

Untersuchung und Validierung der Stabilität der Photovoltaik-Integration in ein industrielles MS-Netz auf Grundlage von PHIL-Tests



SCIENCE
PASSION
TECHNOLOGY

Dipl.-Ing. Carina Lehmal*

Dipl.-Ing. Dr.techn. Ziqian Zhang

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert



Übersicht

- Themenbeschreibung und Ausgangssituation
- Validierung im stationären Zustand
- Validierung im transienten Zustand
- Laborversuch
- Schlussfolgerungen und Ausblick

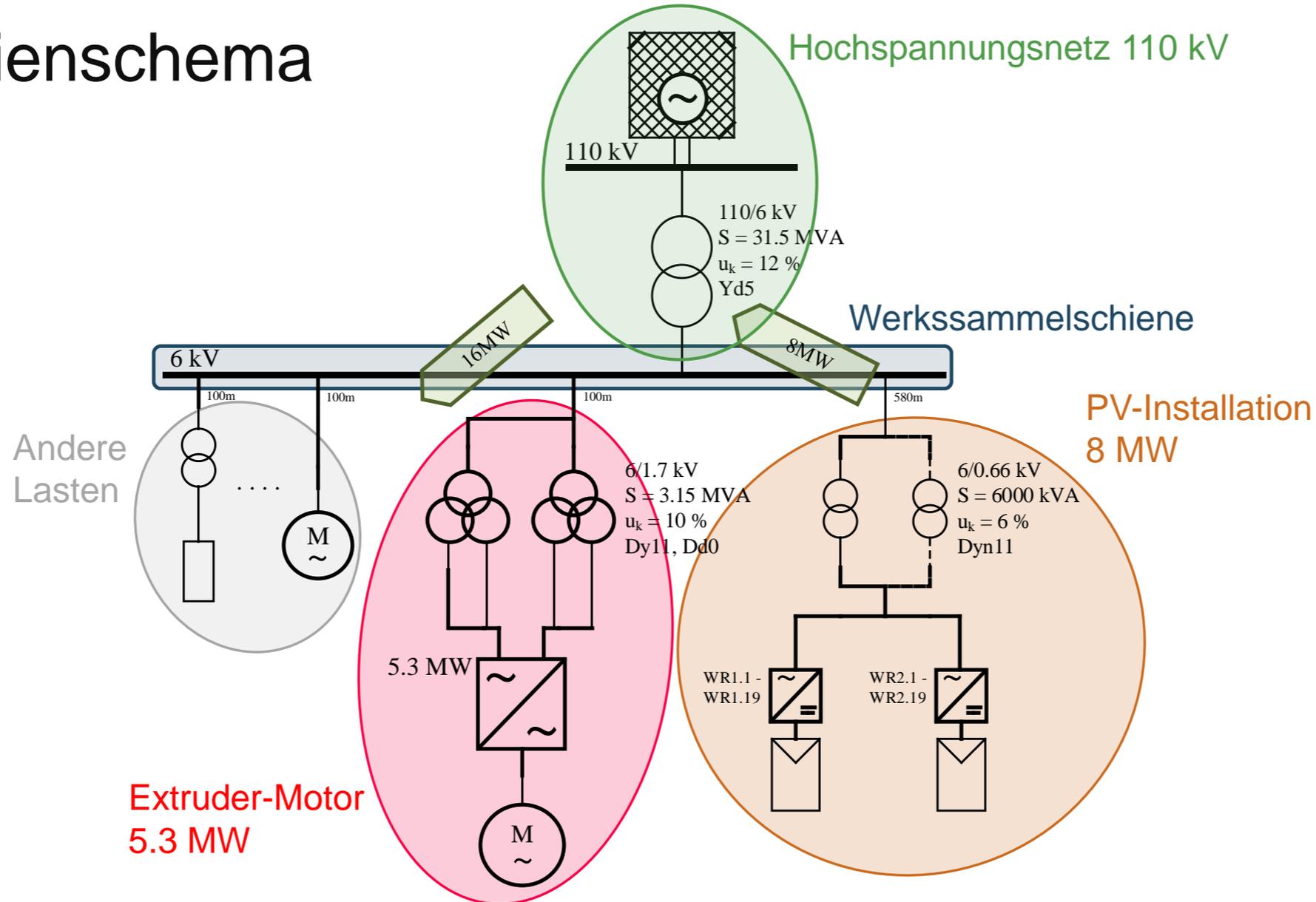
Themenbeschreibung

- Veränderung des Stromnetzes in umrichterbasiertes Netzsystem
 - Bauteile im Umrichter beeinflussen die Netzstabilität negativ
 - Großunternehmen wollen Produktionskapazitäten durch Eigenerzeugung decken ohne ihr Werksnetz zu destabilisieren
 - Kostengünstige, verlässliche Aussage vom Ist-Zustand mit Eigenerzeugung wird benötigt
- Kontroll- und Bewertungssystem ausgearbeitet

Ausgangssituation

- Untersuchung der Auswirkungen der 8-MW-Photovoltaikanlage bei Parallelbetrieb mit dem 5,3-MW-Extruder-Frequenzumrichter
 - Änderung der Spannungssituation und Power Quality für die Firma
 - Anschlusskompatibilität
 - Reglerstabilität und Netzstörungen
 - Resonanzinstabilitäten und Transienten
 - Laboruntersuchung und Feldtest
 - Untersuchung von möglichen Gegenmaßnahmen

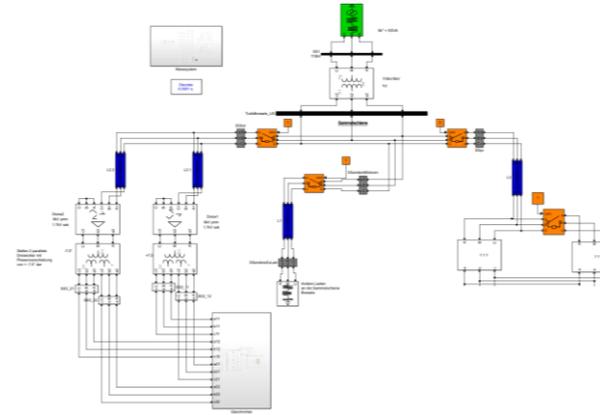
Einlinienschema



Vor-Ort-Messung

- Durchschnittlicher Fehler für die Spannung zwischen Messung und Simulation:
 - 1 %
- Durchschnittlicher Fehler für den Strom zwischen Messung und Simulation:
 - 1%

