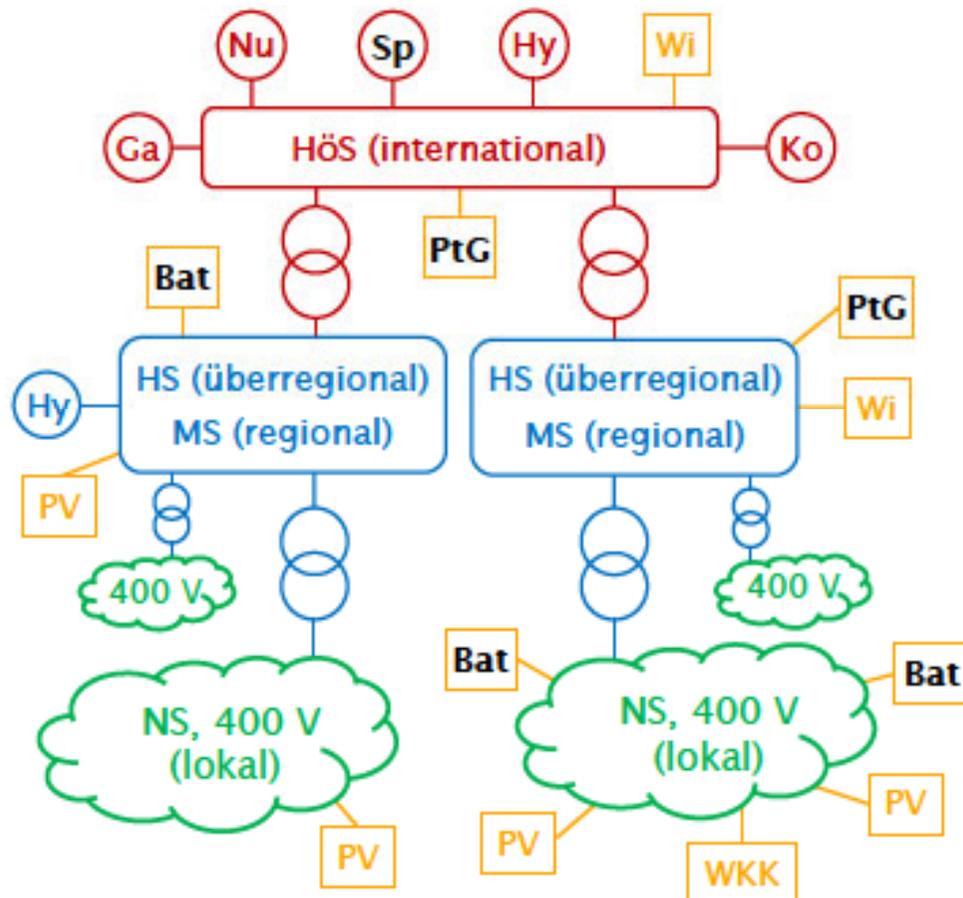


Die Berner Fachhochschule konzentriert ihre Forschungsgruppen zum Thema **elektrochemische Speichertechnologien und Stromnetze** im Gebäude des Switzerland Innovation Park Biel/Bienne.

bfh.ch/energy



Vier Phasen der Elektrizitätsversorgung



1. Die Elektrizitätsversorgung wurde lokal als Netzeinseln gestartet
2. Die Netzeinseln wurden regional (MS) und überregional (HS) verbunden
3. Die überregionalen Netze wurden international durch das Übertragungsnetz verbunden und grosse Kraftwerke wurden angeschlossen
4. Neue Erzeugungsarten werden dezentral an Verteilnetze angeschlossen, und Energiespeicher

Bat = Batterie

Ga = Gaskraft

Hy = Wasserkraft

Ko = Kohle

Nu = Nuklear

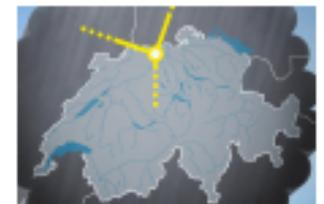
PtG = Power-to-Gas

PV = Photovoltaik

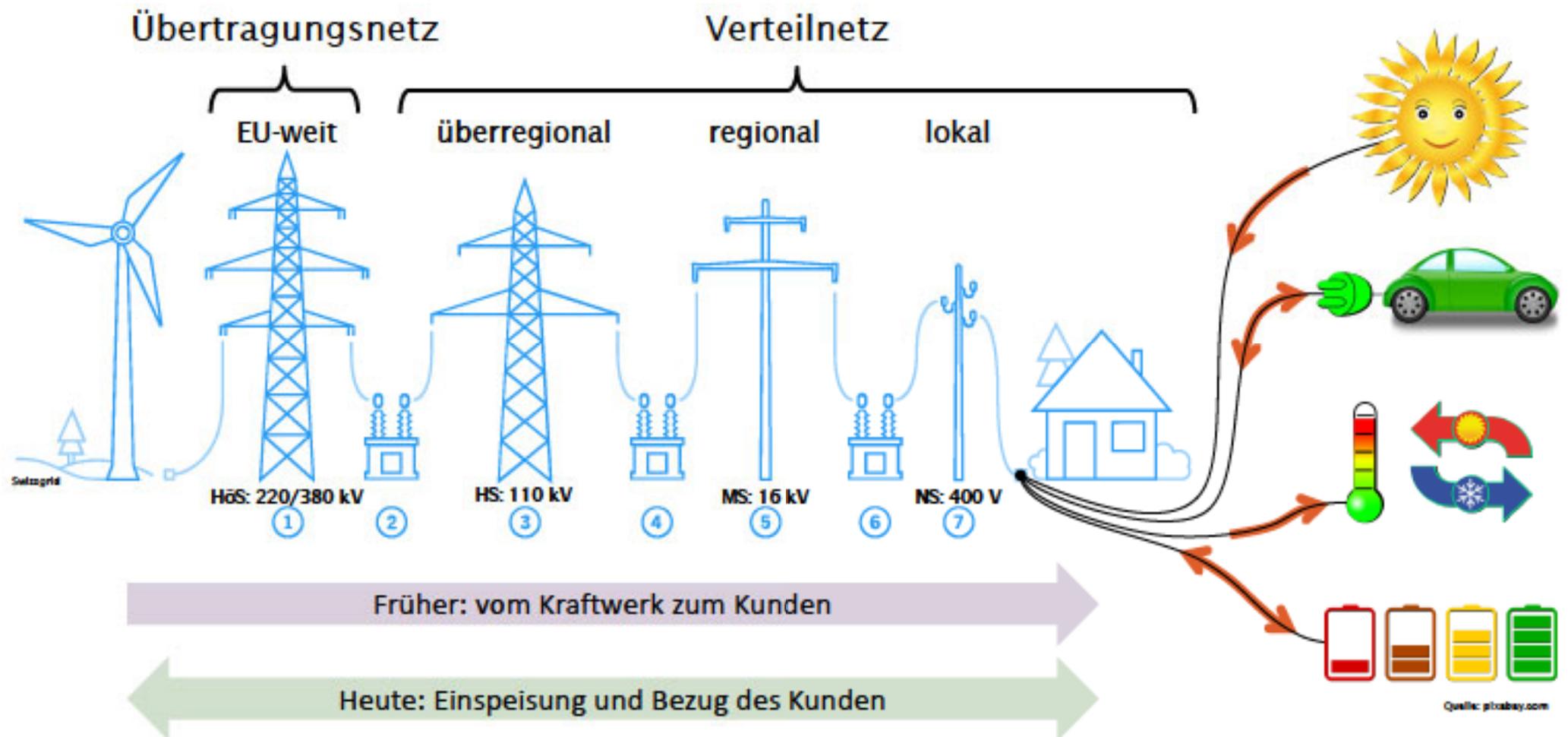
Sp = Speichersee

Wi = Windkraft

WKK = Wärme-Kraft-Kopplung



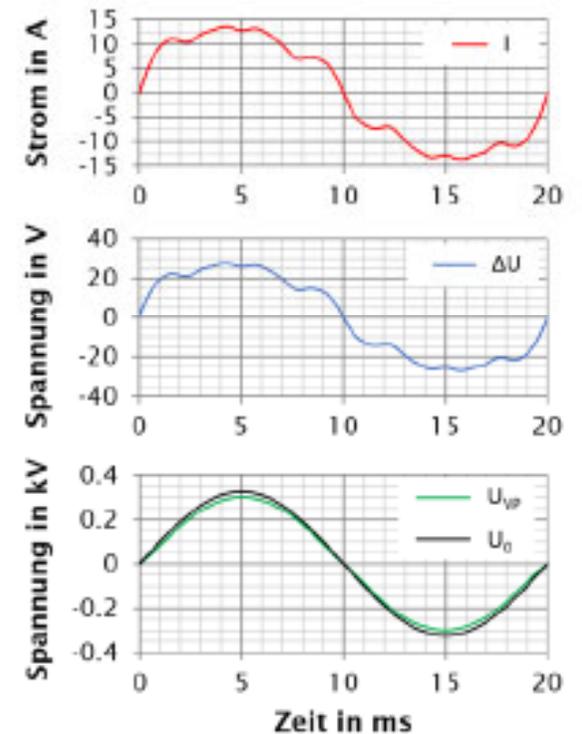
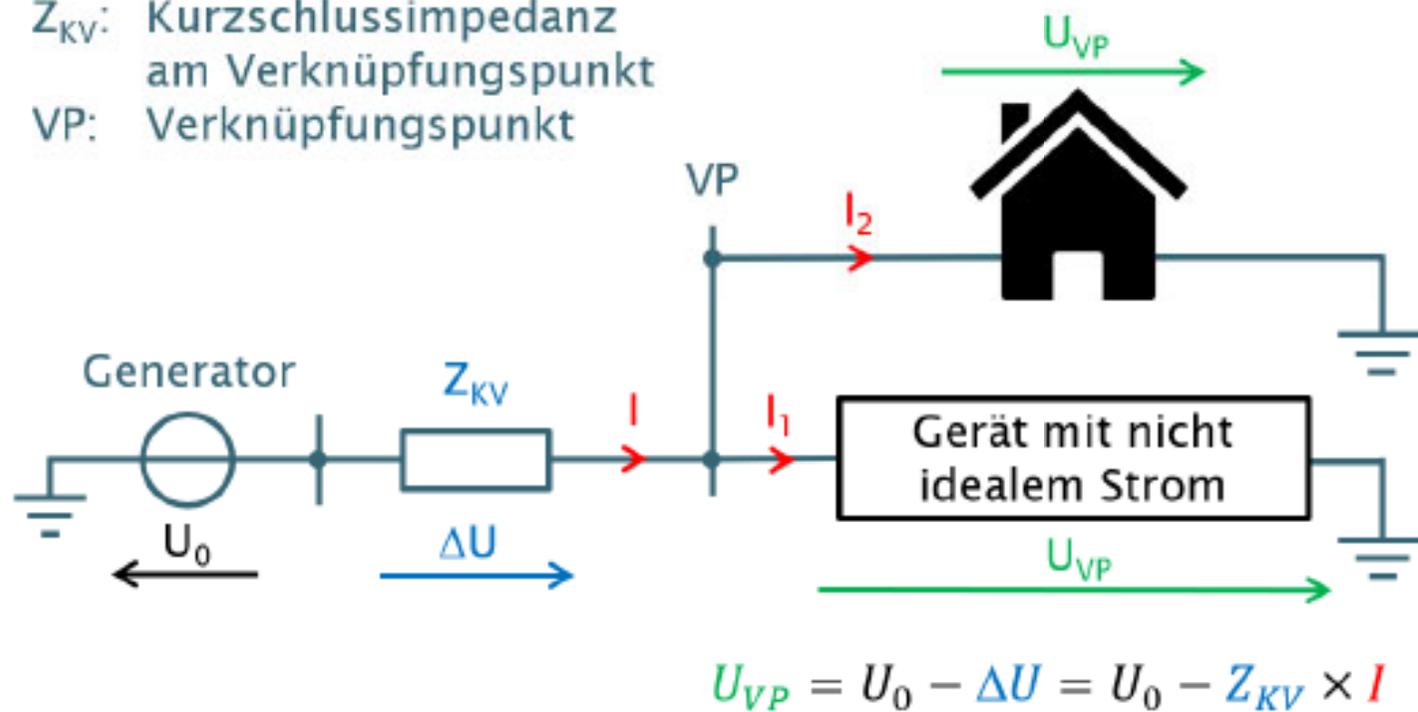
Die Stromversorgung früher und heute



Netzurückwirkungen

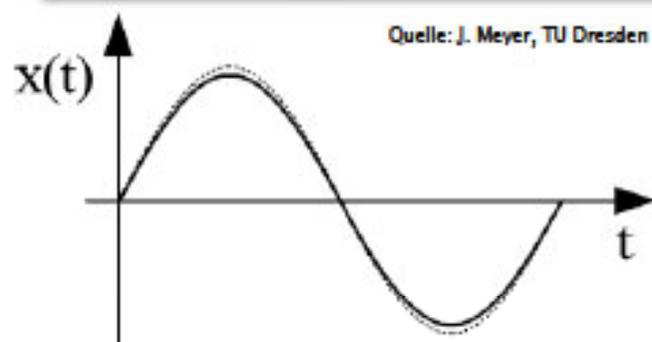
Netzurückwirkungen durch nicht-ideale Ströme

Z_{KV} : Kurzschlussimpedanz
am Verknüpfungspunkt
VP: Verknüpfungspunkt



Wichtige Qualitätsmerkmale und -kenngrossen

Amplitude

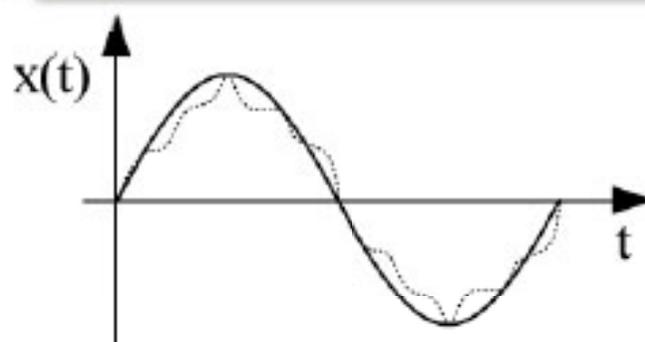


- ▶ Höhe der Spannung

Abhängig von:

- ▶ Anzahl/Leistung der Geräte
- ▶ Netzdimensionierung

Form

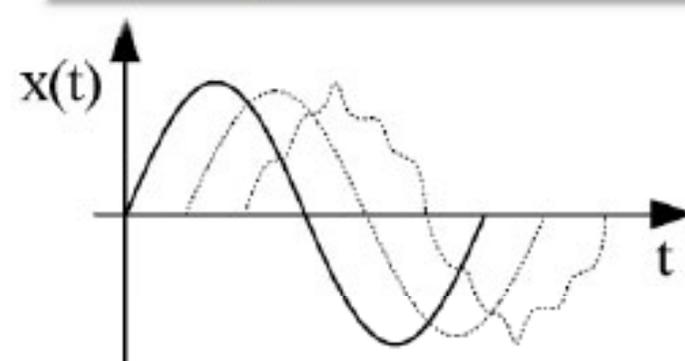


- ▶ Oberschwingungen (auch Harmonische genannt)

Abhängig von:

- ▶ Stromform der Geräte
- ▶ Qualität der Inverter

Symmetrie



- ▶ Ungleiche Belastung der Leiter

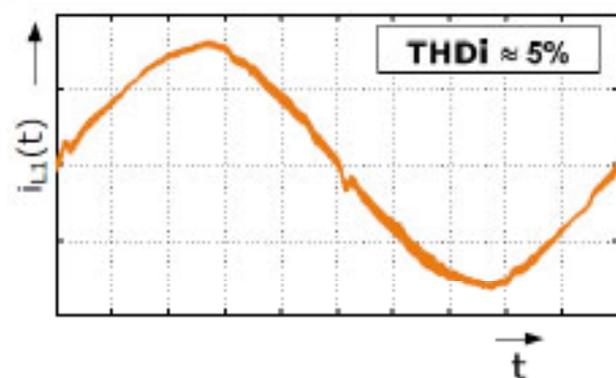
Abhängig von:

- ▶ Anschlusstyp 1-/3-phasig
- ▶ Verteilung der Geräte

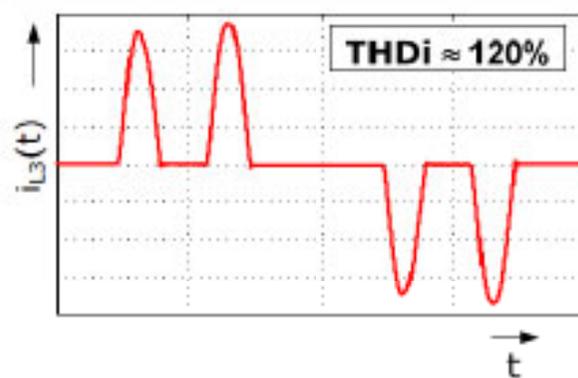
→ Der Netzbetreiber ist für die Einhaltung der Grenzwerte gemäss EN 50160 verantwortlich