PASS



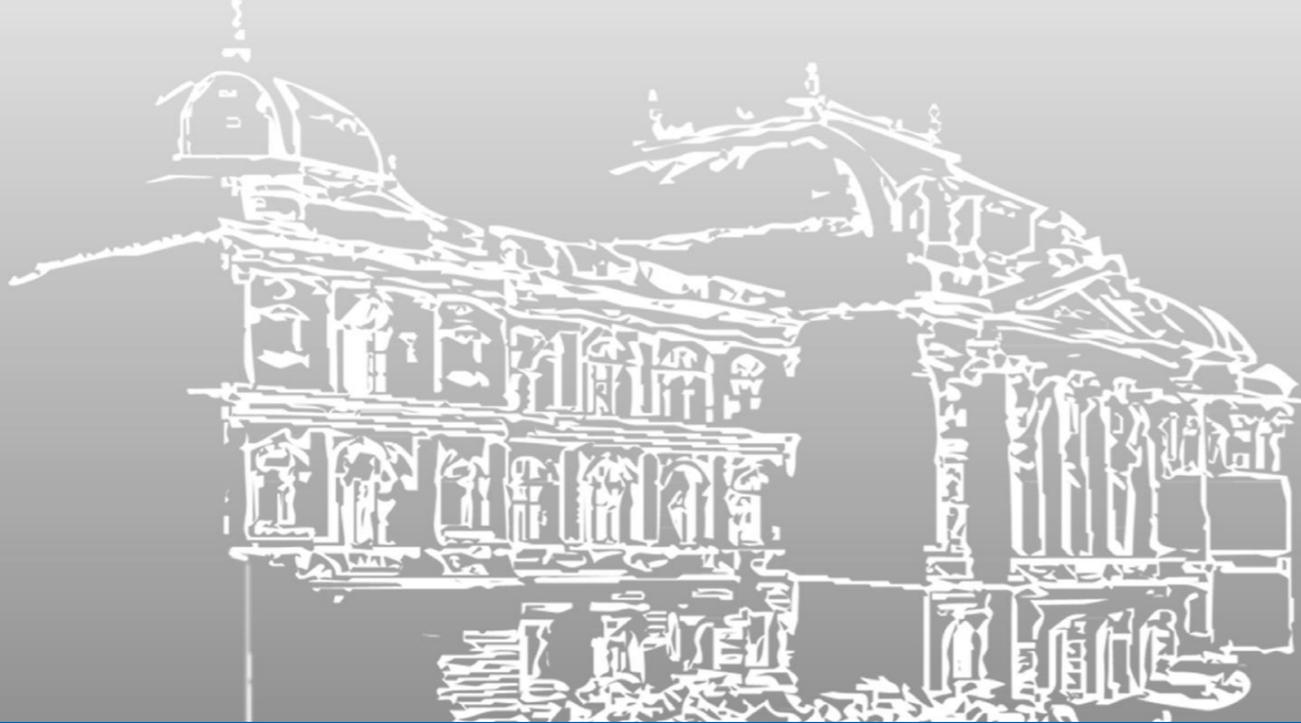
Simulationsmodell



Messaufbau

Evaluierungen

- Validierung im stationären Zustand
 - Leistungserhöhung der PV-Einspeisung verändert Strom- und Spannungsverhältnisse
 - Für Spannungsstabilität: Spannungserhöhung muss sehr gering sein
- Validierung im transienten Zustand
 - Die Regelung des Wechselrichters interagiert mit dem Netz
 - Für die transiente Stabilität: Korrekte Funktion der Wechselrichtersteuerung



Validierung im stationären Zustand

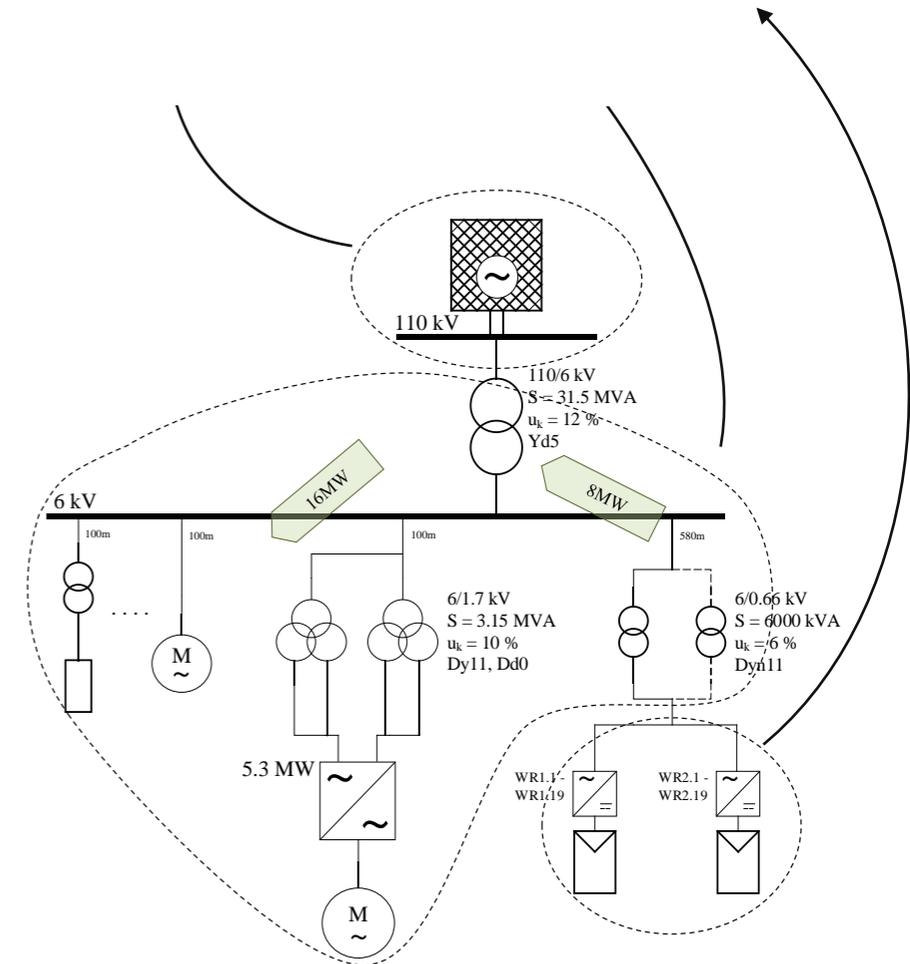
Spannungsstabilität

- Abnahme oder Einspeisung von P und Q verändert Spannungsverhältnisse
 - Abnahme → Spannungsabfall
 - Einspeisung → Spannungsanstieg

$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi = R \cdot I_w + X \cdot I_b$$

$$= R \cdot \frac{P_L}{U} + X \cdot \frac{Q_L}{U}$$

$$\rightarrow \Delta u = \frac{\Delta U}{U_N} = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_N^2}$$



IEC-61000-2-4: EMV Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen in Industrieanlagen

Δu	Δu 23 rd order	Δu 25 th order
-15% to +10%	2.8 %	2.6 %

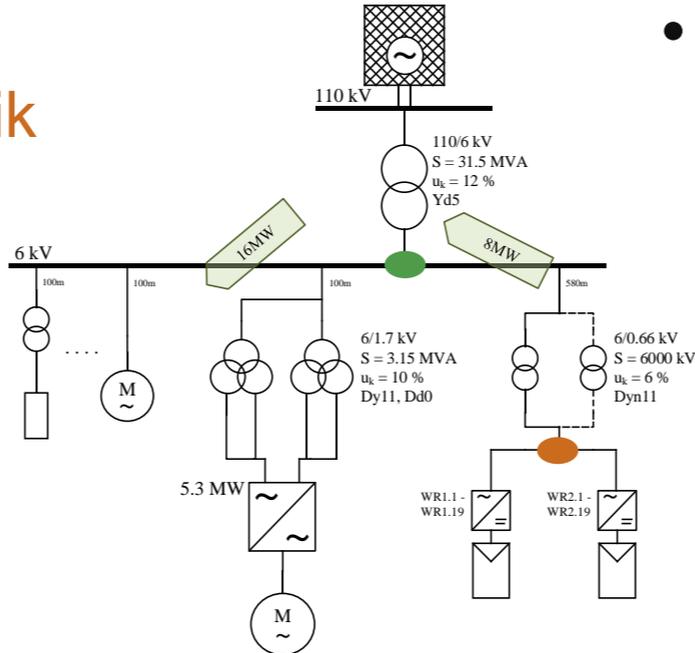
- Worst-Case:
Spannung der Photovoltaik

$$\Delta u = 0.032 = 3.3 \% \rightarrow 1.65\%$$

$$\Delta u_{23} = 0.4 \%$$

$$\Delta u_{25} = 0.8 \%$$

PASS



- Worst-Case:
Spannung der Sammelschiene

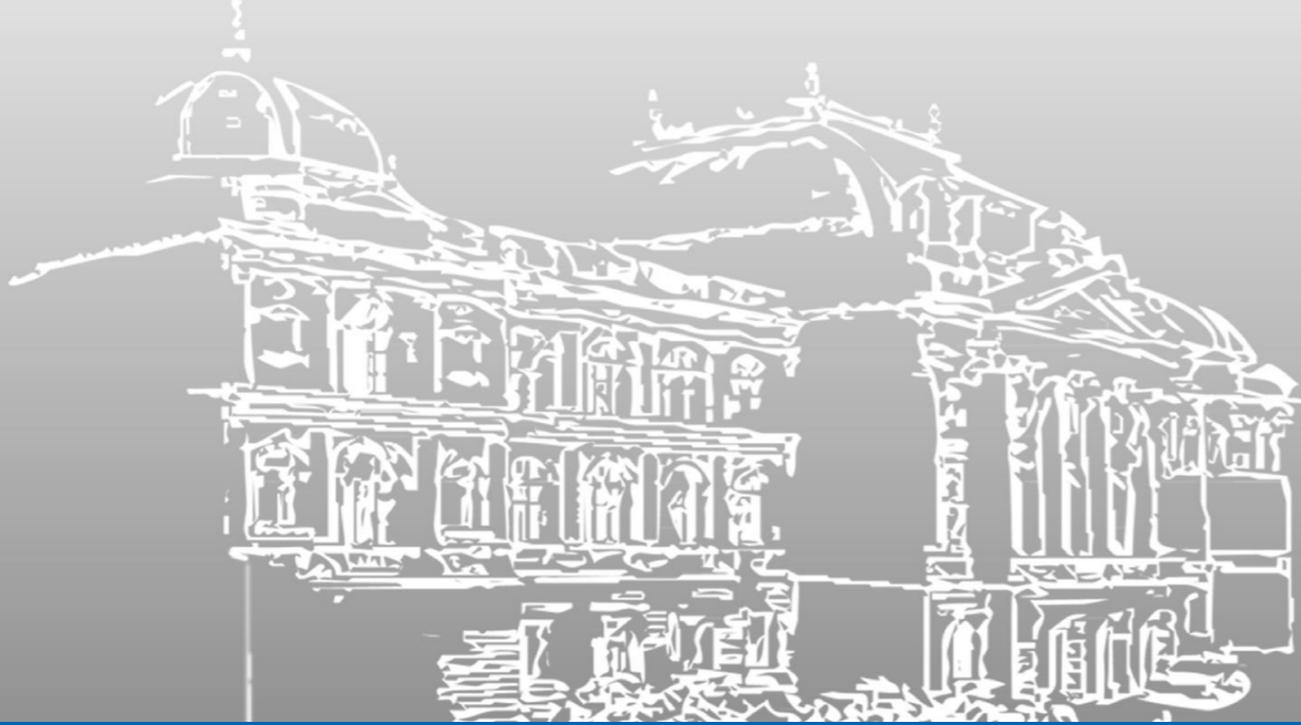
$$\Delta u = 0,011 = 1,1\%$$

$$\Delta u_{23} = 0.9 \%$$

$$\Delta u_{25} = 1.1 \%$$

PASS

- Empfehlung:
Geeigneter Kabelquerschnitt und Betrieb mit $\cos\varphi = 1$



Validierung im transienten Zustand

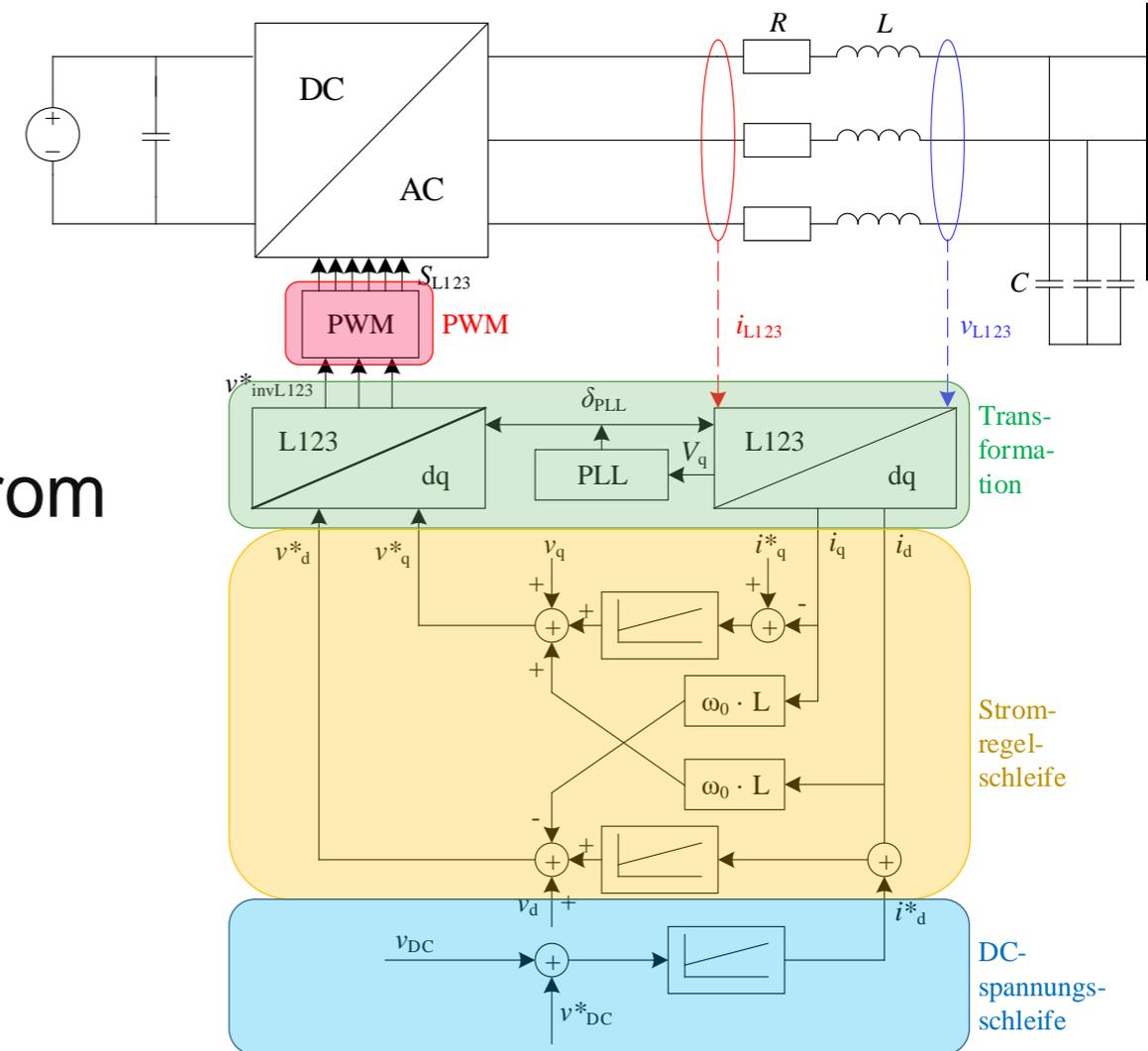
Wechselrichter-Netzsystem

PLL: steuert und synchronisiert die Phase der Netzspannung