Beispiel zum Einfluss durch Geräte

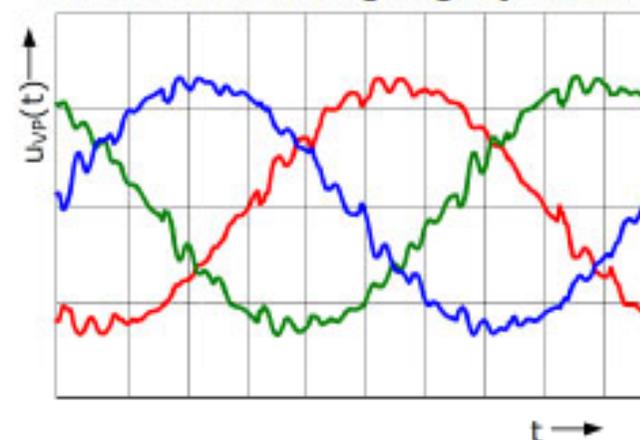
Ladegleichrichter mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur



Ladegleichrichter mit klassischer Gleichrichtung



Verzerrte Versorgungsspannung



- ▶ THDi = Total Harmonic Distortion of the current (Gesamtharmonische Verzerrung des Stroms)
- ▶ Der THDi ist ein Mass für die Verzerrung des Stromes durch ein angeschlossenes Gerät
- ▶ Je kleiner der THDi, desto mehr gleicht der Strom der gewünschten 50-Hz-Sinusform
- ▶ Je kleiner der THDi, desto weniger Störungen werden i.d.R. in das Stromnetz eingekoppelt

Quelle: J. Meyer, TU Dresden

Das Projekt «OptiQ»

BFE-Projekt «OptiQ»

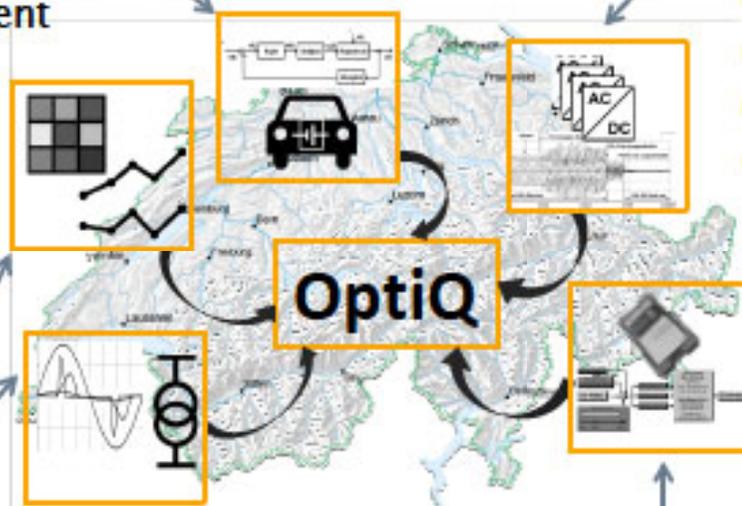
Optimierung von Planung und Betrieb der Verteilnetze unter Berücksichtigung der Spannungsqualität

Regelstrategien im NS-Netz

- ▶ Spannungsregelung
- ▶ Lastmanagement

Effekt der Zunahme von nichtlinearen Geräten

- ▶ Einfluss auf Oberschwingungen
- ▶ Veränderung der Netzimpedanz
- ▶ Auswirkungen auf Kommunikationsanlagen
- ▶ Geräte bis zum instabilen Betrieb



PQ-Analysen in MS-/NS-Netzen

- ▶ Ausbreitung von Oberschwingungen
- ▶ PQ-Langzeitdatenanalyse (Reserven zu den Grenzwerten)

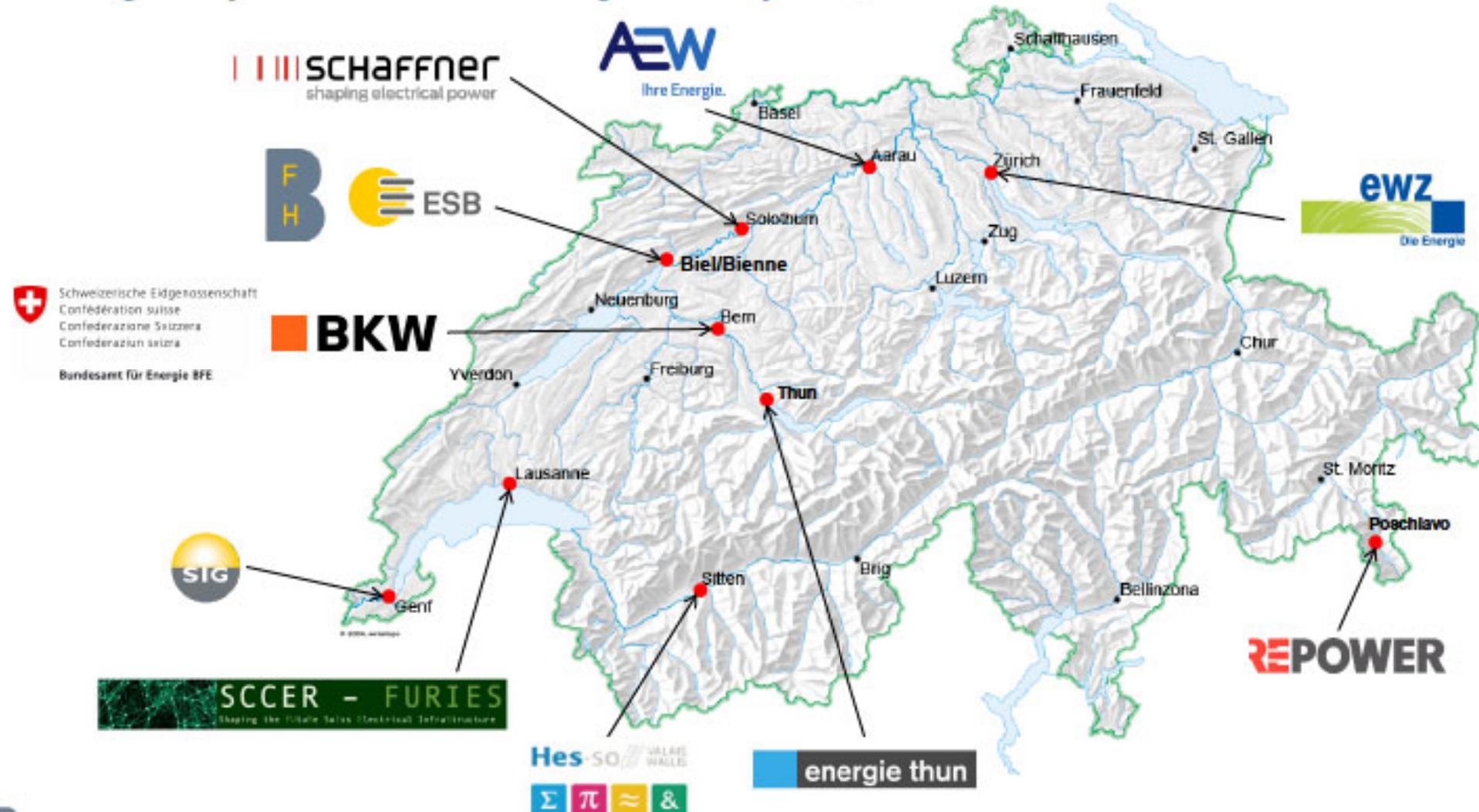
PQ = Power Quality = Spannungsqualität

Zielnetzplanungsstrategien für das MS- und NS-Netz

- ▶ Ausarbeiten von Strategien und Empfehlungen für die Netzplanung der Netzbetreiber

MS = Mittelspannung, NS = Niederspannung

Projektpartner im Projekt OptiQ



Aktivitäten des Projekts

- ▶ 16+ Messkampagnen in MS- und NS-Verteilnetzen (PQ, fNI, PLC)
- ▶ Davon in 24 Unterwerken und 59+ Trafokreisen
- ▶ 5 Labormessungen (Prosumer-Lab, PLC-Testaufbau etc.)
- ▶ Analyse der Langzeitdaten von vier Netzbetreibern

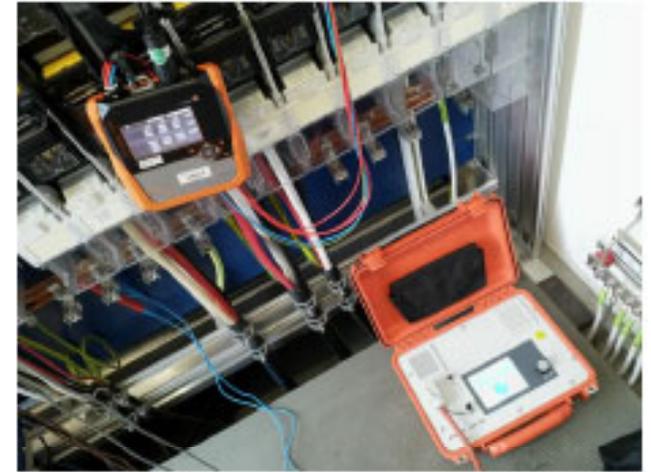
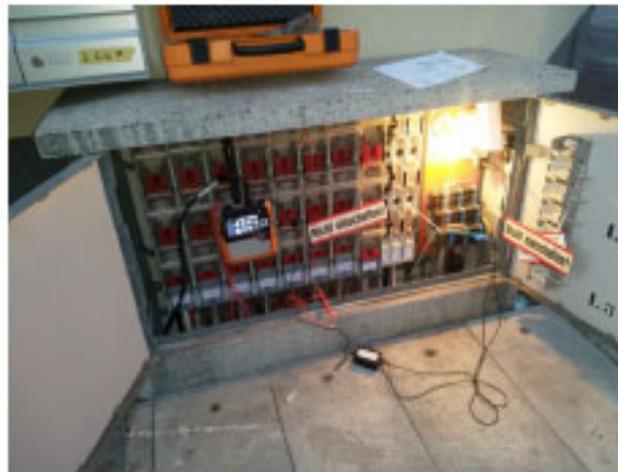
- ▶ Software «ZNP light» weiterentwickelt
- ▶ Software DISQ (PQ-Index) entwickelt
- ▶ Software «LastprofilTool ES 2050» entwickelt

PQ = Power Quality = Spannungsqualität

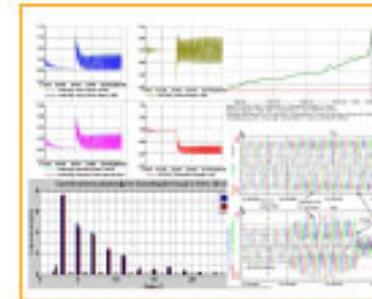
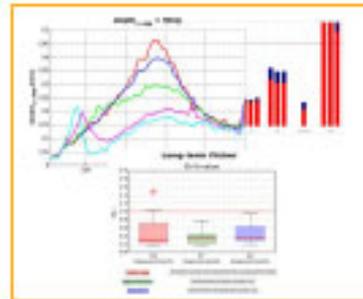
fNI = frequenzabhängige Netzimpedanz

PLC = Powerline Communication

Eindrücke der Messkampagnen



Typisches Vorgehen bei Messkampagnen



Messung

Analyse

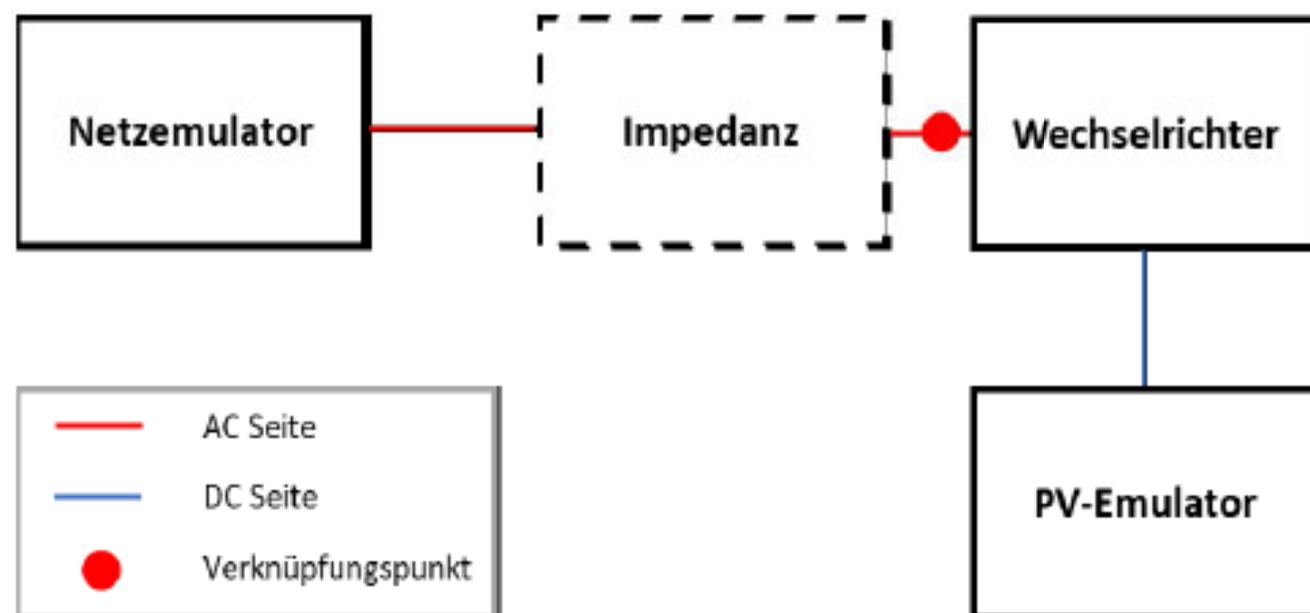
Modellierung

Simulation

Spannungsqualität

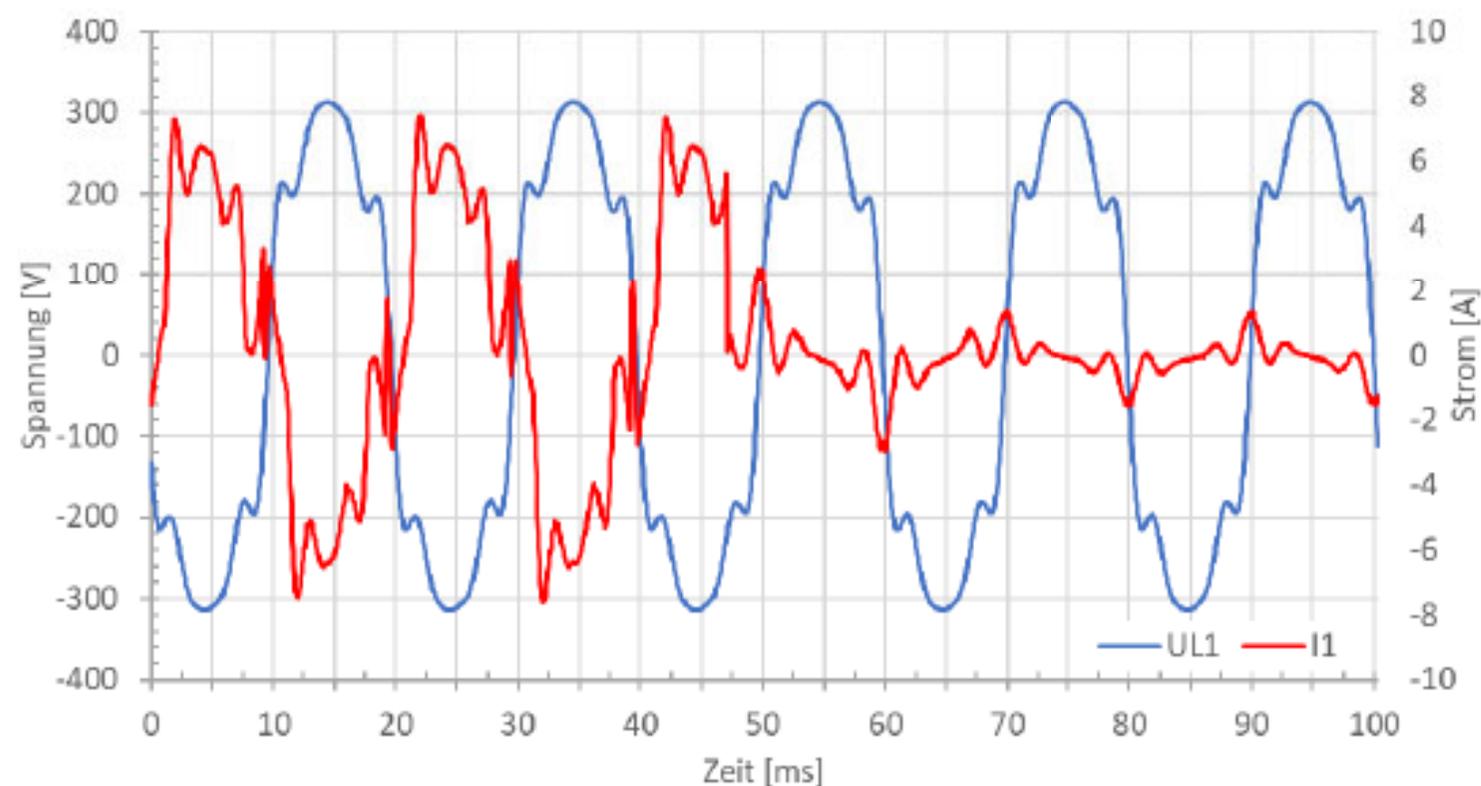
PV-Wechselrichter bei verzerrter Spannung

► Beispiel eines Testaufbaus



PV-Wechselrichter bei verzerrter Spannung

► Oszilloskopbild beim Ausschaltzeitpunkt

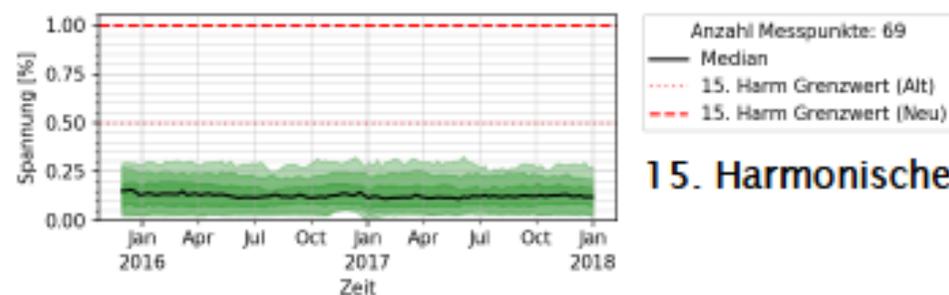
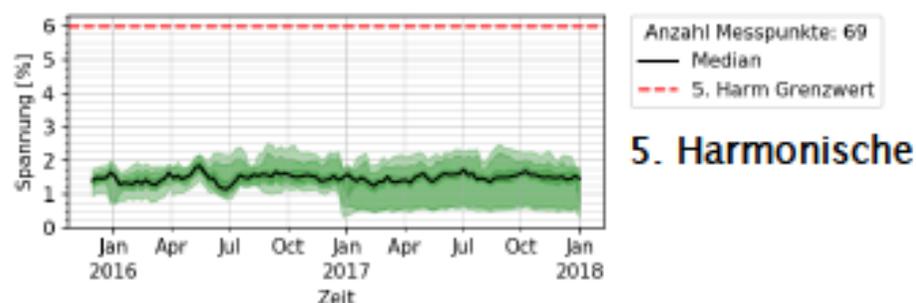
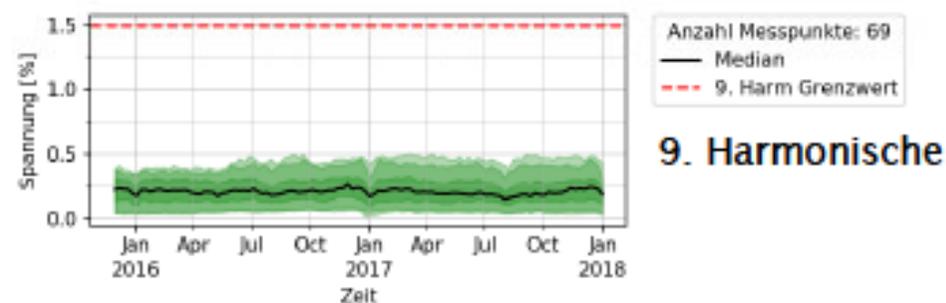
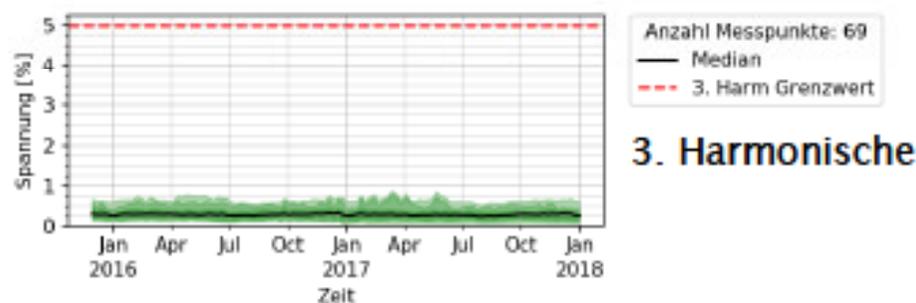
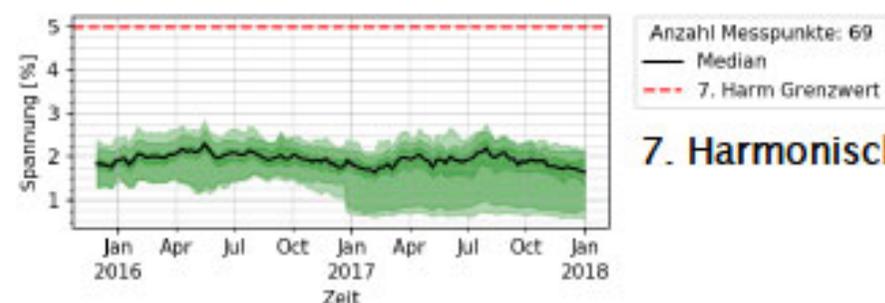
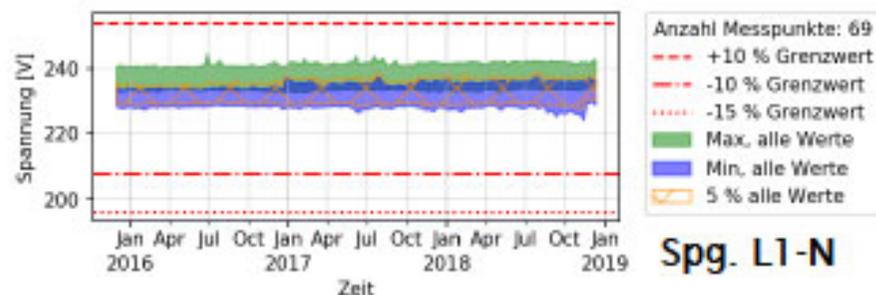


PV-Wechselrichter bei verzerrter Spannung

Ergebnisse

- ▶ Getestete WR gehen erst **bei starker Verzerrung** vom Netz
- ▶ **In der Praxis** sind solche Verzerrungen **unwahrscheinlich**
- ▶ Falls jedoch ein WR durch kurzfristige hohe Verzerrung vom Netz geht, **startet** er seine Einspeisung nach kurzer Zeit **automatisch** erneut

Langzeitdatenanalyse (Spannungsqualität)



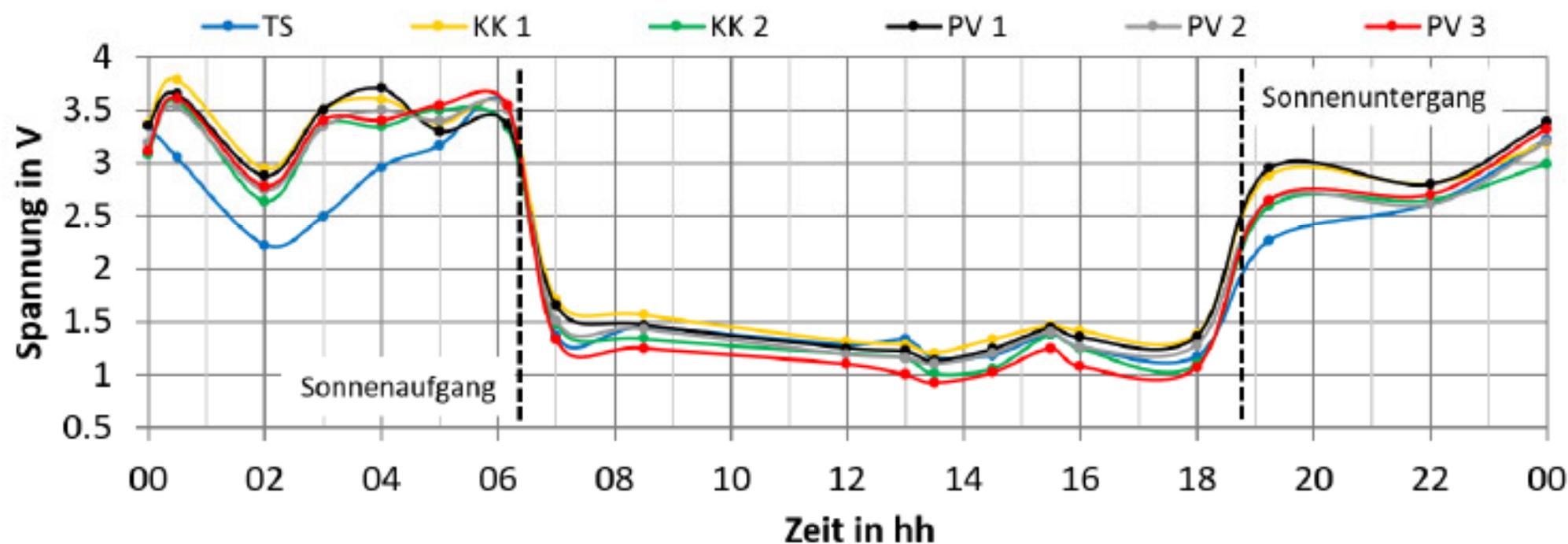
Take-home messages

Spannungsqualität

- ▶ **Keine generelle Verschlechterung** der Spannungsqualität über die Zeit
- ▶ Es kann in der Regel von **grossen Reserven zu den Grenzwerten** nach EN 50160 ausgegangen werden
- ▶ Grund: **Umsetzung der Regeln** zur Anschlussbeurteilung durch die Netzbetreiber
- ▶ Im Niederspannungsnetz: Spannungsoberschwingungen können durch Anlagen mit hoher Leistung, **aber auch durch die Summe vieler verschiedener nicht-idealer Lasten**, die an unterschiedlichen Anschlusspunkten angeschlossen sind, verursacht werden

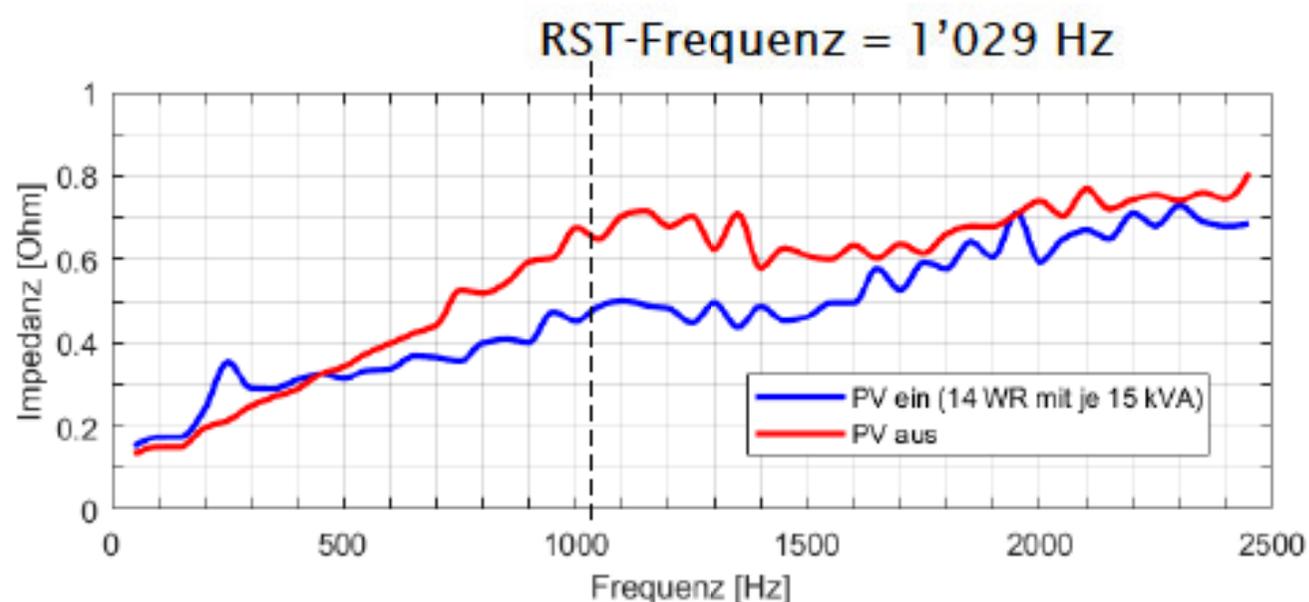
Frequenzabhängige Netzimpedanz und Powerline Communication

Reduktion des Rundsteuersignals durch PV-Wechselrichter



Reduktion des Rundsteuersignals durch PV-Wechselrichter

- ▶ **Ströme bei der RST-Frequenz** weisen am Tag **signifikant andere Beträge** auf als in der Nacht
- ▶ Der Grund ist die je nach Tageszeit **unterschiedliche frequenzabhängige Netzimpedanz**, bedingt durch die angeschlossenen Geräte und Anlagen



Reduktion des Rundsteuersignals durch PV-Wechselrichter

Erkenntnis

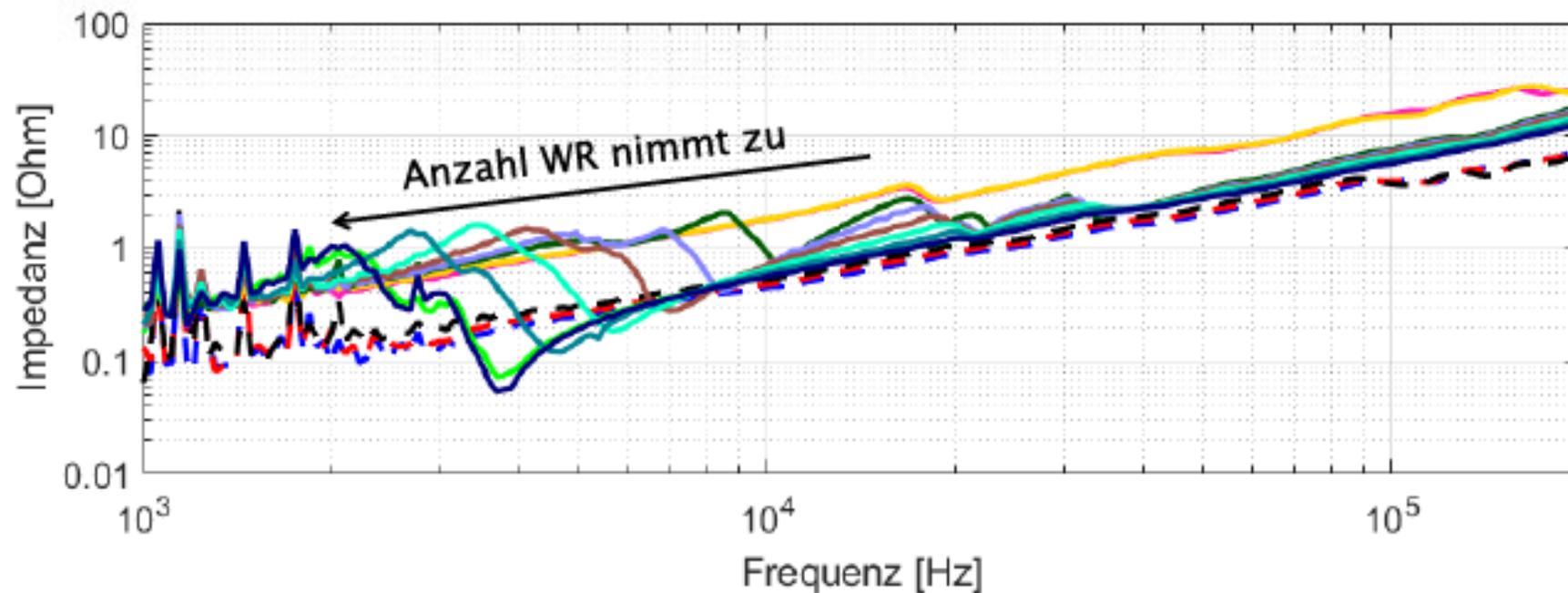
- ▶ Amplitude des Stromes bei der RST-Frequenz in die PV-Anlagen war **umso höher, je mehr Solarwechselrichter** installiert waren