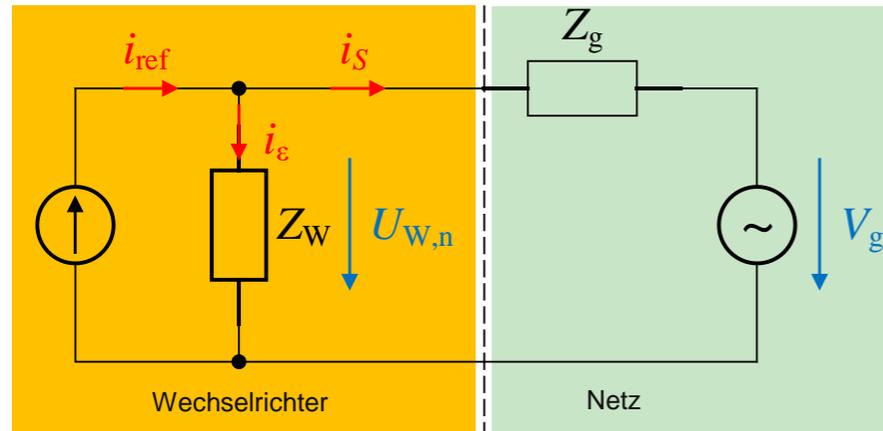
Strom-Schleife: steuert den Ausgangsstrom für die Referenz

DC-Schleife: steuert die Leistungsbilanz am Zwischenkreis

PWM: steuert die Schalter des Wechselrichters

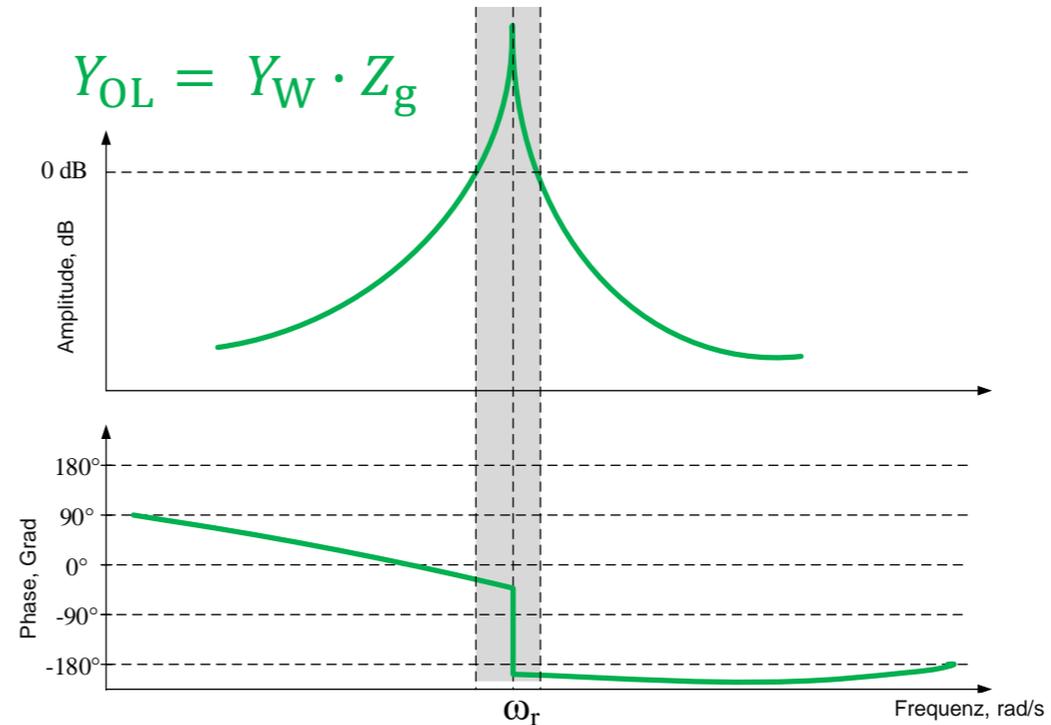


Open-Loop-Funktion



Allgemeine Gleichung des Kleinsignalmodells:

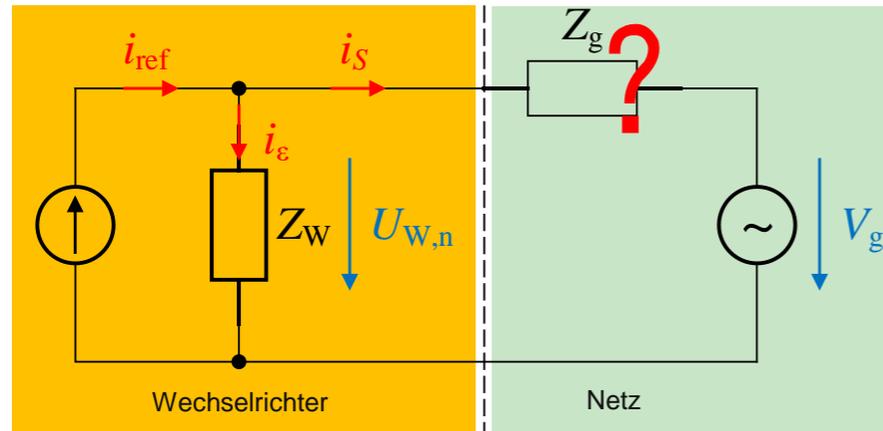
$$\Delta i_s = \frac{G_{ci}(s)}{1 + Y_W(s)Z_g(s)} \Delta i_{ref} + \frac{Y_W(s)}{1 + Y_W(s)Z_g(s)} \Delta V_g$$



Dadurch gilt:

- Frequenzbereich, in dem der Betrag von Y_{OL} größer als 0 ist, bewirkt beim Phasenwinkel $\pm 180^\circ$ - Sprung
→ Nyquist-Stabilitätskriterium: Instabil!