Empfehlungen

- ▶ **Eher eine kleine Anzahl** von Wechselrichtern mit hoher Leistung als eine grosse Anzahl von Wechselrichtern mit niedriger Leistung installieren
- ▶ Bei Auftreten der Problematik den WR-Hersteller kontaktieren. **Anpassung der Reglerparameter** könnte Abhilfe schaffen

Beeinflussung der Netzimpedanz durch PV-Wechselrichter

- 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



Take-home messages

Frequenzabhängige Netzimpedanz (fNI)

- ▶ Die wesentlichen Unterschiede liegen in den **Amplituden**, die insbesondere im Frequenzbereich $< 2 \text{ kHz}$ umgekehrt proportional von den jeweiligen **Kurzschlussleistungen** abhängen
- ▶ $> 2 \text{ kHz}$ ist durch den steigenden Einfluss der lokal angeschlossenen Geräte und Anlagen eine immer **geringere Abhängigkeit der fNI von der Kurzschlussleistung** zu beobachten
- ▶ Im Gegensatz zu den Trafostationen und Verteilnkabinen kann die Netzimpedanz an den **Anschlusspunkten von Geräten und Anlagen**, z. B. in der Unterverteilung, **stark variieren**. Die Variation ist abhängig von der Art und der Anzahl der angeschlossenen Geräte und Anlagen

Take-home messages

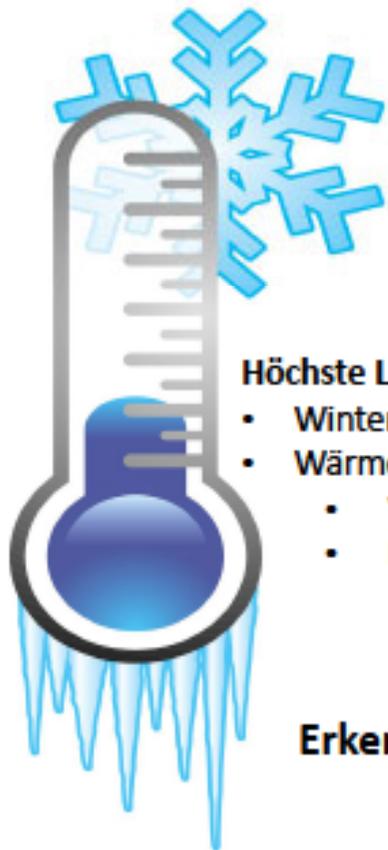
Powerline Communication

- ▶ Moderne Geräte mit Leistungselektronik und auch EMV-Filter können die **Rundsteuerung und die Kommunikation mit G3-PLC beeinträchtigen**
- ▶ Einerseits könnte eine starke Dämpfung des Kommunikationssignals durch **besonders tiefe Netzimpedanzwerte bei der Kommunikationsfrequenz** verursacht werden → Beinahe Kurzschluss bei der Kommunikationsfrequenz → starke Dämpfung des Signals → Kein Empfang mehr möglich
- ▶ Andererseits könnten durch Solarwechselrichter verursachte **Störpegel bei der Kommunikationsfrequenz** die Kommunikation verunmöglichen

Zielnetzplanung

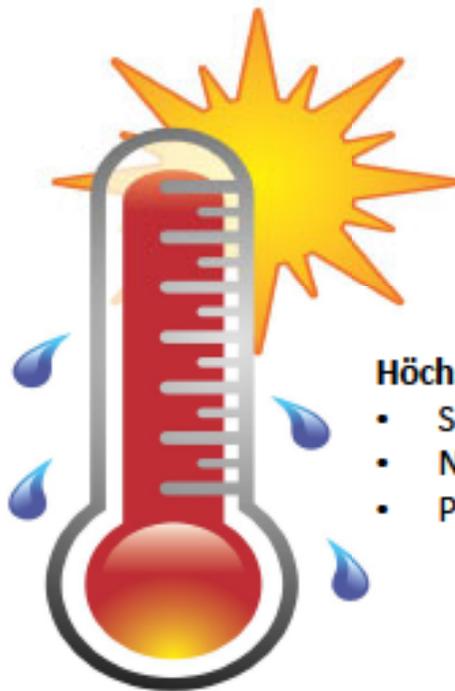
«LastprofilTool ES 2050»

► Charakteristische Tage für die Beurteilung



Höchste Last im Netz

- Winter, Werktag
- Wärmebedarf am höchsten
 - Wärmepumpen [COP]
 - Elektroheizungen



Höchste Einspeisung ins Netz

- Sommer, Wochenende
- Niedrigster Verbrauch
- PV-Anlagen



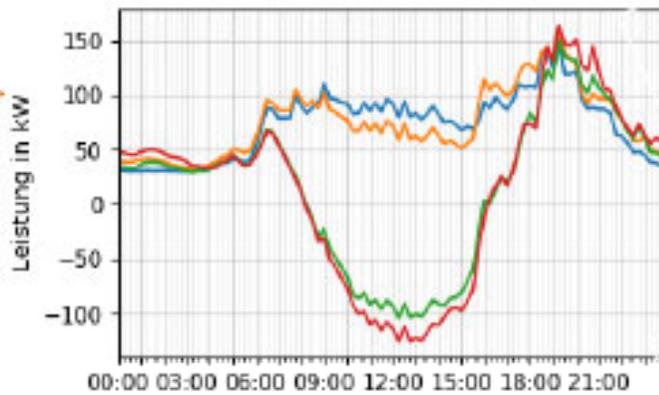
Anpassbares Szenario

**Erkennung der höchsten Auslastung der Netzelemente (Leitungen / Trafo)
und der maximalen und minimalen Spannungen**

«LastprofilTool ES 2050»

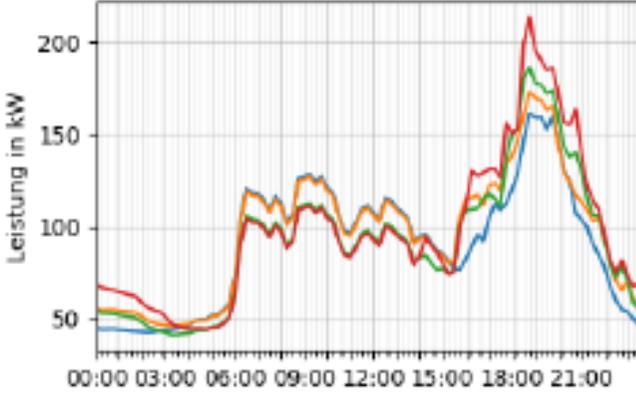


Synthetische Profile



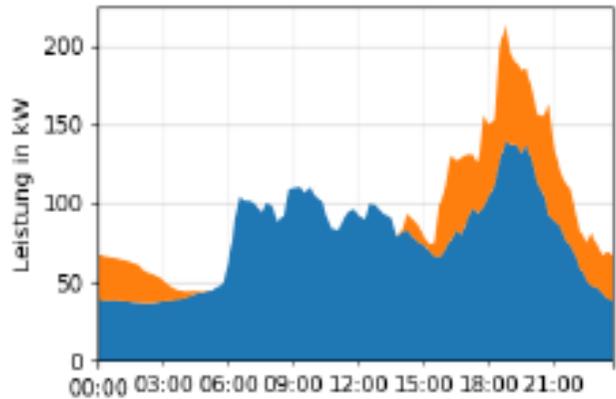
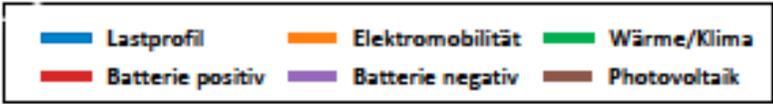
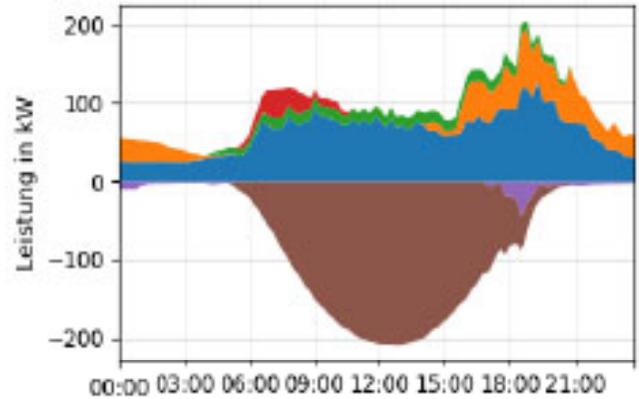
PV
 +44 kWp
 +257 kWp
 +288 kWp

Elektromobilität
 (Anzahl EFZ)
 11
 23
 40



NEP-2035

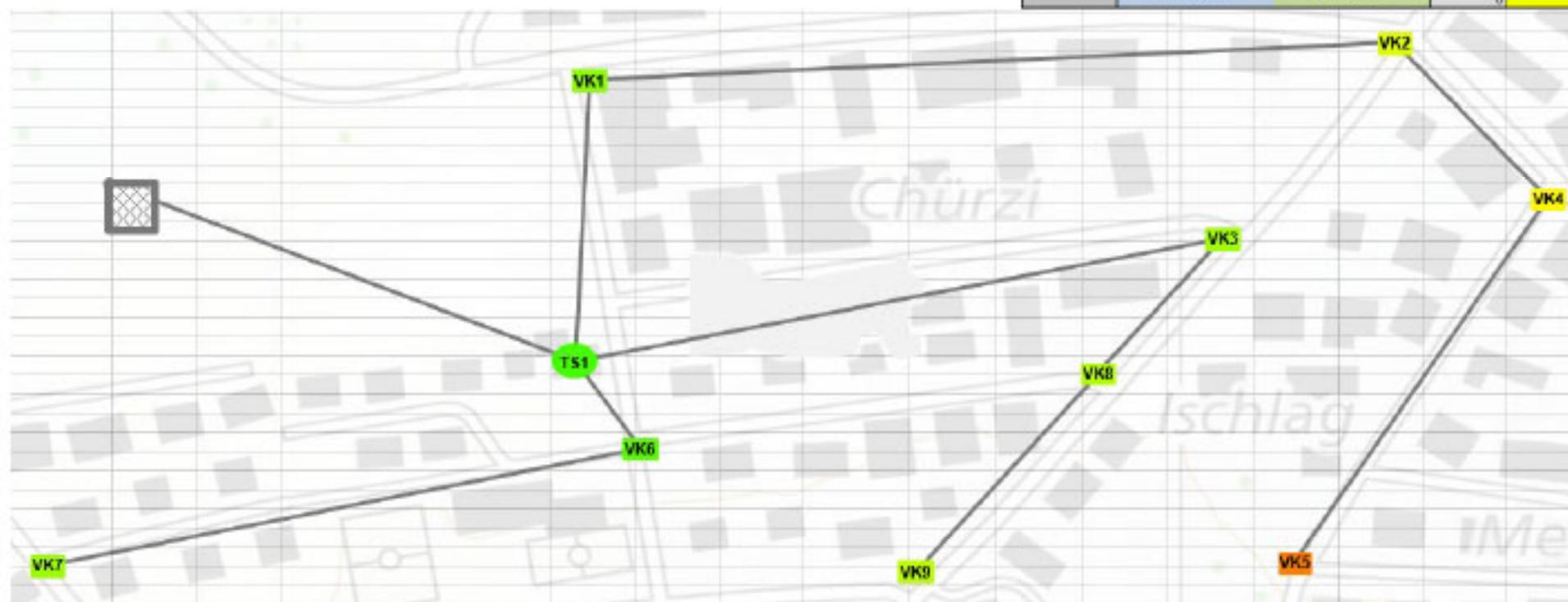
Gestapelte Leistungsprofile



Tool «ZNP light» mit PQ-Index

► PQ_{Max}

Heatmap:		PQ-Index: Legende:	
Um die Heatmap zu erstellen, muss zuerst ein Ist- oder Soll-Netz im Worksheet "PQ-Index" initialisiert werden.			
	Ist-Netz	Soll-Netz	
Vorschlags- indizes	PQAvg	PQAvg	2
	PQMax	PQMax	1.8
eigene Indizes	PQAvg	PQAvg	1.6
	PQMax	PQMax	1.4
			1.2
			1
			0.8
			0.6
			0.4
			0.2
			0



Take-home messages

Zielnetzplanung

- ▶ Eine effiziente Zielnetzplanung ist für viele Netzbetreiber eine **grosse Herausforderung**
- ▶ Heutzutage **mangelt** es insbesondere den kleinen und mittelgrossen Netzbetreibern **an einfach zu bedienenden** Werkzeugen und Methoden
- ▶ Die im Projekt entwickelten **Werkzeuge, Methoden und Dokumentationen** können den **Einstieg und die Durchführung** der Zielnetzplanung vereinfachen
- ▶ Berücksichtigung von Leistungsfluss, Wirtschaftlichkeit und **PQ-Parametern**

Ausblick

Umsetzung der Ergebnisse

Nutzung und Verbreitung der Tools, Methodiken und Empfehlungen

- ▶ Tools «ZNP light», «LastprofilTool ES 2050» und DISQ kostenlos erhältlich
- ▶ Umsetzung bei den Netzbetreibern
- ▶ Präsentationen in Fachkreisen

Arbeitsgruppe EMV&PQ D-A-CH-CZ (3. Version der D-A-CH-CZ-Regeln)

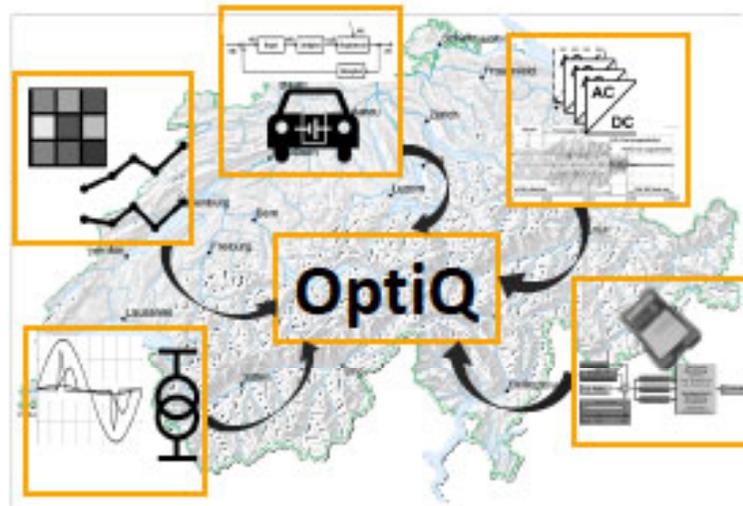
- ▶ Technische Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen

Working Group 8 des technischen Komitees IEC TC 77A

- ▶ Verantwortlich für die Beschreibung der elektromagnetischen Umgebung im Zusammenhang mit Störungen in Stromversorgungsnetzen

Projekt «QuVert – Nutzung von Qualitätsreserven in elektrischen Verteilnetzen»

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.





Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

bfh.ch/energy

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

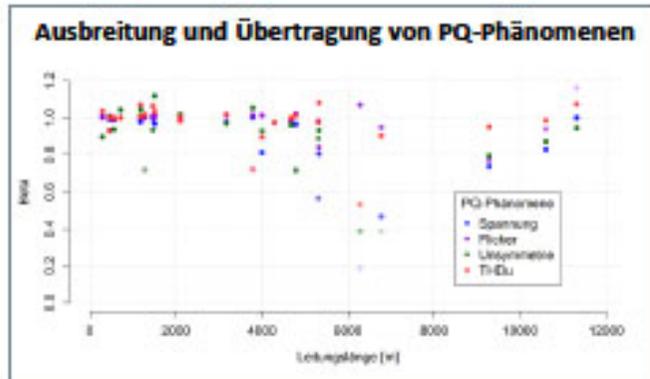
Stefan Schori
Michael Höckel
Ron Buntschu

sos1@bfh.ch
hkm1@bfh.ch
bcr1@bfh.ch

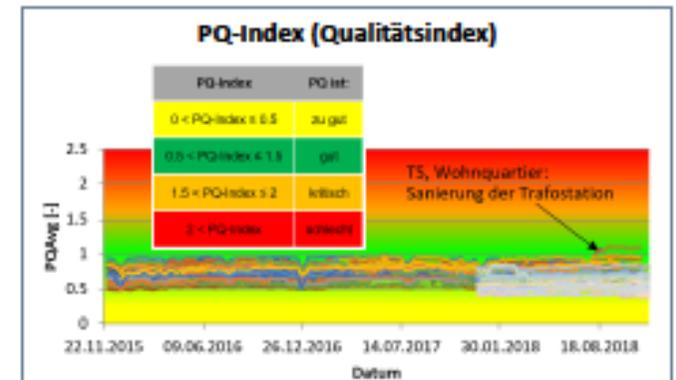
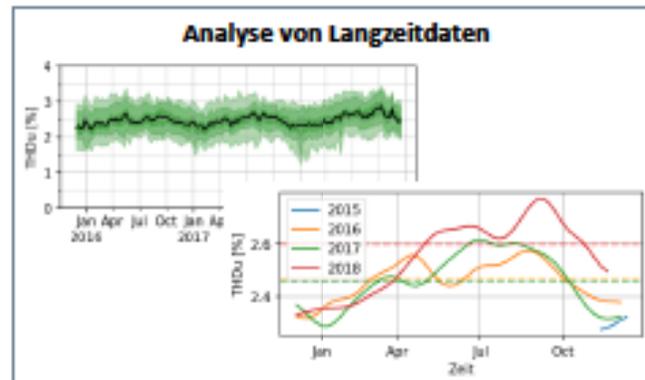
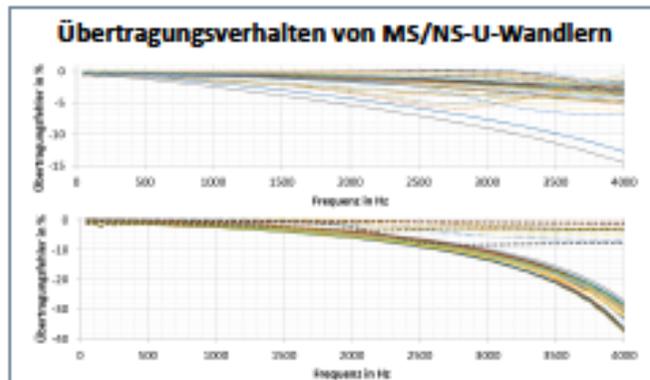
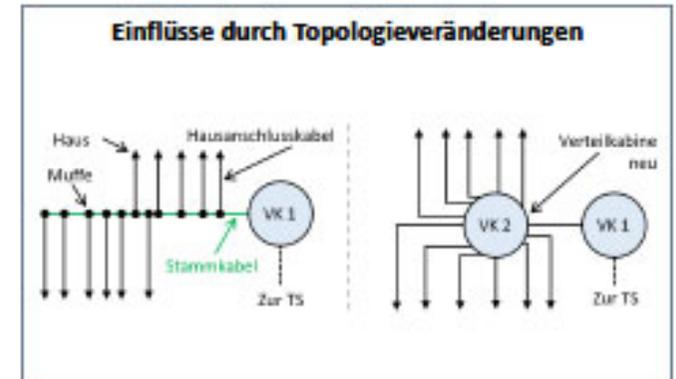
Anhang

Aktivitäten im Projekt OptiQ

Arbeitspakete WP 1 und WP 2 (PQ-Analysen)



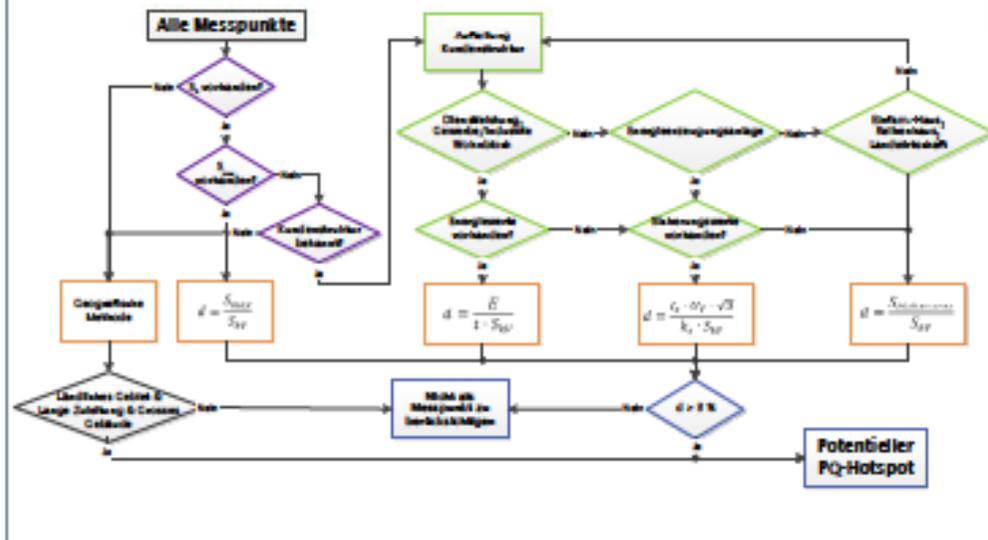
- ### Übertragung/Dämpfung von Spannungs- und Stromoverschwingungen auf der NE 6
- 25 TS, Korrelation zwischen MS und NS analysiert
 - Korrelation bei Grundschwingung und 5. Harmonischen
 - Flicker kleiner oder gleich auf MS
 - Bei mehr als der Hälfte der TS: Keine Korrelation bei Unsymmetrie, THD_U, 7. und 11. U-Harmon.
 - Keine Korrelation bei Dy-Transformatoren für die 3. und 9. Spannungsharmonischen



Arbeitspakete WP 1 und WP 2 (PQ-Analysen)

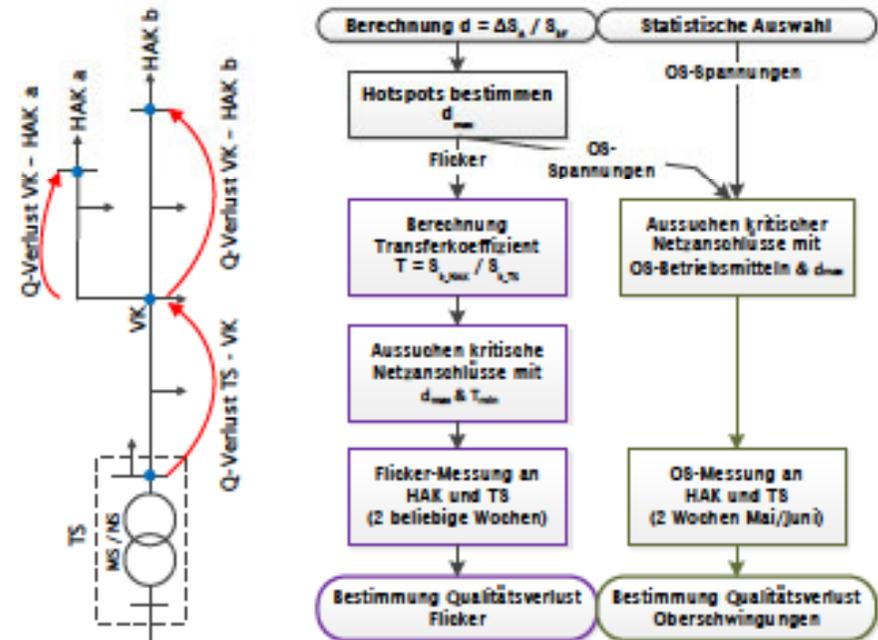
Identifikation von Punkten mit potenziell schlechter Spannungsqualität (PQ-Hotspots)

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

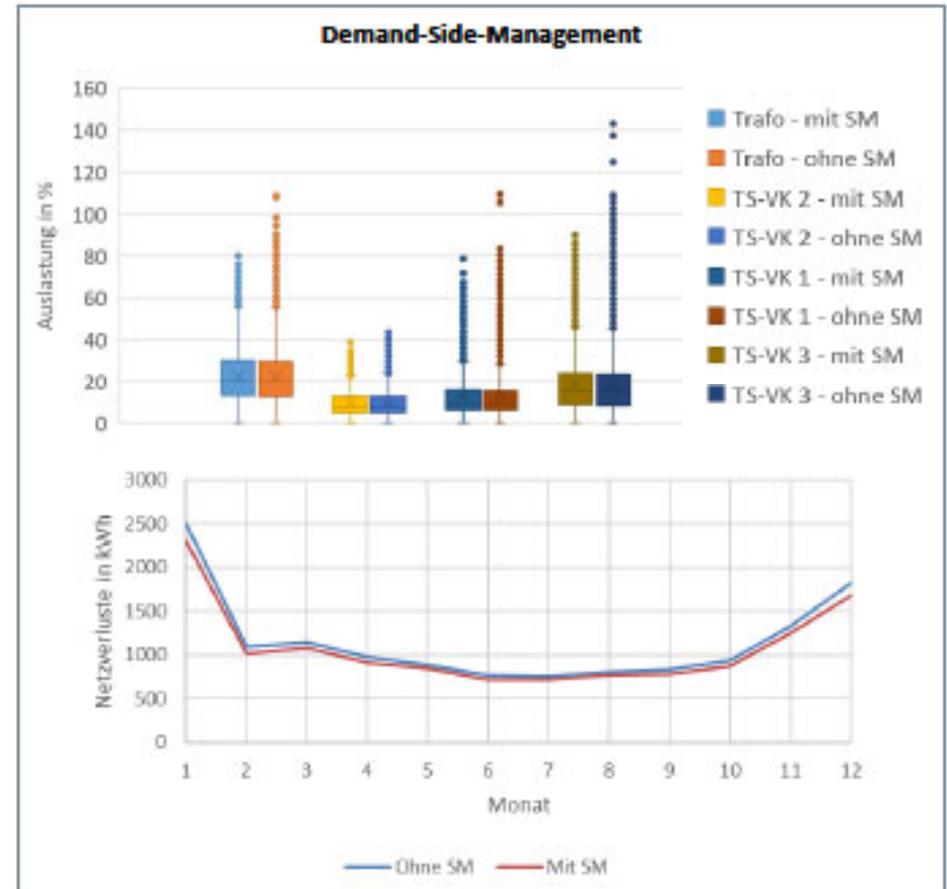
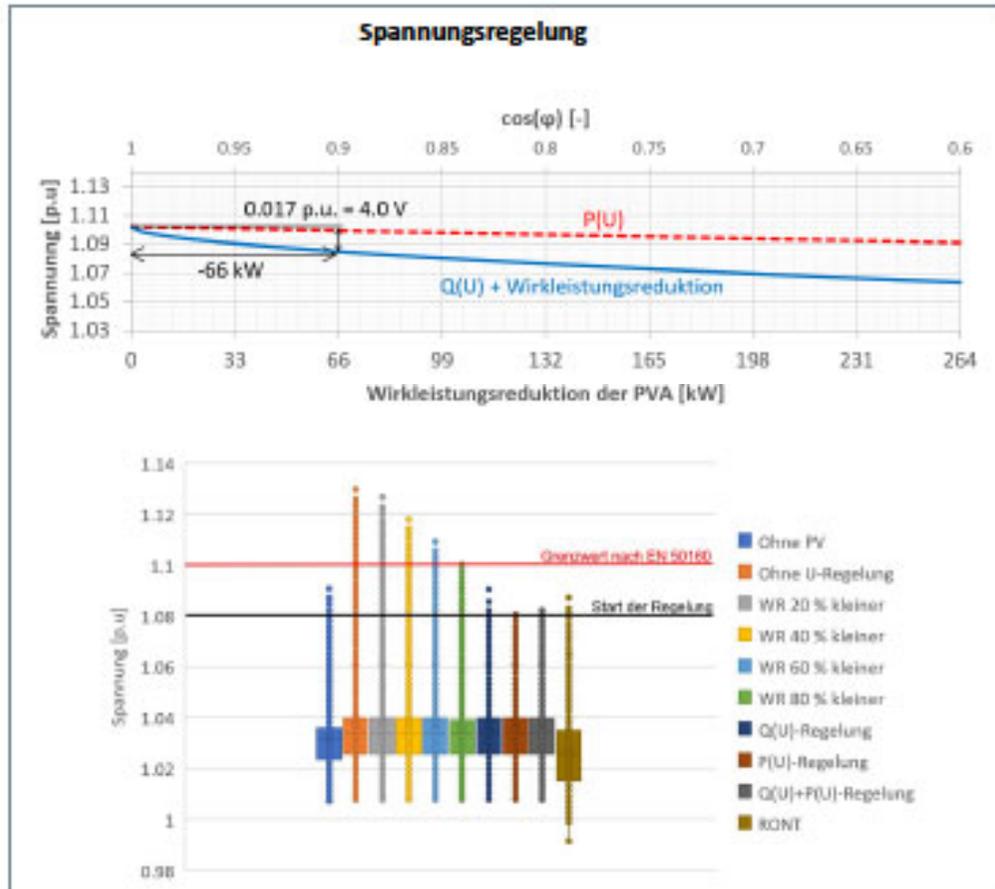


Reduktion der Anzahl PQ-Messpunkte

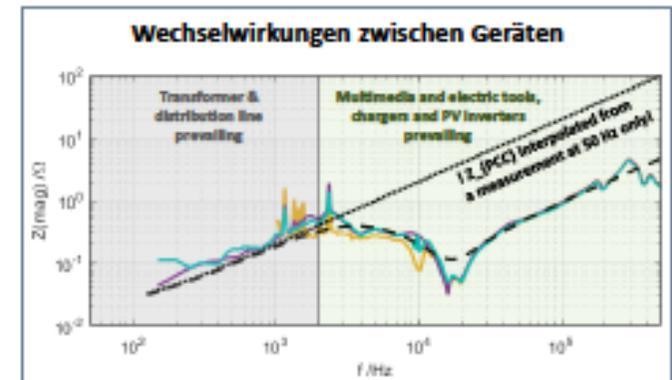
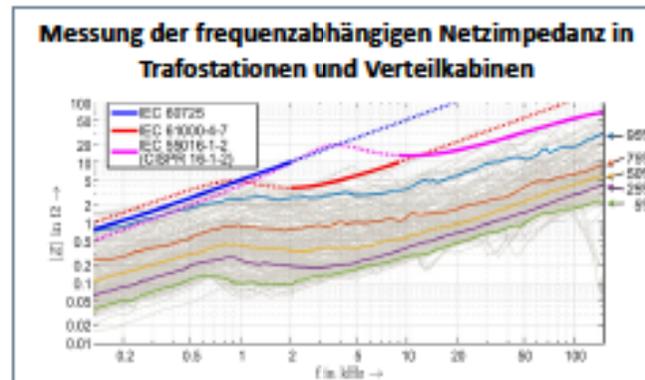
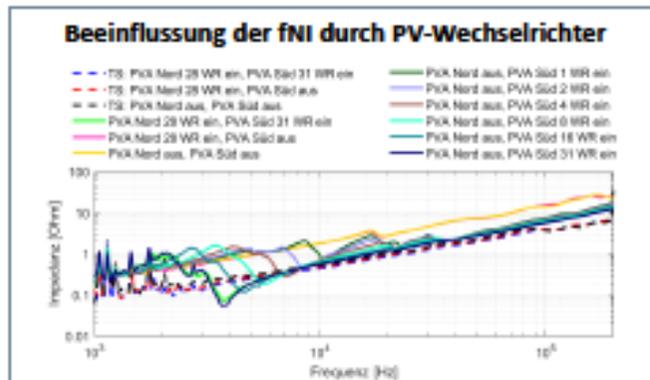
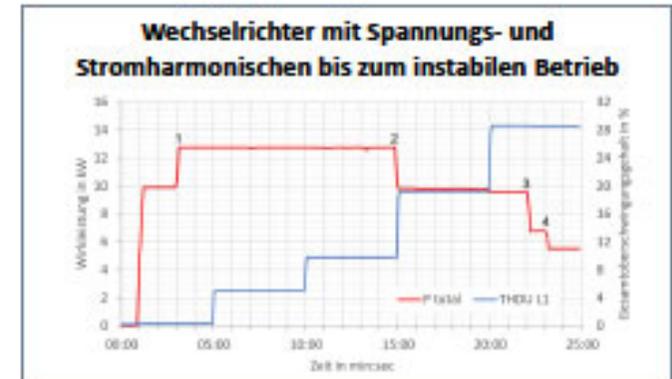
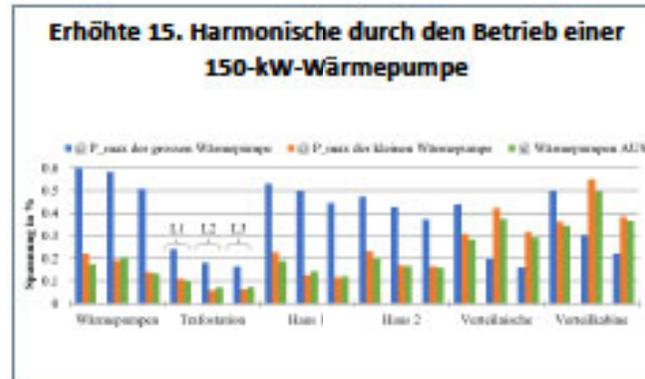
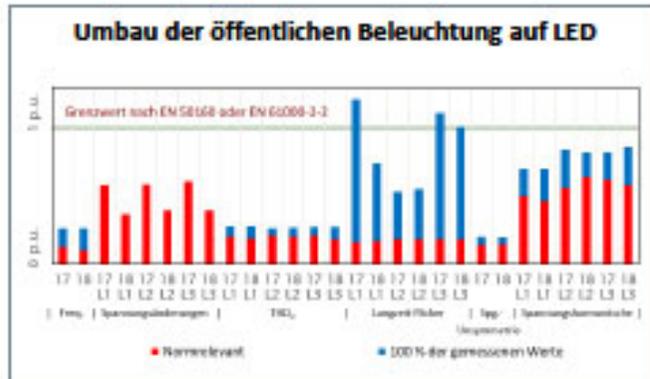
$$\text{Qualitätsverlust}_{1-2} = \Delta Q_{R_{1-2}} = Q_{R_1} - Q_{R_2}$$