Stabilität des Wechselrichters



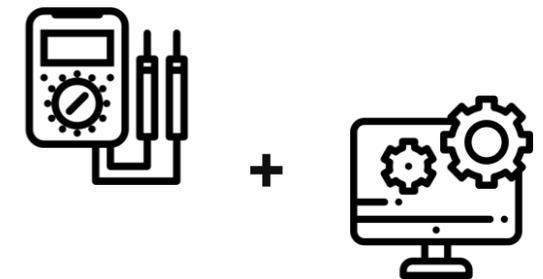
Allgemeine Gleichung des Kleinsignalmodells:

$$\Delta i_s = \frac{G_{ci}(s)}{1 + Y_W(s)Z_g(s)} \Delta i_{ref} + \frac{Y_W(s)}{1 + Y_W(s)Z_g(s)} \Delta V_g$$

- Ohne Netzinformation: Stabilität des Wechselrichters ebenfalls bestimmbar
→ Impedanzbasierter Ansatz mit „Frequency Sweep“-Messung von $Y_W(\omega)$
- Generelles Nyquist-Kriterium:
 - Wenn $\arg(Y_W(\omega)) > \text{or} < \pm 90^\circ = \text{Re}\{Y_W(\omega)\} < 0$
→ Nicht stabil, wenn ω bei ω_r
 - Wenn $\text{Re}\{Y_W(\omega)\} > 0 \quad \forall \omega \in (0, f_s]$
→ Stabil, die Resonanz der Netzimpedanz hat keinen Einfluss auf die Stabilität des Wechselrichters

Methode der Impedanzanalyse

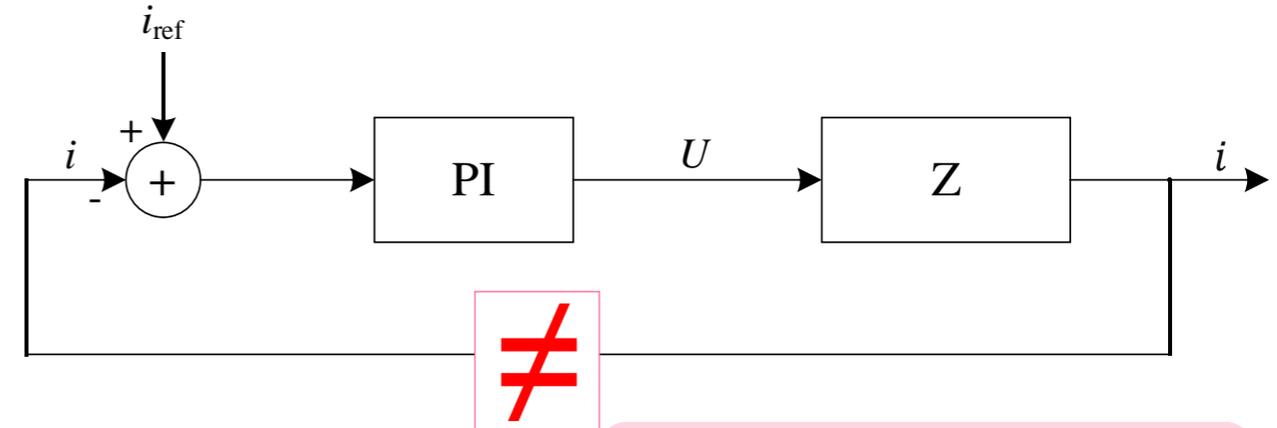
- Kleinsignalanalyse des Modells und Wechselrichters
 - dq-Impedanzmodellierung erforderlich
- “Frequency Sweep” des Modells und Wechselrichters
- Auswertung über generelles Nyquistkriterium
- Vorteil:
 - Impedanz ist direkt messbar
→ Z_w bezieht sich nicht nur auf Hardware, sondern auch auf Software
 - Keine Parameterdaten vom Hersteller erforderlich (Black Box)



Kleinsignalmodellierung mit PLL

$$\Delta U = Z \cdot \Delta I$$

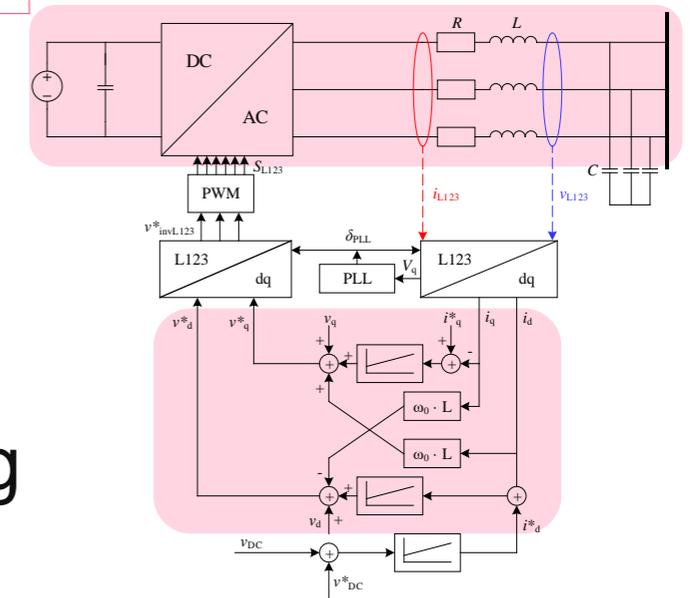
$$\Delta U = Z \cdot (\Delta i_{ref} - \Delta i)$$



→ Problem: Reglergrößen \neq Systemgrößen

→ Größen sind nicht synchronisiert

→ Lösung: Verwendung der PLL bei der Modellierung



Kleinsignalmodell des Gesamtsystems

- PLL -Integration zwischen System und Controller:

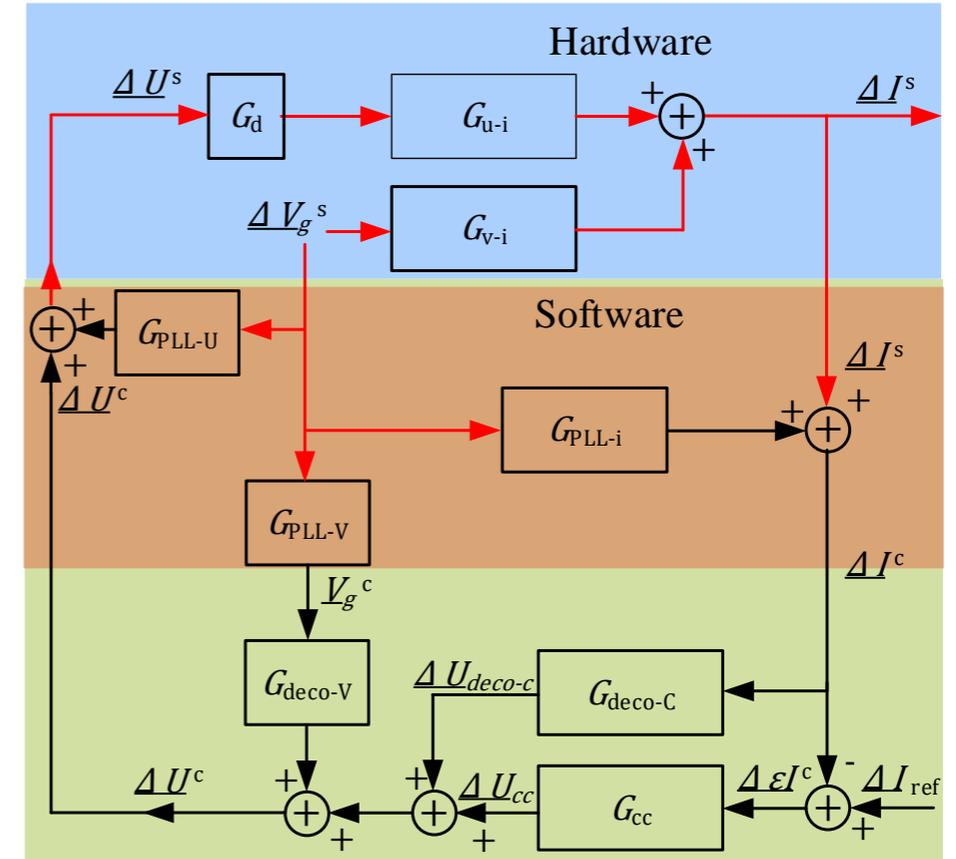
$$H_{PLL} = \frac{1}{s} \cdot \left(k_{p-PLL} + \frac{k_{i-PLL}}{s} \right)$$

$$\Delta\theta_{PLL} = H_{PLL} \cdot \Delta V_{q-s}$$

$$G_{PLL-V} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ H_{PLL} & V_g \end{bmatrix}$$

$$G_{PLL-I} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -H_{PLL} I_{dref} \end{bmatrix}$$

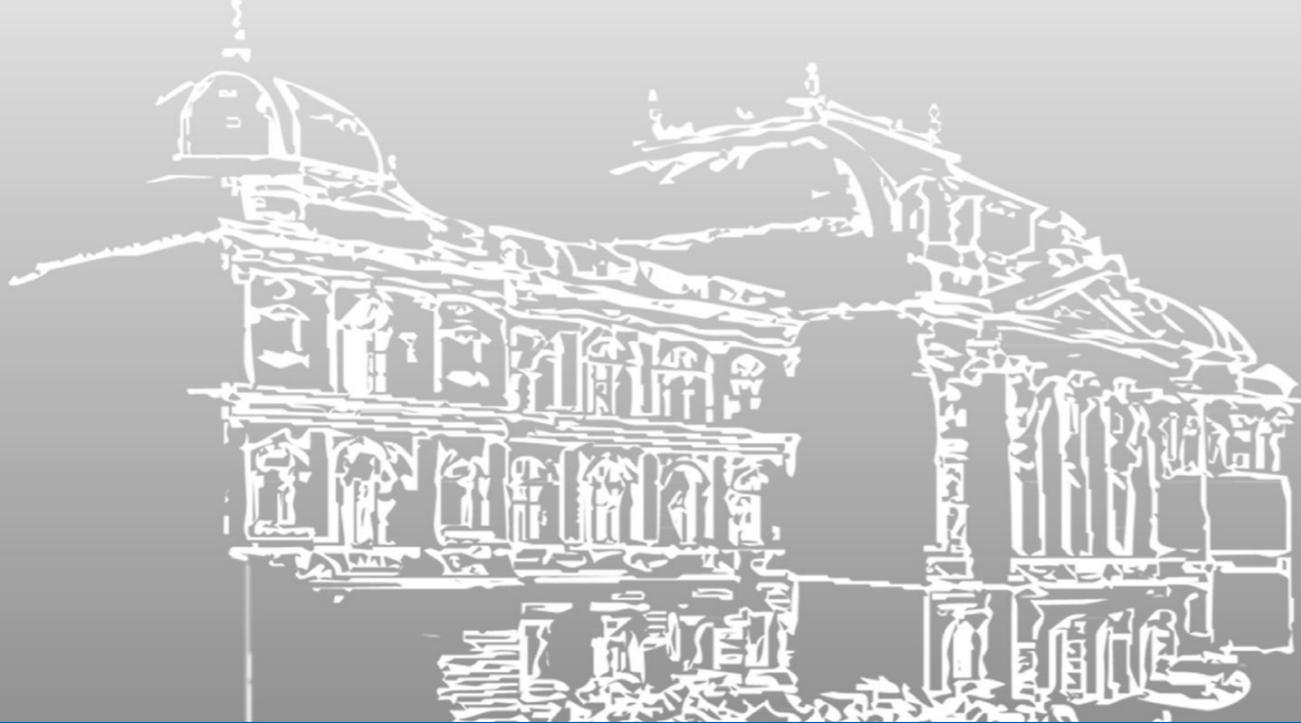
$$G_{PLL-U} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -H_{PLL} V_g \end{bmatrix}$$



Finale Gleichung: $\Delta I_s = G_{ctr} \cdot \Delta I_{ref} + Y \cdot \Delta V_g$

Mit:

$$Y = - \frac{(-G_{cc} G_d G_{PLL-I} G_{u-i} + G_d G_{PLL-I} G_{deco-C} G_{u-i} + G_d G_{PLL-V} G_{deco-V} G_{u-i} + G_d G_{PLL-U} G_{u-i} + G_{v-i})}{-G_{cc} G_d G_{u-i} + G_d G_{deco-C} G_{u-i} - 1}$$



Laborversuche

16.02.2022-18.02.2022 – EnInnov22

Laboratory test

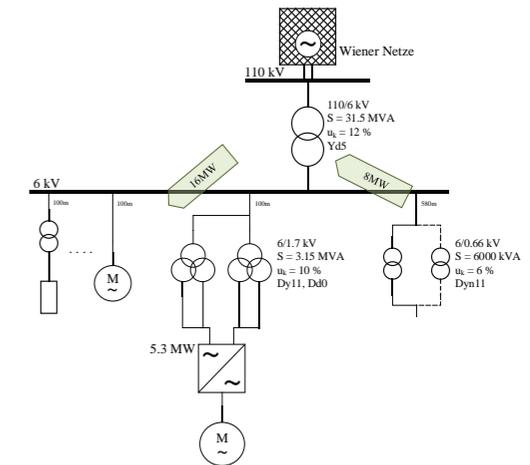
1.) "Frequency Sweep"

a) Reale Wechselrichter

- Über eine zusätzliche Spannungsquelle, die Oberschwingungen verursacht

b) Grid model in Simulink (offline)

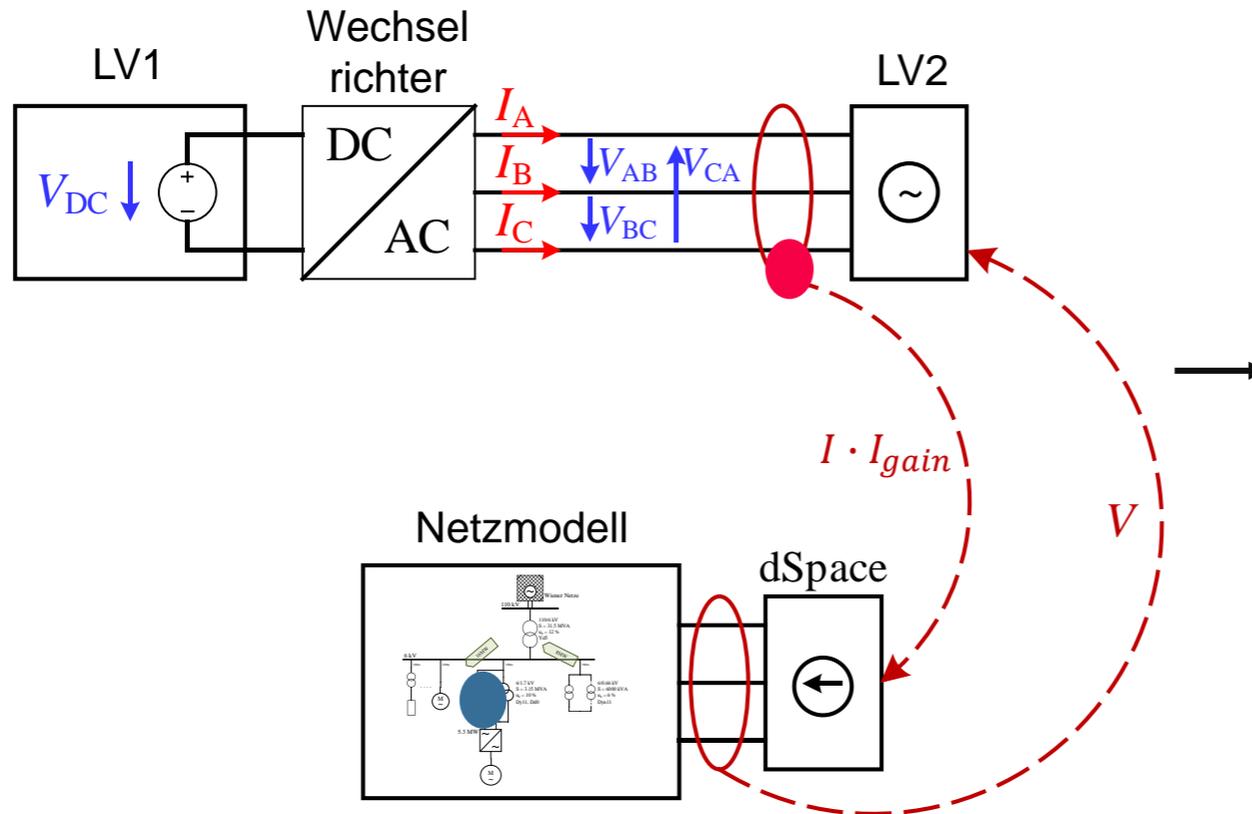
- Über eine zusätzliche Stromquelle, die Oberschwingungen verursacht