Arbeitspaket WP 3 (Regelstrategien mit dez. Anlagen)



Arbeitspaket WP 4 (Einfluss auf PQ, fNI und PLC)



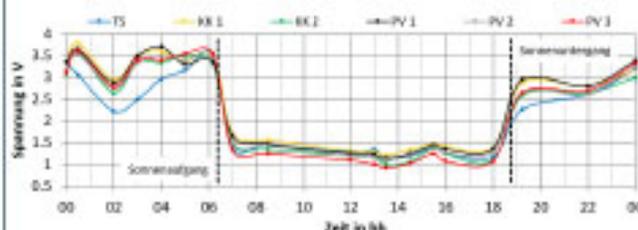
Quelle: R. Stiegler, J. Meyer, S. Schori, M. Höckel, K. Scheida, J. Drápala und T. Hanžlik, «Survey of network Impedance in the frequency range 2-9 kHz in public low voltage networks in AT/CH/CZ/GE», CRED, Madrid, 2019

Arbeitspaket WP 4 (Einfluss auf PQ, fNI und PLC)

Gerätstabilität abhängig von der fNI und der Spannungsverzerrung

- fNI: Schwaches Netz od. Parallelresonanz ungünstig
- Grosse Anzahl von parallel verbundenen Invertern: Resonanz bei tieferen Frequenzen
- Stromregler können Spannungs-OS verstärken
- Netzsynchrisation bzw. Bandbreite des PLL
- Belastung im Arbeitspunkt kann Stab. beeinflussen
- EMV-Filter: Resonanzen können Regelung stören
- PWM, Vektorregelung, Schaltfrequenzen

Dämpfung des Rundsteuersignals durch PV-Anlagen



Störung von LED durch Rundsteuersignale



Messung der Zählergenauigkeiten bei verzerrten Spannungen und Strömen

- Einzelne Smart Meter können bei sehr stark verzerrtem Strom bedeutende Abweichungen aufweisen
- Solche Verzerrungen des Stromes dürften in der Praxis nur im Ausnahmefall auftreten
- Ferraris-Zähler ist als Referenzmessung für die Wirkenergie ungeeignet

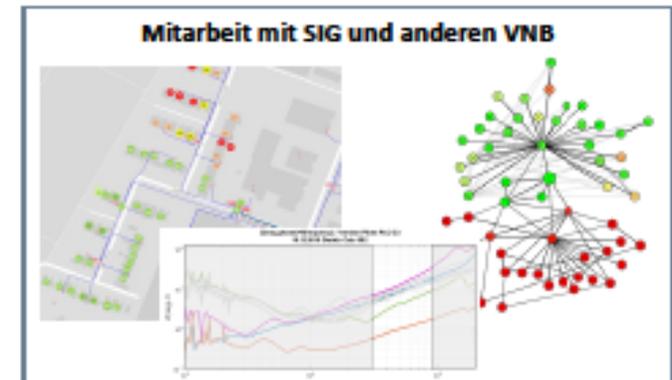
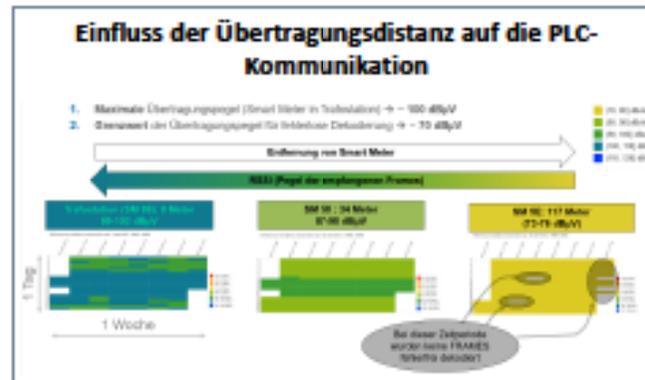
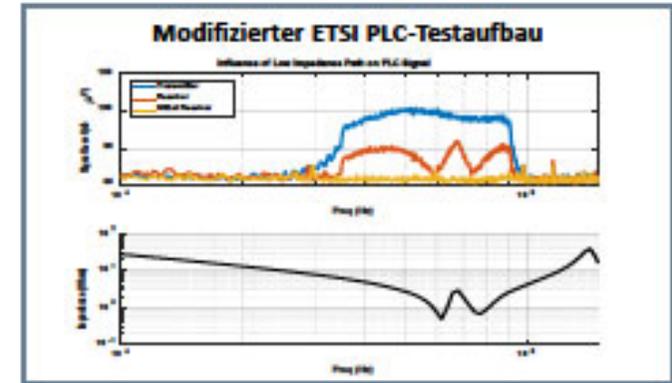
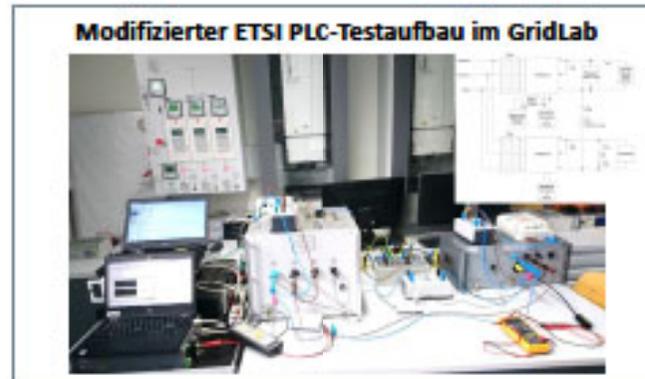
Wärmeverluste der Netzelemente durch niederfrequente Oberschwingungen (Labor)

- kein signifikanter Anstieg der thermischen Verluste in EMV-Filtern oder leistungselektronischen Geräten bei $THD_U < 8\%$
- Leistungstransformatoren: keine signifikante Erhöhung der Temperatur und $< 0.1\%$ Wirkungsgradverminderung bei $THD_U = 8\%$

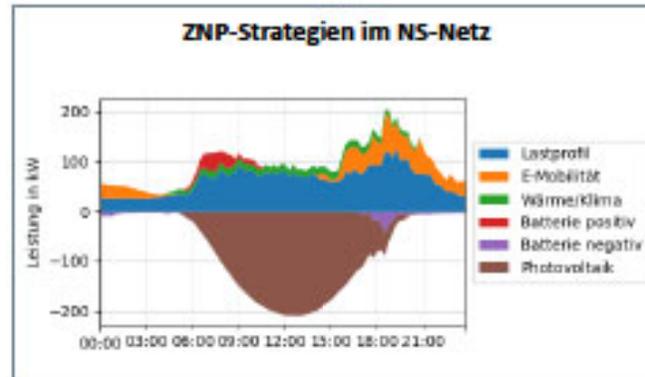
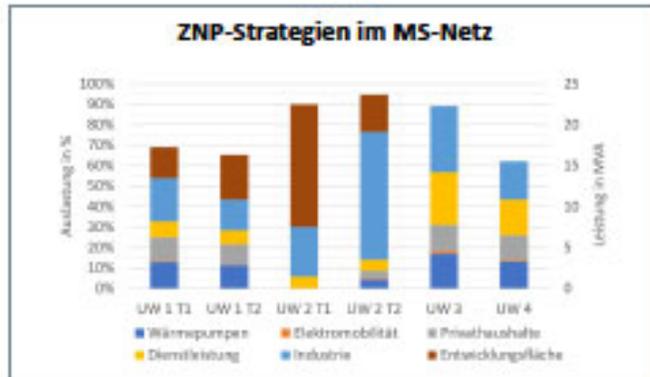
Störungen in Anlagen durch niederfrequente Oberschwingungen (im Feld)

- Erdschlussstromerkennung bei unsymmetrischen 3-fachen Harmonischen (Werkstatt)
- Schäden an Sperrdrosseln im Fall von Resonanzen mit Blindleistungskompensator (EEA)
- Vibrationen/Geräusche an Stromschienen wegen LED-Beleuchtungen, PV-Anlage und Klimaanlage mit Wechselrichtern (Bürogebäude)

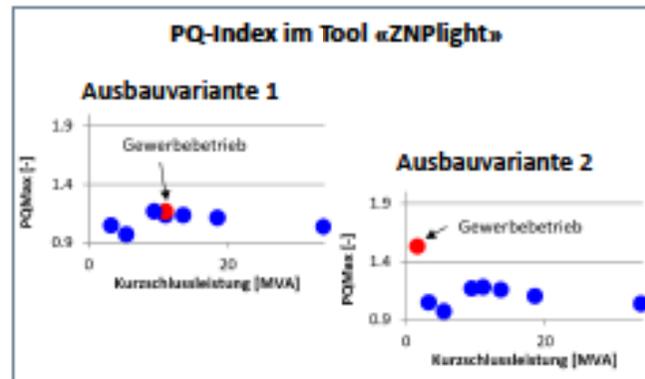
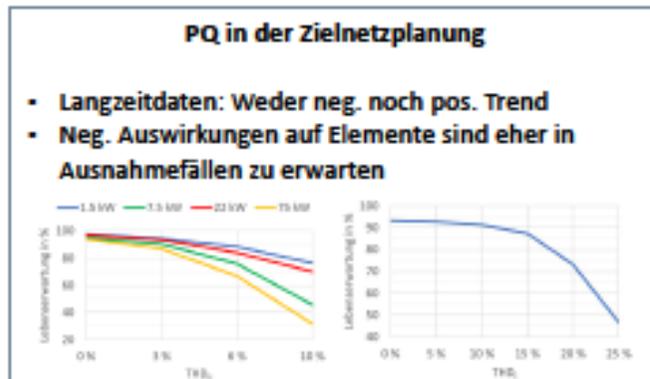
Arbeitspaket WP 4 (Einfluss auf PQ, fNI und PLC)



Arbeitspaket WP 5 (Zielnetzimpedanz)



- ### NS-Spannungsregler (inkl. Speichervariante)
- Technische und wirtschaftliche Aspekte von $P(U)$, $Q(U)$, WR-Reduktion und RONT betrachten
 - Die technisch und wirtschaftlich sinnvollste Option sollte für jede Anlage spezifisch anhand der gegebenen Netzdimensionierung und Leistungssituation beurteilt werden
 - Anstelle von Trafo- und/oder Leitungsverstärkung evtl. auch Speichervariante beurteilen



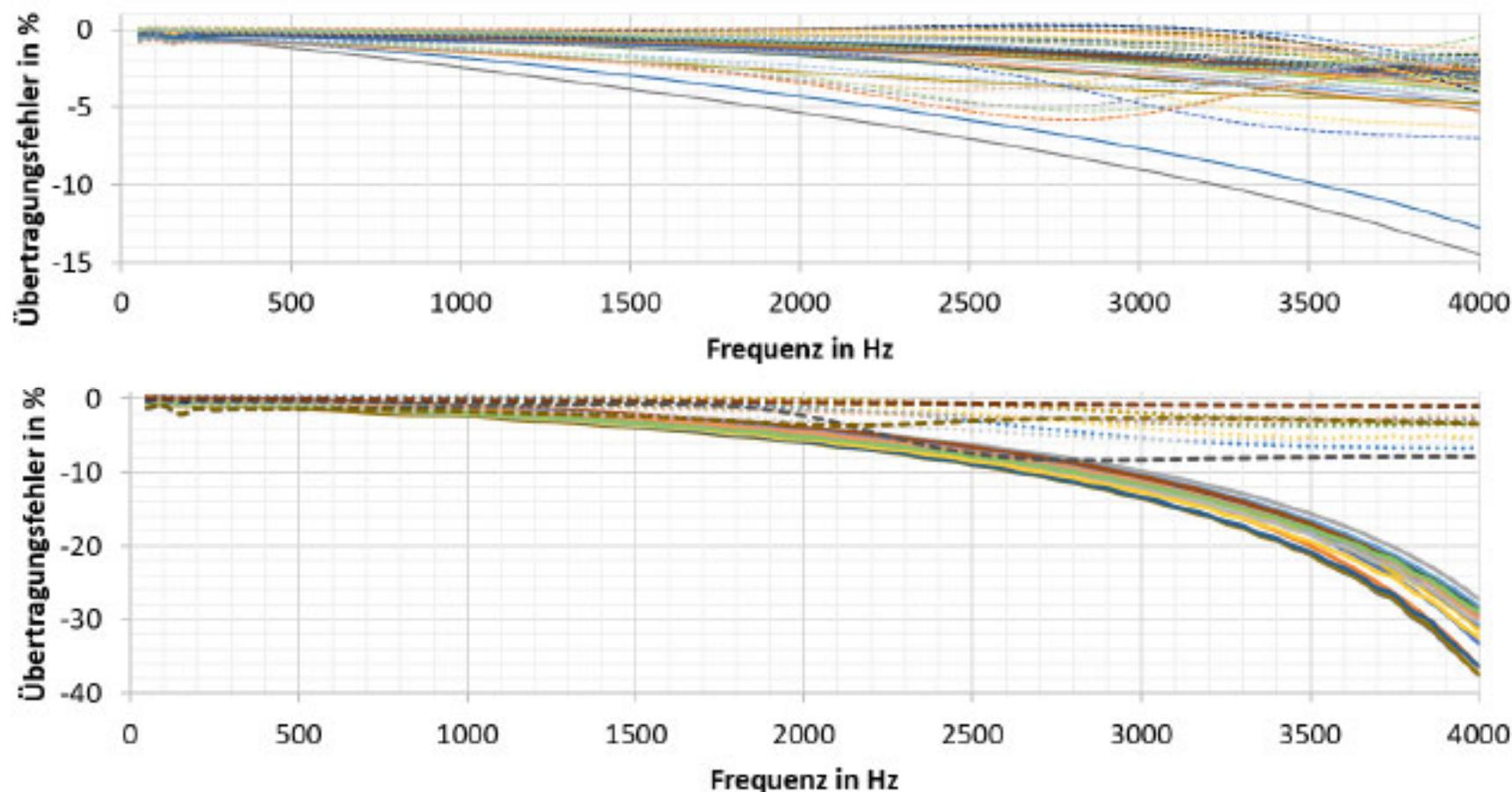
Empfehlungen für Planung und Betrieb

→ Kapitel 3.5 des [Schlussberichts](#)

Auswahl von Projektergebnissen

Übertragungsverhalten von MS-/NS-Spannungswandlern

Übertragungsverhalten von MS/NS-Spannungswandlern



Richtwerte für den max. Übertragungsfehler: <1 kHz → +/-2 %, <2 kHz → +/-4 %, <2.5 kHz → +/- 6 kHz

Viele Wandler eines spez. Typs halten die Richtwerte nicht ein!

Übertragungsverhalten von MS/NS-Spannungswandlern

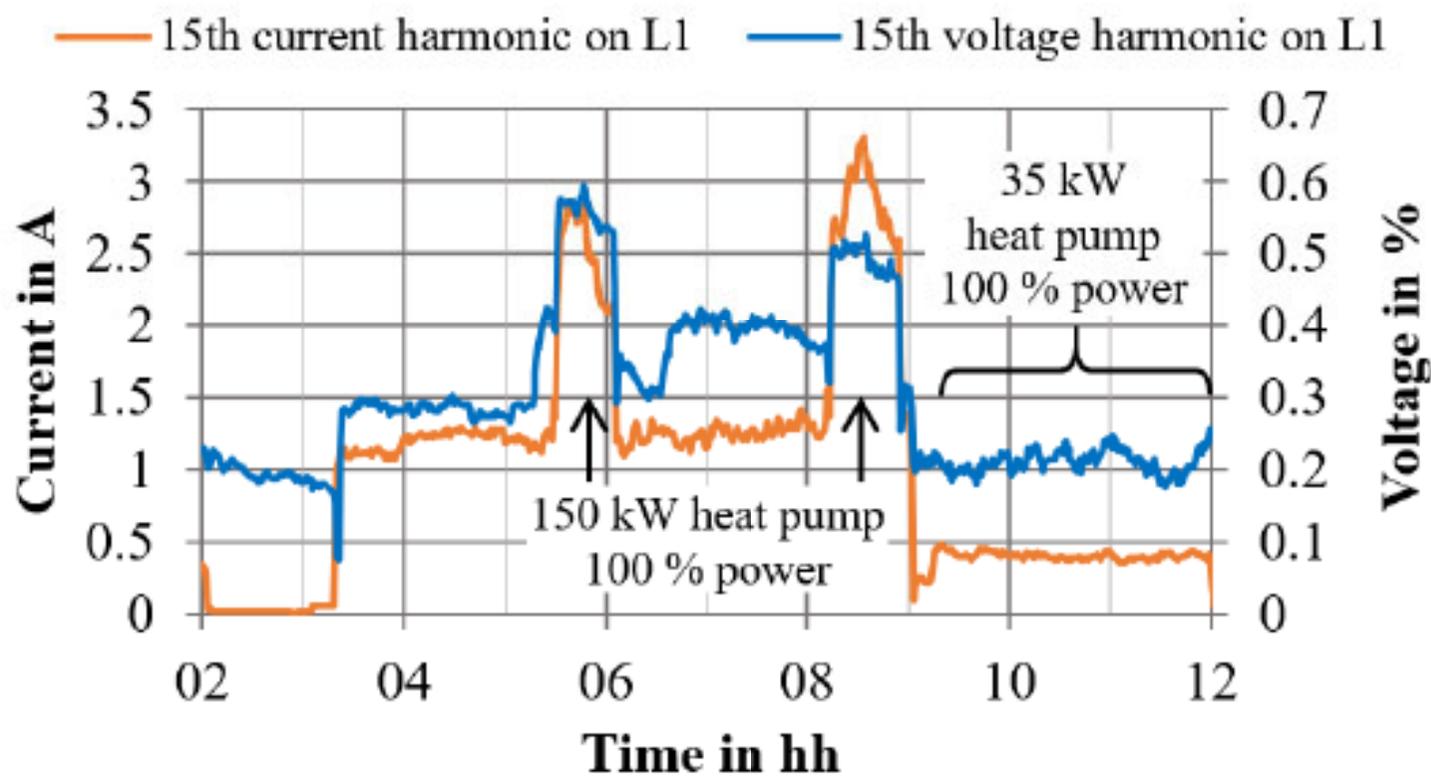
- ▶ Grossteil der Wandlertypen hielt Richtwerte ein
- ▶ Speziell ein Wandlertyp zeigte mit zunehmender Frequenz grosse Abweichungen
- ▶ Von den meisten Wandlertypen überschritten nur einzelne Wandler die Richtwerte
- ▶ Bis zur 25. Oberschwingung: Übertragungsfehler nie grösser als -3.1 %
- ▶ Oberhalb der 25. OS teils starke Zunahme des Übertragungsfehlers

Empfehlungen:

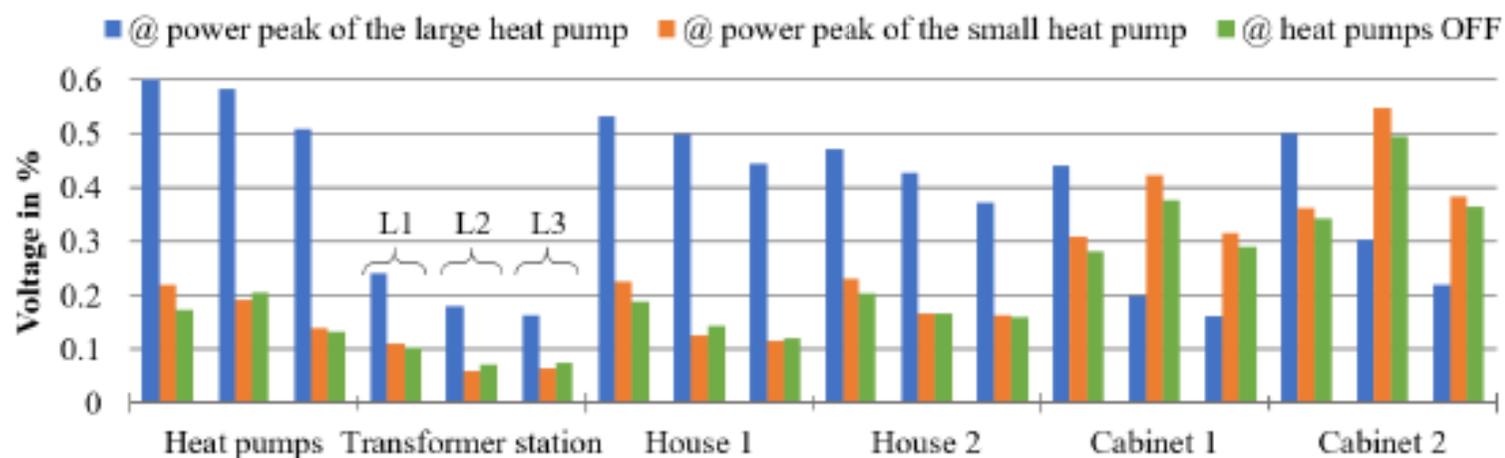
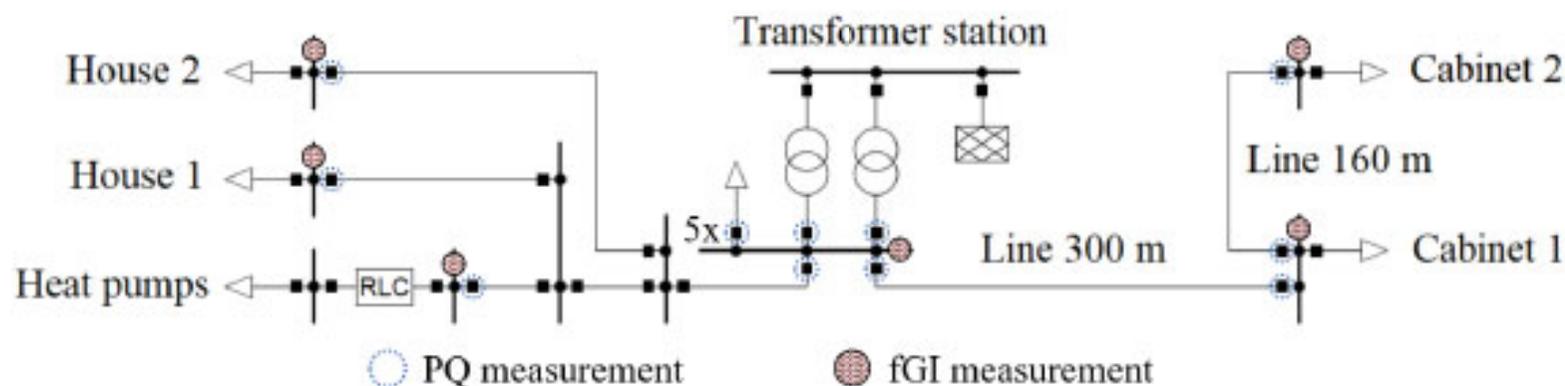
- ▶ Quantitative Aussagen nur bis 1.25 kHz vornehmen
- ▶ Oberhalb von 1.25 kHz eher qualitative Aussagen treffen, auch weil Phasenverschiebungen von bis zu -5.6° gemessen wurden
- ▶ Messung des THDU ist nur dann brauchbar, wenn sich die OS mit den höchsten Amplituden unterhalb von 1.25 kHz befinden

Einfluss einer 150-kW-Wärmepumpe auf die 15. Harmonische

Einfluss einer 150-kW-Wärmepumpe auf die 15. Harmonische



Einfluss einer 150-kW-Wärmepumpe auf die 15. Harmonische

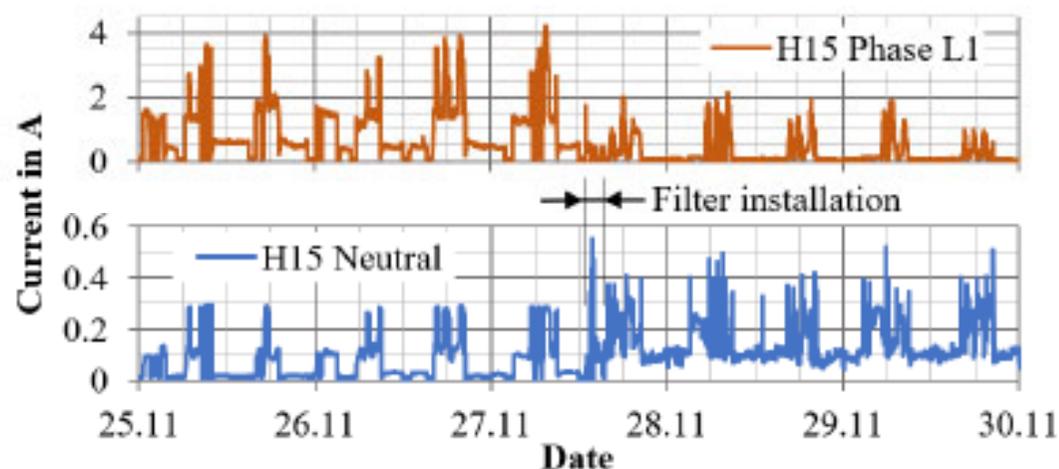
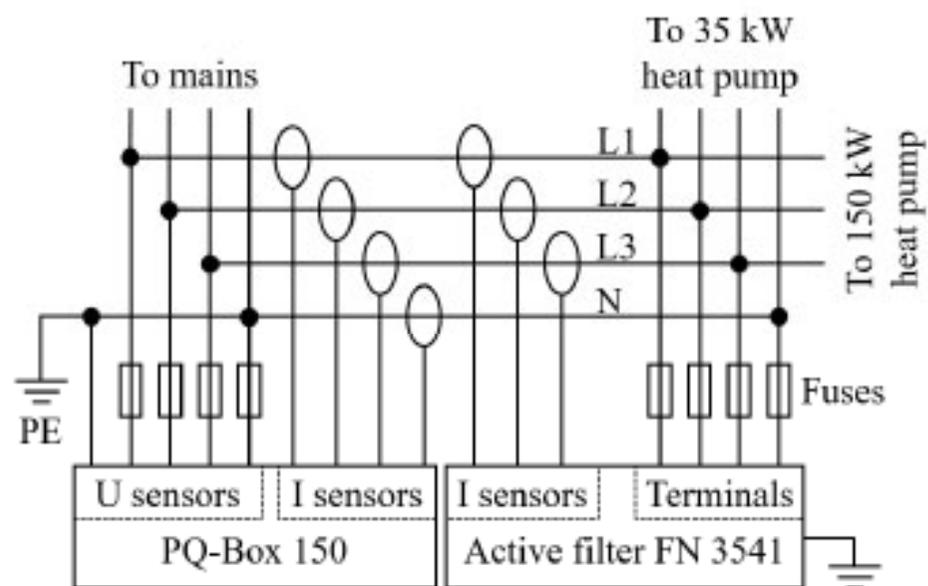


Einfluss einer 150-kW-Wärmepumpe auf die 15. Harmonische

- Installation eines Aktivfilters von Schaffner bei ewz



Einfluss einer 150-kW-Wärmepumpe auf die 15. Harmonische



- ▶ Ecosine Active Harmonic Filter (AHF) FN 3541 von Schaffner

Einfluss einer 150-kW-Wärmepumpe auf die 15. Harmonische

- ▶ Aktivfilter können die harmonischen Ströme kompensieren, welche durch die nichtlinearen Lasten erzeugt werden
- ▶ Dadurch verbessern sie das lokale Spannungsprofil
- ▶ Falls das Netz weitere, relevante nichtlineare Lasten (das kann auch die Summe vieler kleiner Lasten sein) aufweist, ist der Korrektoreffekt an vom Filter weiter entfernten Netzpunkten begrenzt

- ▶ Oberschwingungsspannungen werden nicht nur von einzelnen, grossen Lasten erzeugt, sondern auch durch die Gesamtheit aller nichtlinearer Lasten im Netz

Einfluss einer 150-kW-Wärmepumpe auf die 15. Harmonische

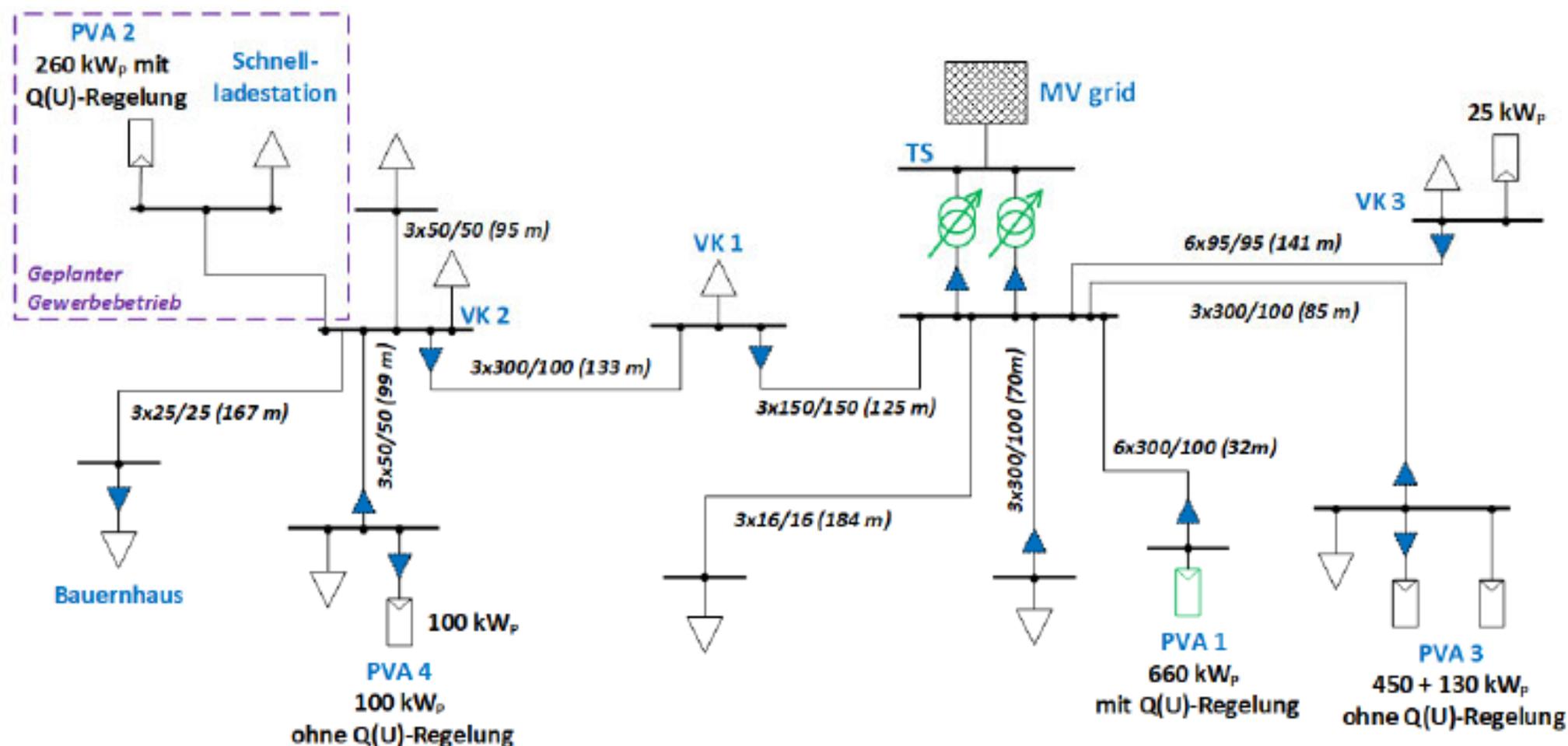
Empfehlungen:

- ▶ Zur Verringerung der Amplituden der untersuchten Oberschwingungen im gesamten Netz wäre eine aktive OS-Filterung an jedem Knotenpunkt mit relevanten OS-Strömen erforderlich
- ▶ Bevor Massnahmen ergriffen werden ist aber zu beurteilen, ob die erhöhten OS-Pegel überhaupt zu Störungen führen. Hinweis: Für die 15. und 21. Harmonische wurde der Grenzwert in der EN 50160 erhöht
- ▶ Hinsichtlich zukünftiger Netzvarianten mit einer grossen Anzahl an leistungsfähiger Leistungselektronik sollten Emissionsgrenzwerte auch für Frequenzen >2.5 kHz in Normen definiert werden

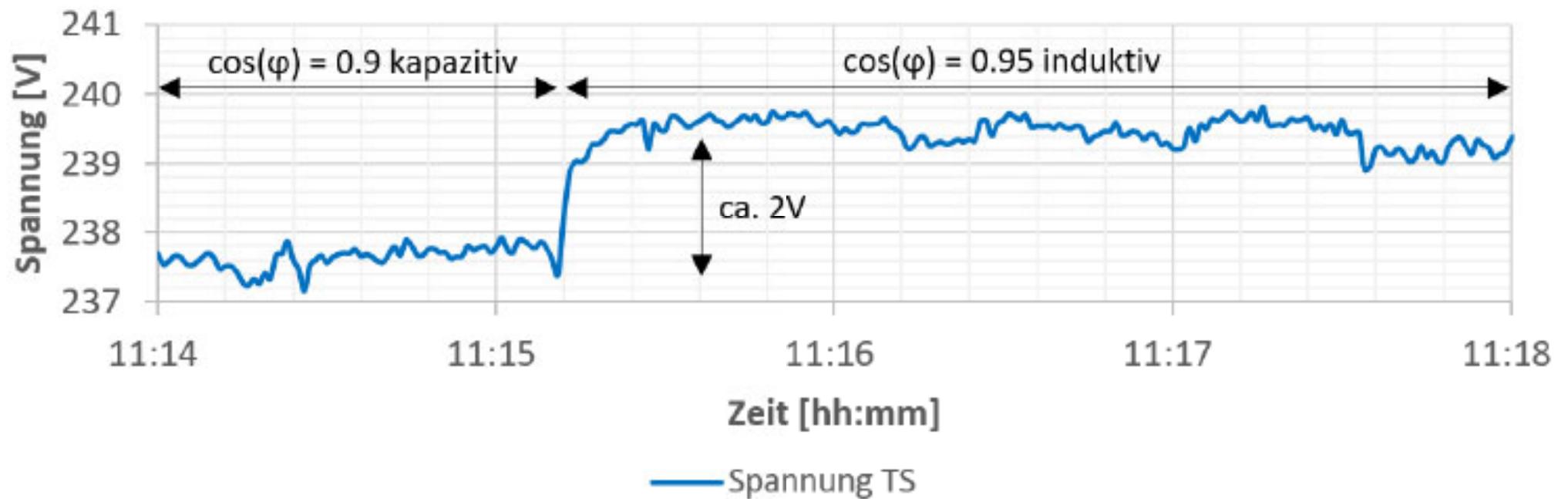
Auswahl von Projektergebnissen

Spannungsregelung im Niederspannungsnetz

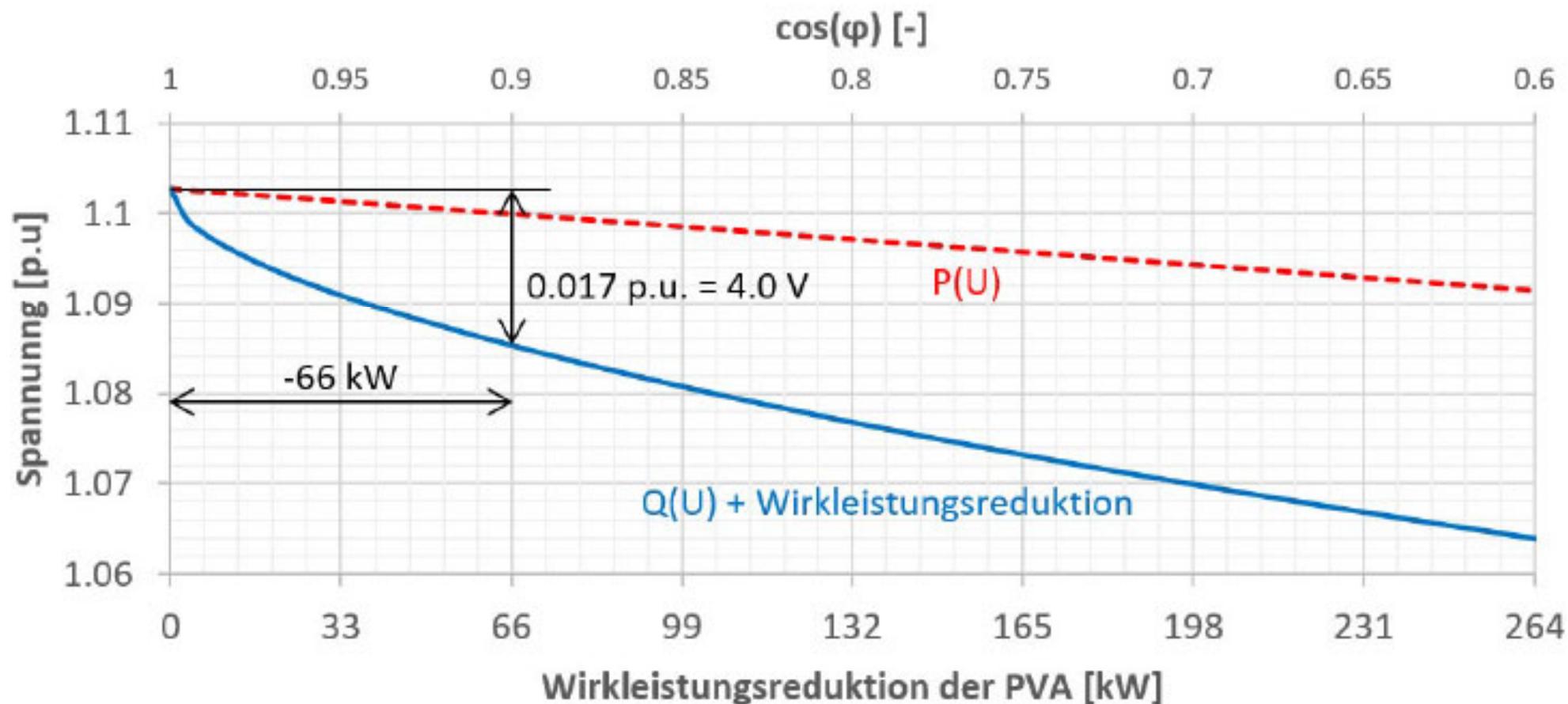
Spannungsregelung im Niederspannungsnetz



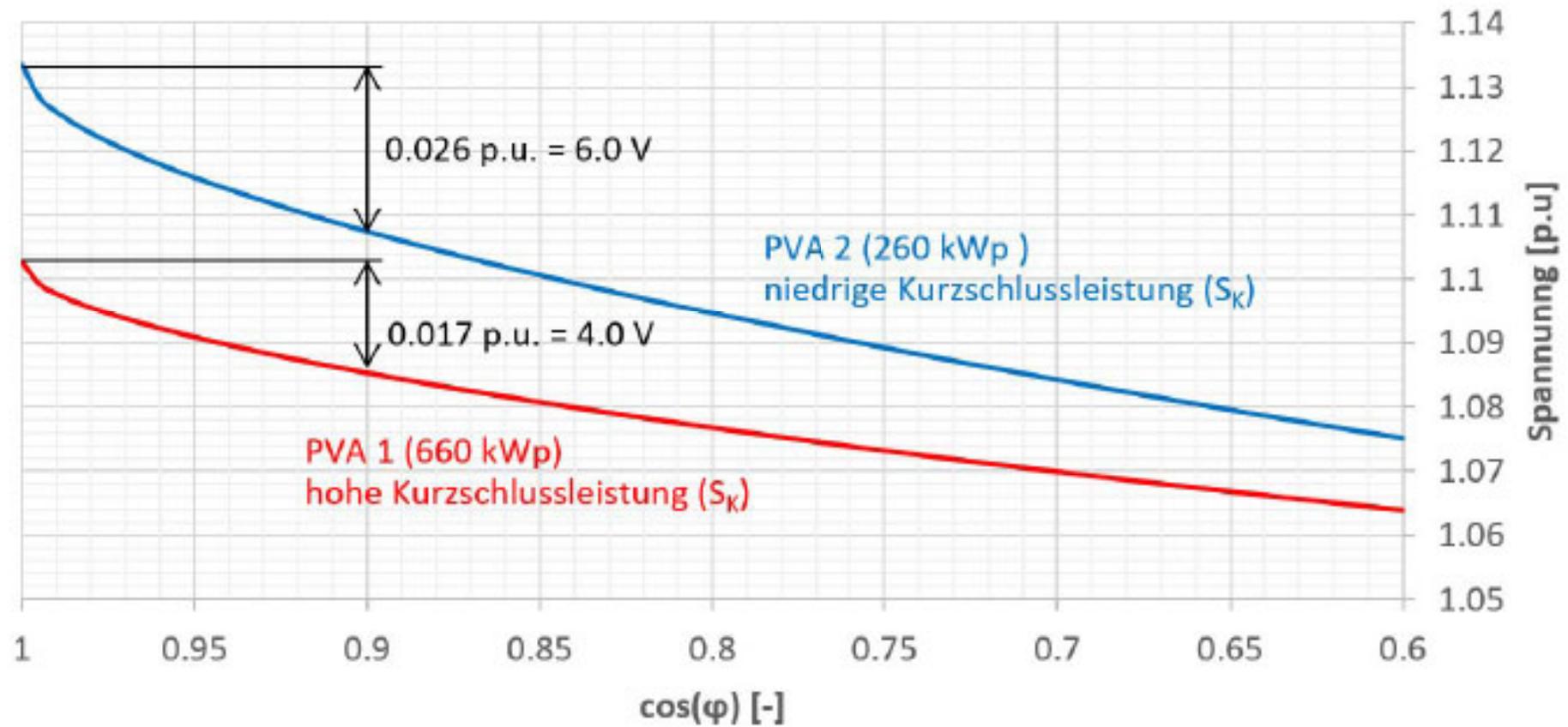
Spannungsregelung im Niederspannungsnetz



Spannungsregelung im Niederspannungsnetz

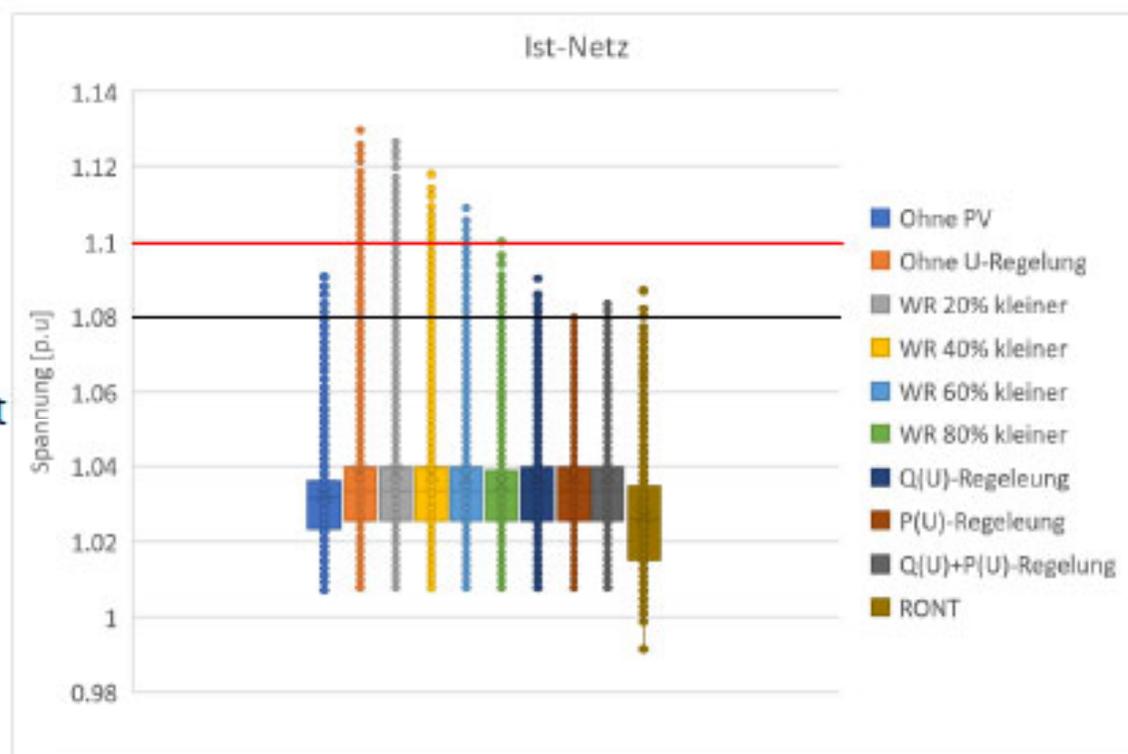


Spannungsregelung im Niederspannungsnetz



Spannungsregelung im Niederspannungsnetz

- ▶ Ohne Regelung treten Grenzwertverletzung auf
- ▶ Lineare Abnahme der Spannungsspitze bei Reduzierung der Anzahl WR
- ▶ WR müssten um 80 % reduziert werden, damit Grenzwertverletzungen vermieden werden können
- ▶ Q(U)- und P(U)-Reglung ist am wirksamsten
- ▶ RONT senkt die gesamte Bandbreite aller simulierter Spannungen im Netz



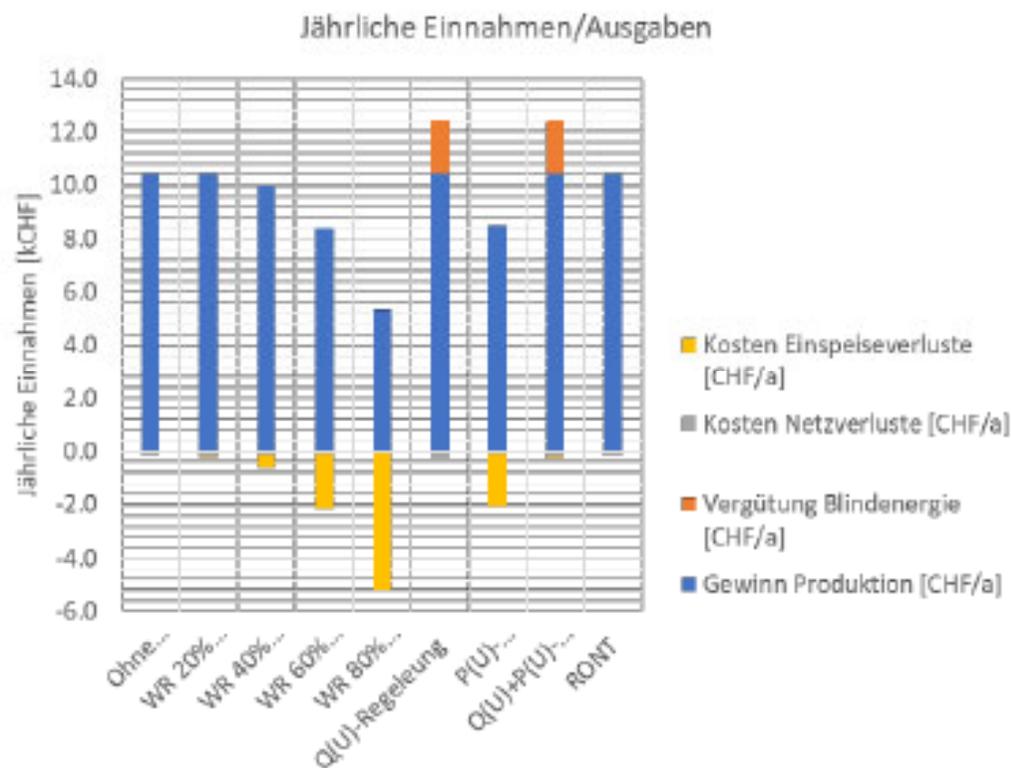
Boxplots aller simulierter Spannungswerte eines Jahres

Spannungsregelung im Niederspannungsnetz

- ▶ Annahme Energiepreis: 4 Rp./kWh
- ▶ Annahme Blindenergievergütung: 5 Rp./kvarh

- ▶ Q(U)-Regelung im Falle einer Blindleistungvergütung (Erbringung einer Dienstleistung) am wirtschaftlichsten

- ▶ Kosten durch zusätzliche Netzverluste sind vernachlässigbar gering



Spannungsregelung im Niederspannungsnetz

- ▶ An Netzknoten mit niedriger Kurzschlussleistung ist der Effekt grösser als an Netzknoten mit hoher Kurzschlussleistung → Spannungsänderung über der Leitung ist wegen der höheren Leitungsimpedanz grösser
- ▶ Instabile Wechselwirkungen der Q(U)-Regelung mit der RONT-Regelung sind nicht zu erwarten
- ▶ Q(U)- und P(U)-Regelung haben nicht nur lokal bei der geregelten Anlage einen positiven Effekt, sondern, bedingt durch die Trafoimpedanz, im gesamten Netz