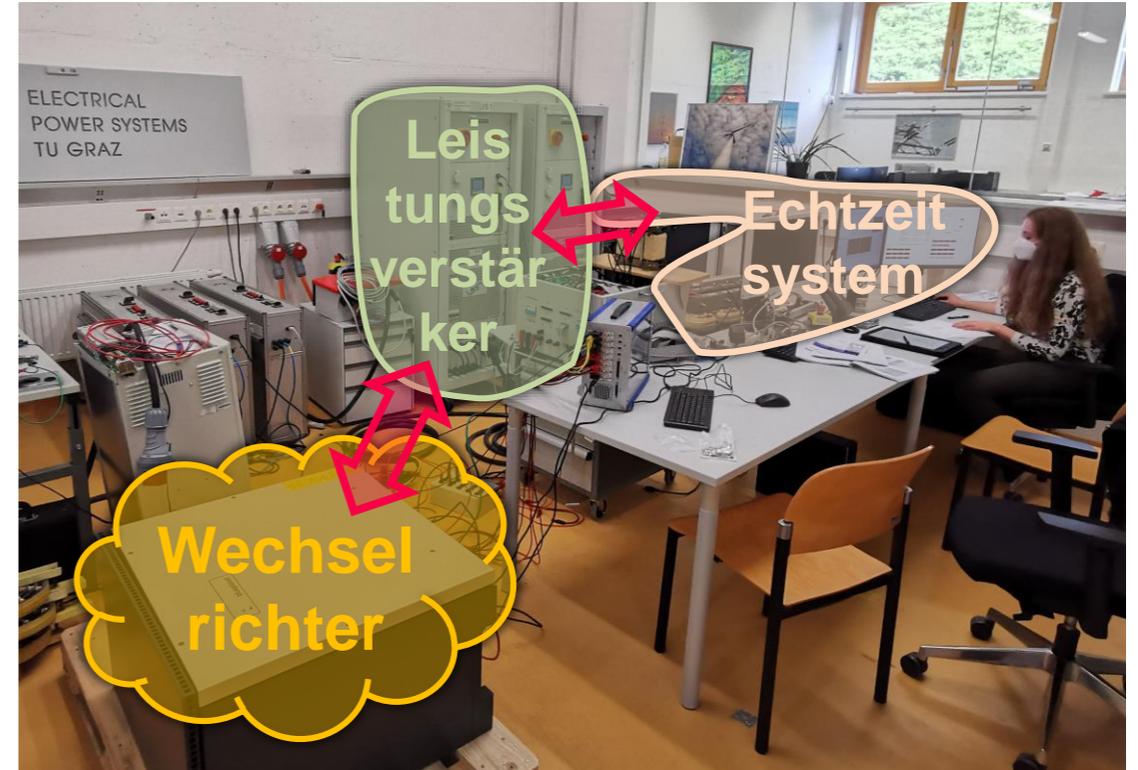
2.) PHIL – Test

1.) Frequency Sweep: Wechselrichter 1 vs. Wechselrichter 2 vs. Netzimpedanz

2.) PHIL – Test: Setup

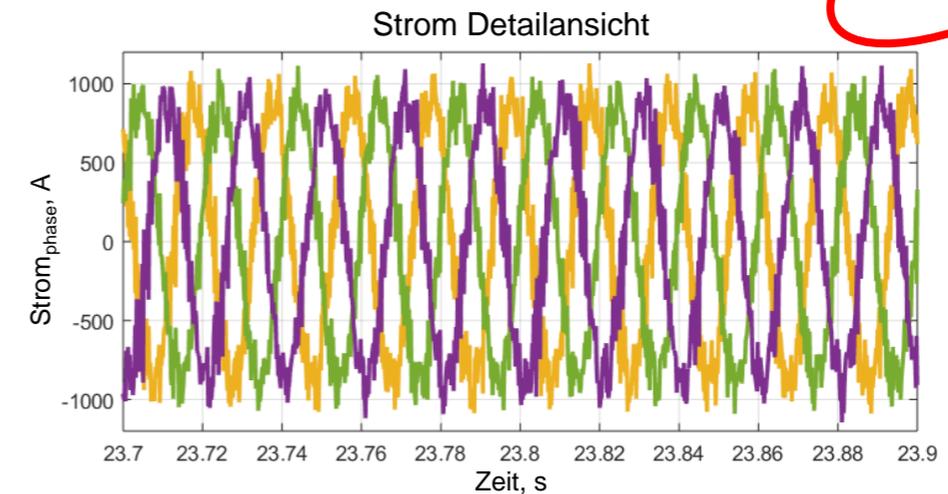
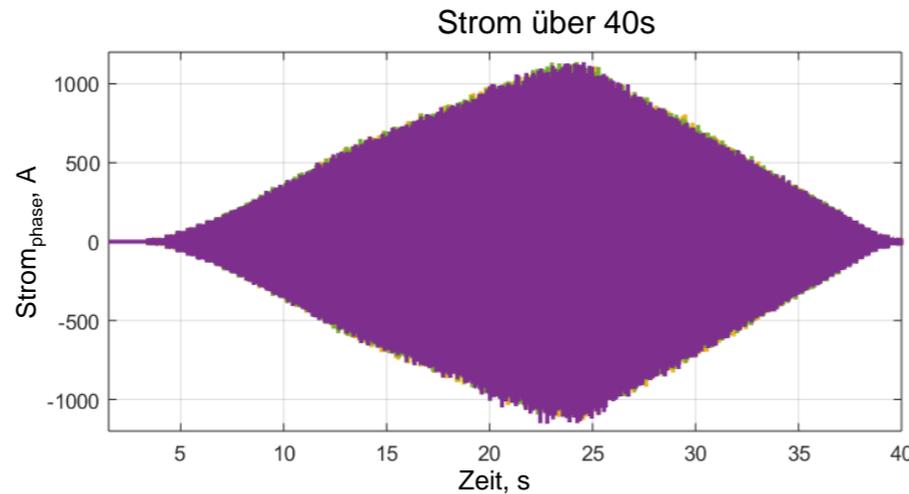
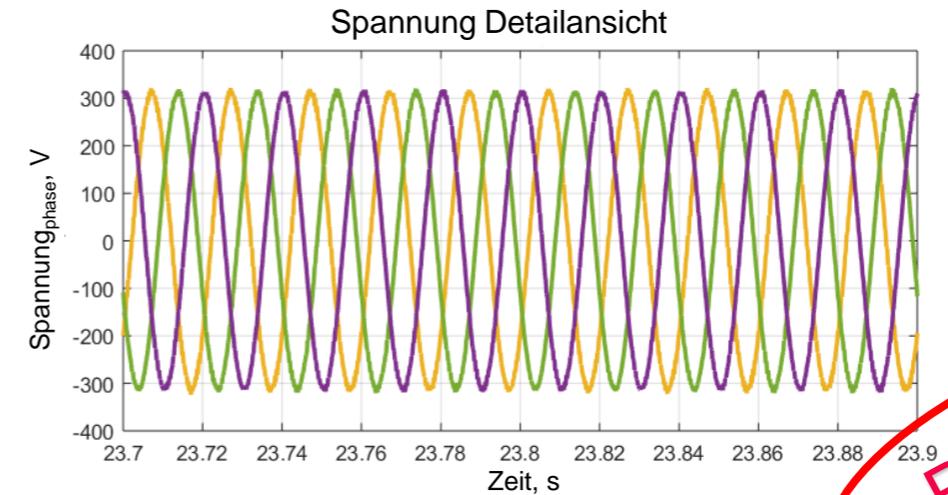
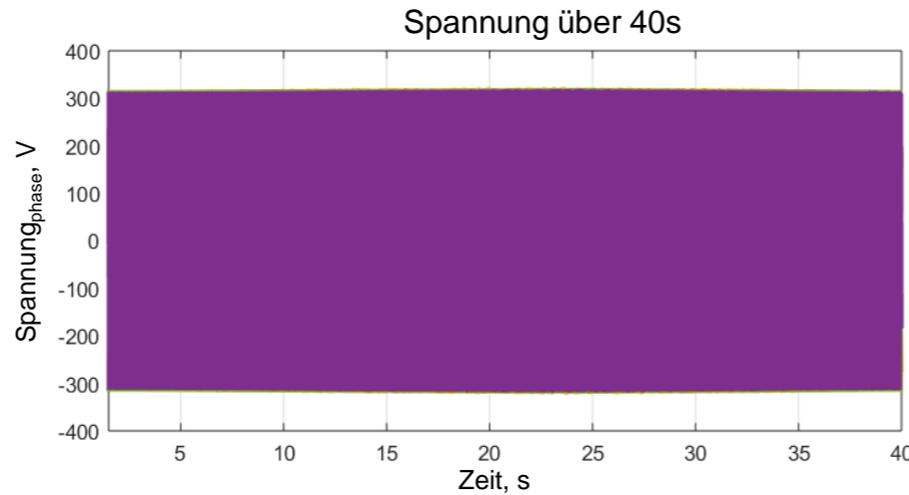


Schematischer Testaufbau



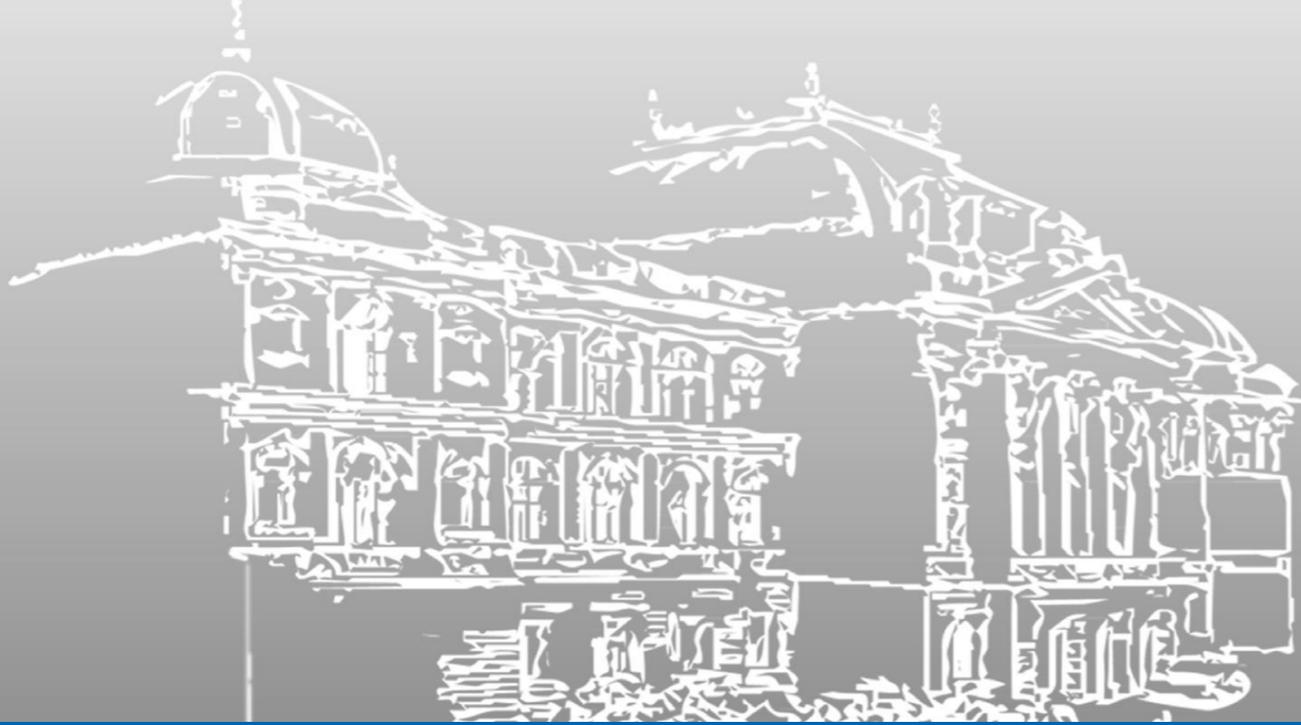
Testaufbau in PHILlab

PHIL – Test: Ergebnisse für Wechselrichter 1



PASS

— U_A
— U_B
— U_C
— I_A
— I_B
— I_C



Schlussfolgerungen und Ausblick

Schlussfolgerungen

- Stationäre Validierung:
 - Berechnung der Spannungsstabilität nach IEC 61000-2-4 bestanden
- Transiente Validierung:
 - Impedanzbasierter Ansatz ist mit genauen Ergebnissen schnell implementierbar
 - „Frequency Sweep“ bestanden
 - PHIL – Test bestanden

Ausblick

- Detaillierte Sensitivitätsanalyse des Wechselrichters
- Untersuchung der Auswirkungen eines asymmetrischen Netzes
 - Aufteilung in Mit-, Gegen- und Nullsystem
 - Fehlerverhalten
 - Schutzmaßnahmen

Untersuchung und Validierung der Stabilität der Photovoltaik- Integration in ein industrielles MS- Netz auf Grundlage von PHIL-Tests

Dipl.-Ing. Carina Lehmal*

Dipl.-Ing. Dr.techn. Ziqian Zhang

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert