



Technische
Universität
Braunschweig

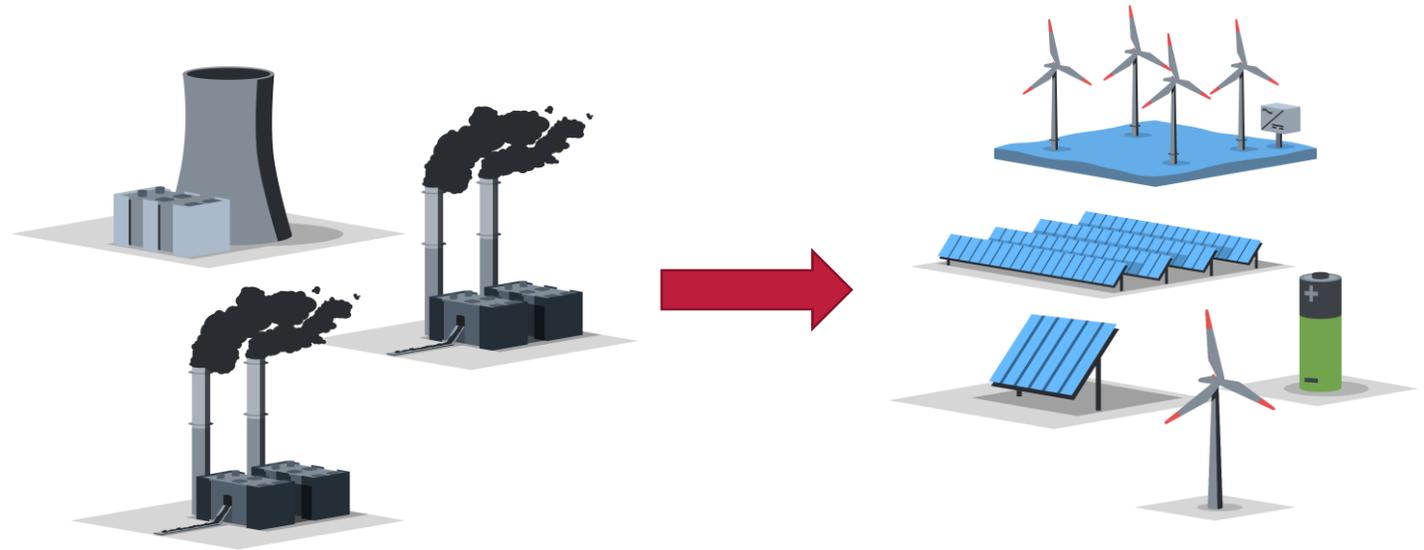
elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme

Vergleich verschiedener Wechselrichterregelungen in Netzfehlersituationen im Netzdynamiklabor

Timo Sauer, M.Sc. | 17. Symposium Energieinnovation 2022 in Graz | 16.02.2022

Agenda

1. Motivation und Problemstellung
2. Laboraufbau und Eignung der Geräte für die Umsetzung standardisierter Prüfverfahren
3. Vergleich der Wirk- und Blindströme in Netzfehlersituationen
4. Zusammenfassung und Ausblick

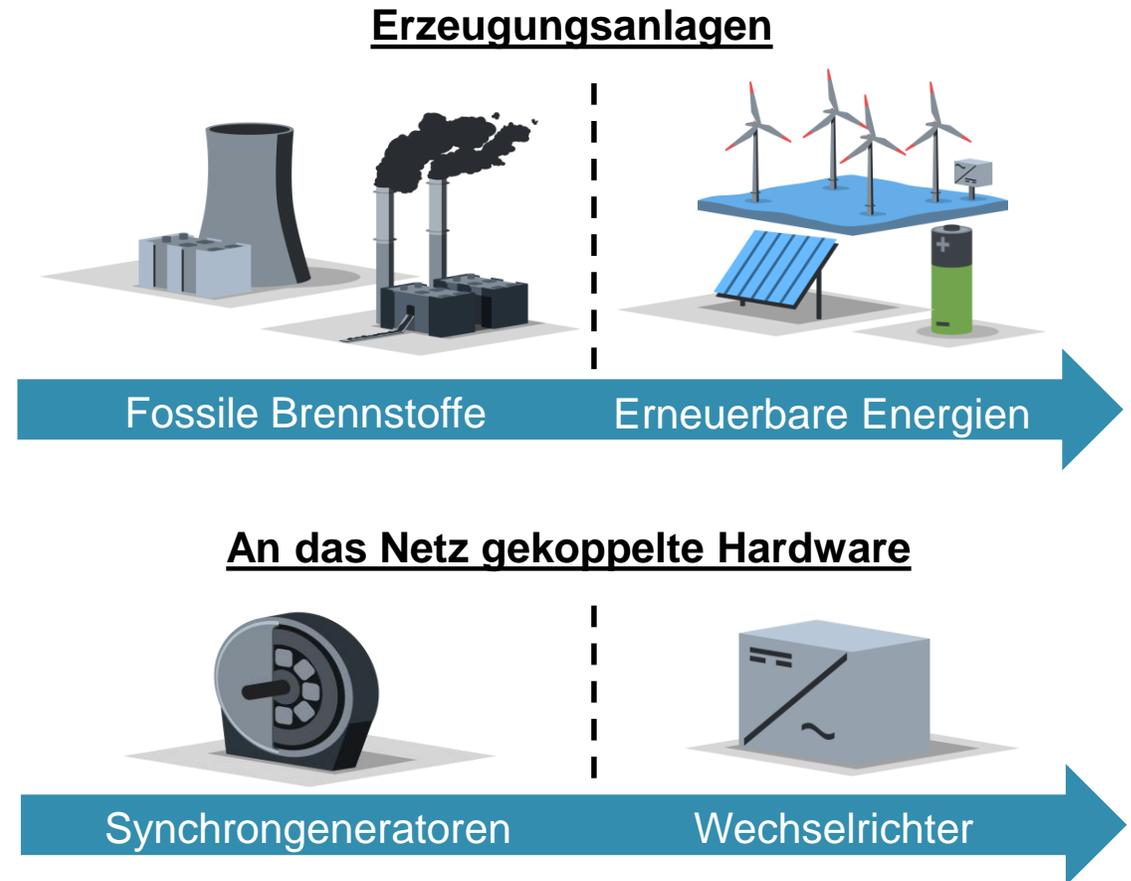


Wandel der Energieerzeugungstechnologien

Motivation - Transformation der Energieerzeugungstechnologien

Wechselrichter müssen zukünftig zur Netzregelung beitragen

- Die Netzregelung erfolgt historisch bedingt mittels Synchrongeneratoren
- Durch die Abschaltung von fossilen Kraftwerken steigt der Anteil von Erneuerbaren Energien am Strommix
- Dadurch vollzieht sich ein Transformationsprozess hinsichtlich der Energieerzeugungstechnologien
- Erneuerbare Energien müssen daher auch zur Netzregelung beitragen
- Erneuerbare Energien sind zum Großteil über Wechselrichter an das Netz angeschlossen
- Wechselrichter besitzen ein anderes elektrisches Verhalten als Synchronmaschinen

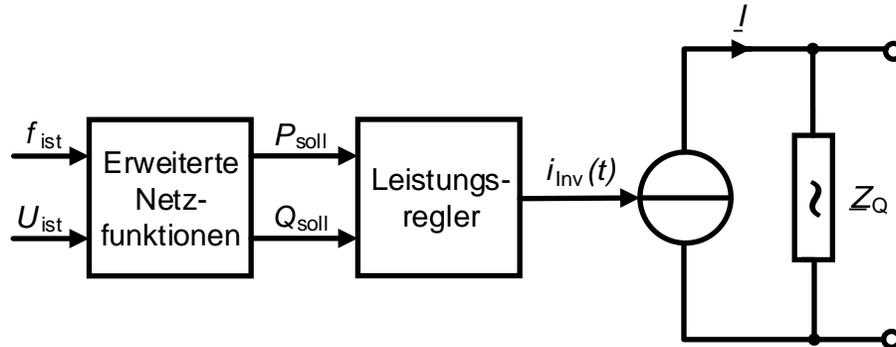


Vergleich unterschiedlicher Wechselrichterregelungen

Notwendigkeit einer zusätzlichen netzbildenden Wechselrichterregelung, um Momentanreserve bereitzustellen

Netzstützende Wechselrichter (GSI)

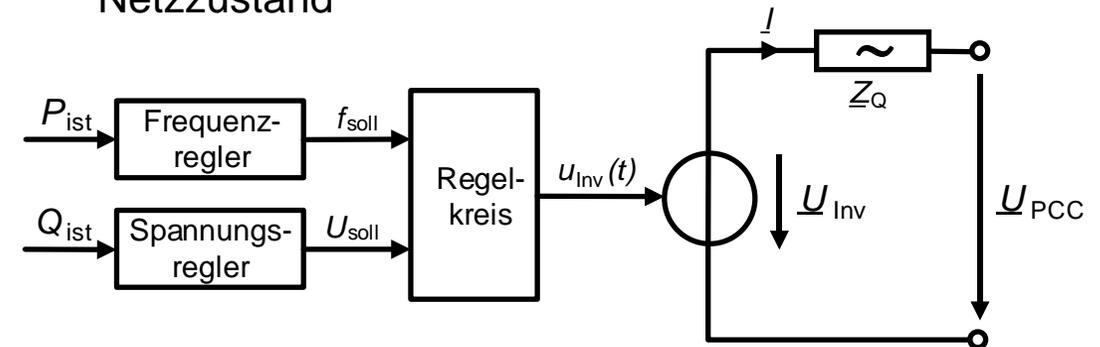
- Regelung ist darauf ausgelegt, effizient die maximale Leistung einzuspeisen (Regelung des Stroms)
- Wechselrichter weist Stromquellenverhalten auf
- Ausschließlich für den Netzparallelbetrieb geeignet
- In Netzfehlersituationen:
 - Aktivierung des Fault-Ride-Through (FRT) Funktion
 - Regelung des Blindstroms



[Pattabiraman, D et. al., 2018]

Netzbildende Wechselrichter (GFI)

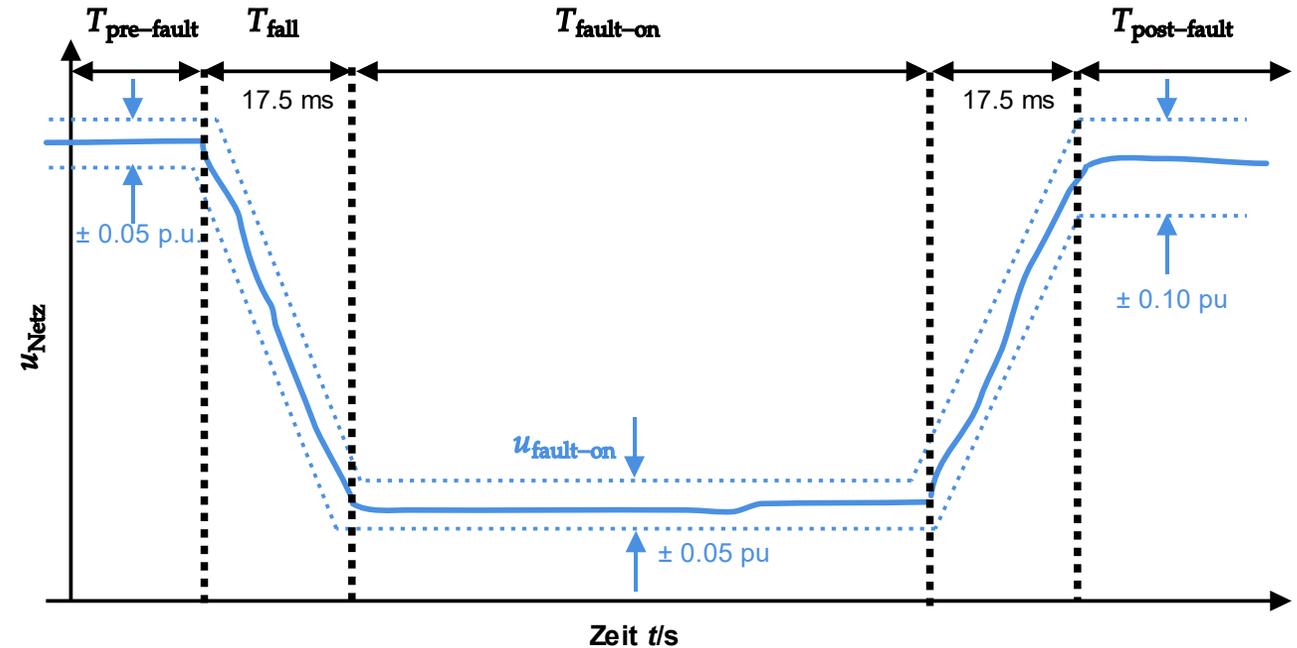
- Spannung mit definierter Amplitude und Phasenlage wird gestellt (Regelung der Spannung)
- Wechselrichter weist Spannungsquellenverhalten auf
- Für Netzparallel- und Inselnetzbetrieb geeignet
- In Netzfehlersituationen:
 - Bisher keine normativen Anforderungen
 - Instantane Anpassung der Ströme an neuen Netzzustand



Normative Prüfanforderungen in Netzfehlersituationen

Zur Prüfung des Anlagenverhaltens wird ein dezidiertes Spannungseinbruch am Netzanschlusspunkt vorgegeben

- Zur Wahrung der Versorgungskontinuität müssen auch Netzfehler durchfahren werden
- Für den netzkonformen Betrieb in allen Netzsituationen ist ein Zertifizierungsprozess notwendig
- Prüfvorschriften für das Verhalten in Netzfehlersituationen sind in der FGW TR3 niedergeschrieben
- Prüfung des Anlagenverhaltens bei Vorgabe eines dezidierten Spannungseinbruch am Netzanschlusspunkt

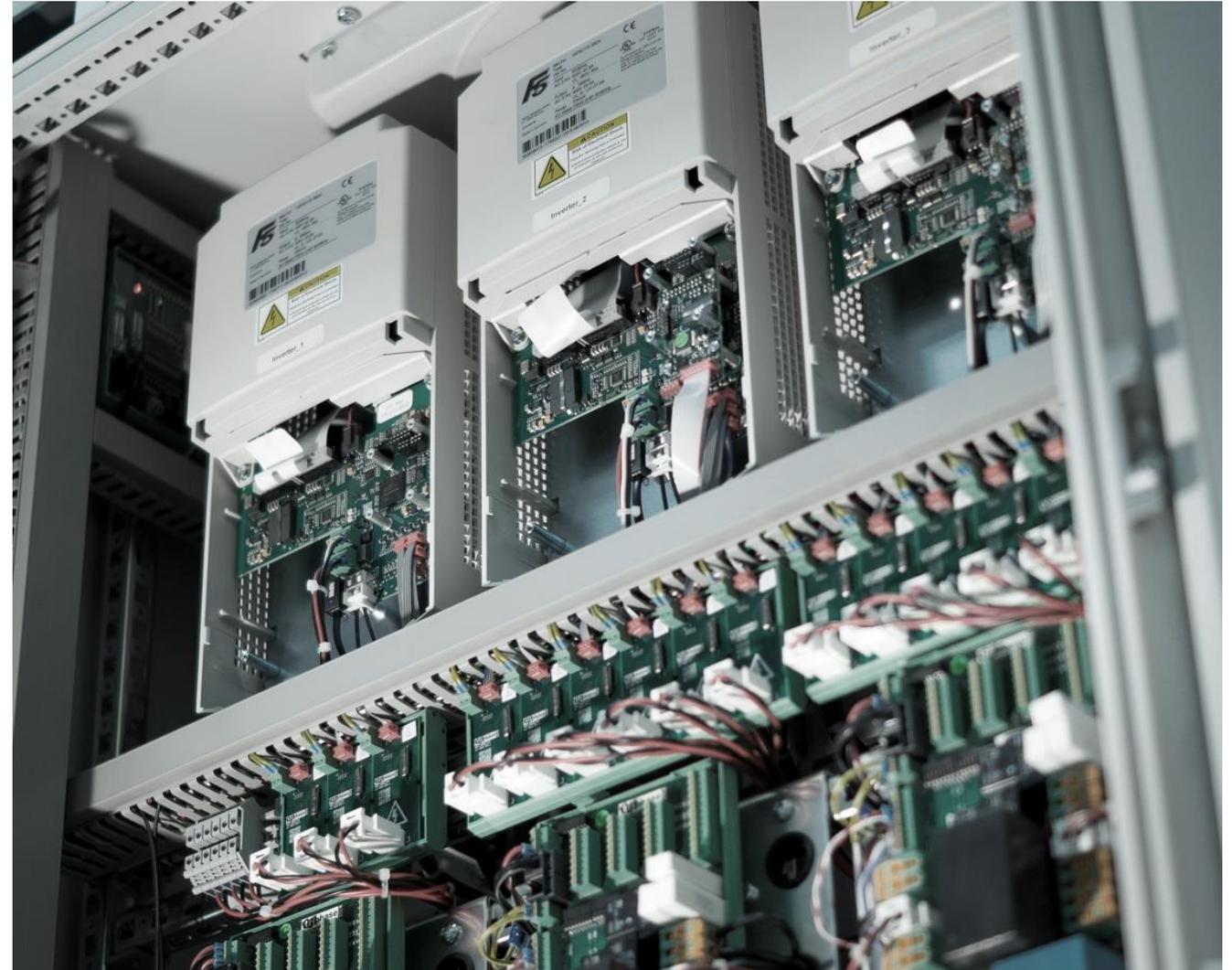


Vorgabe für Spannungseinbruchstests nach FGW TR3

Technische Richtlinien für Erzeugungseinheiten und -anlagen, Teil 3", FGW e.V. Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien, 2018

Agenda

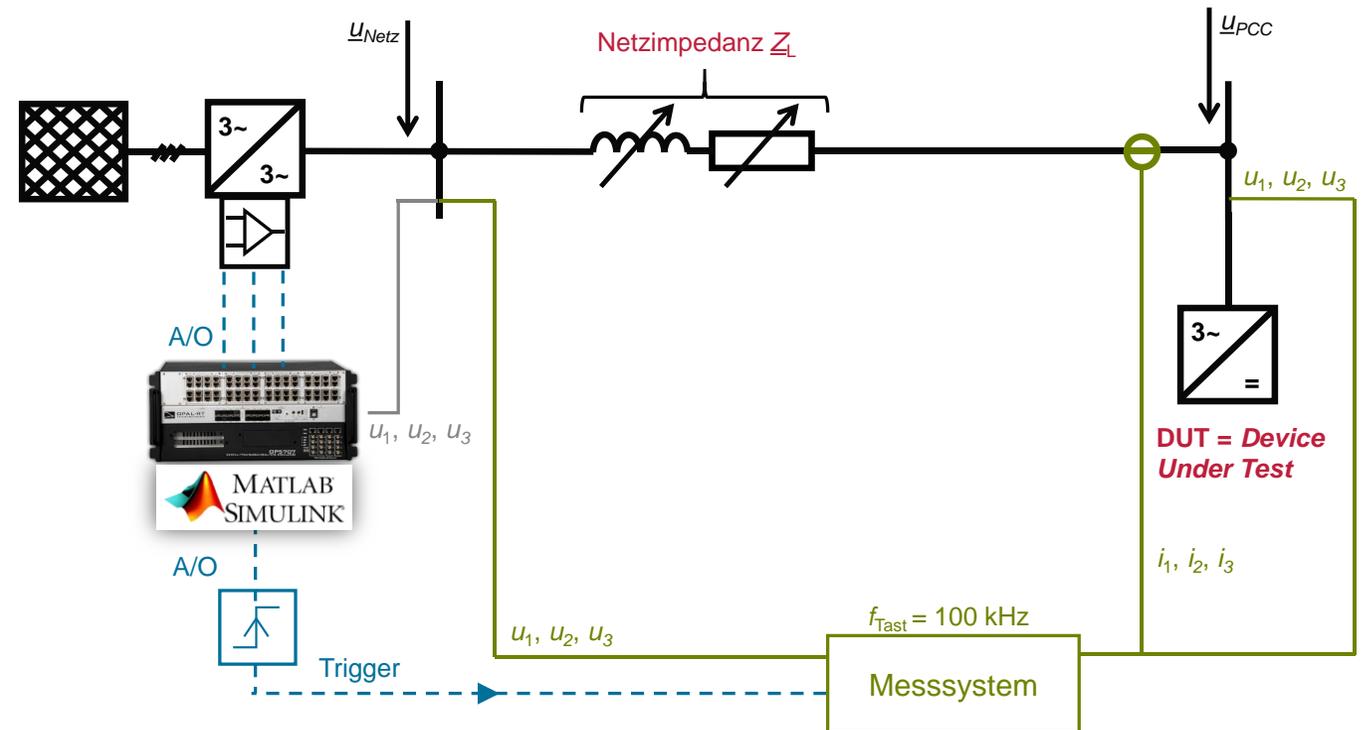
1. Motivation und Problemstellung
- 2. Laboraufbau und Eignung der Geräte für die Umsetzung standardisierter Prüfverfahren**
3. Vergleich der Wirk- und Blindströme in Netzfehlersituationen
4. Zusammenfassung und Ausblick



Laboraufbau zur Umsetzung standardisierter Prüfverfahren

Netzsimulator mit Echtzeitrechner für die Untersuchung von Netzfehlersituationen

- Generierung des Fehlerspannungskorridors nach FGW TR3 mittels Netzsimulator
- Der Netzsimulator ist mit einem Echtzeitrechner über eine analoge Schnittstelle gekoppelt
 - Steuerung des Netzsimulatorausgangs
 - Erweiterung zum Power Hardware-in-the-Loop System durch Rückführung von u_{123}
- Kopplung des Netzsimulators und der zu testenden Anlage (Device Under Test, DUT) über eine Leitungsnachbildung
 - hier $X/R = 3$
- Messsystem mit Datenleitung für die Triggerung der Ereignisse



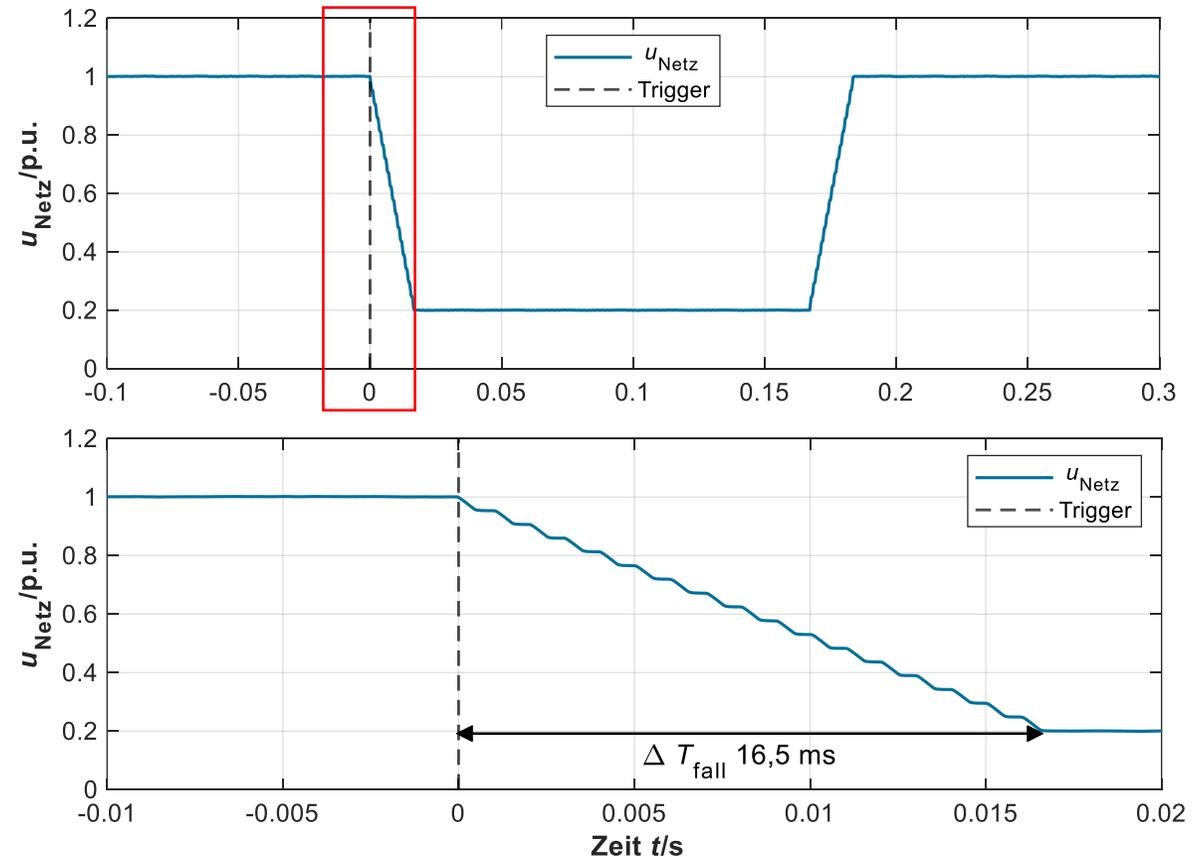
Prinzipschaltbild der Prüfanordnung im Netzdynamiklabor

Eignung der Laborgeräte – Arbiträrgenerator des Netzsimulators

Die Verwendung des internen Arbiträrgenerators des Netzsimulators genügt nicht den Prüfanforderungen

- Spannungseinbruch auf 0,2 p.u. für 150 ms nach FGW TR3 Prüfvorschrift
- Arbiträrgenerator des Netzsimulators stellt den Gradienten beim Fehlereintritt stufig anstatt linear
- ΔT_{fall} von 16,5 ms anstatt der vorgeschriebenen 17,5 ms
- Zudem variierte ΔT_{fall} bei Wiederholungen in einem signifikanten Bereich

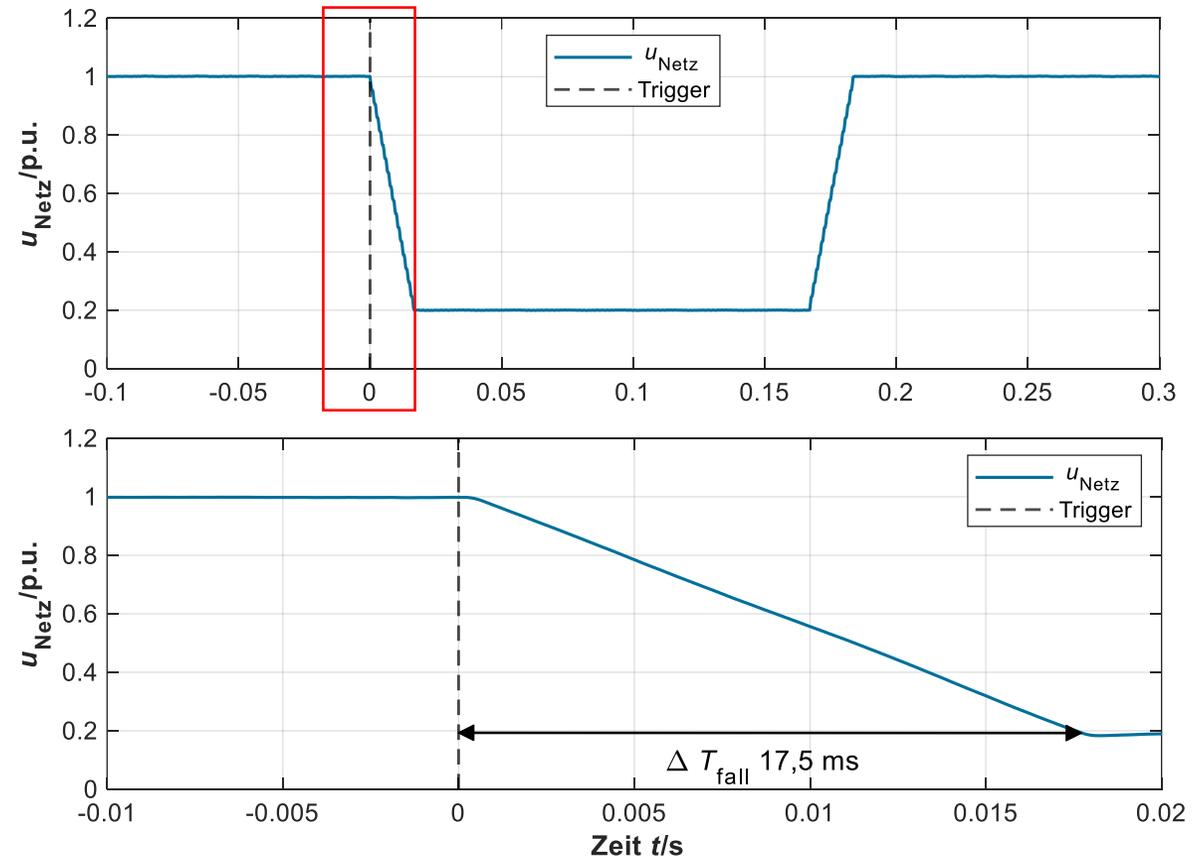
Fazit: Arbiträrgenerator weist kein dezidiertes und reproduzierbares Klemmverhalten auf



Eignung der Laborgeräte – Echtzeitrechner und Netzsimulator

Die Steuerung des Netzsimulators mit einem Echtzeitrechner erfüllt die Prüfanforderungen

- Spannungseinbruch auf 0,2 p.u. für 150 ms nach FGW TR3 Prüfvorschrift
- Durch die Kopplung des Netzsimulators mit einem Echtzeitrechner wird der Gradient beim Fehlereintritt linear gestellt
- ΔT_{fall} beträgt reproduzierbar die vorgeschriebenen 17,5 ms

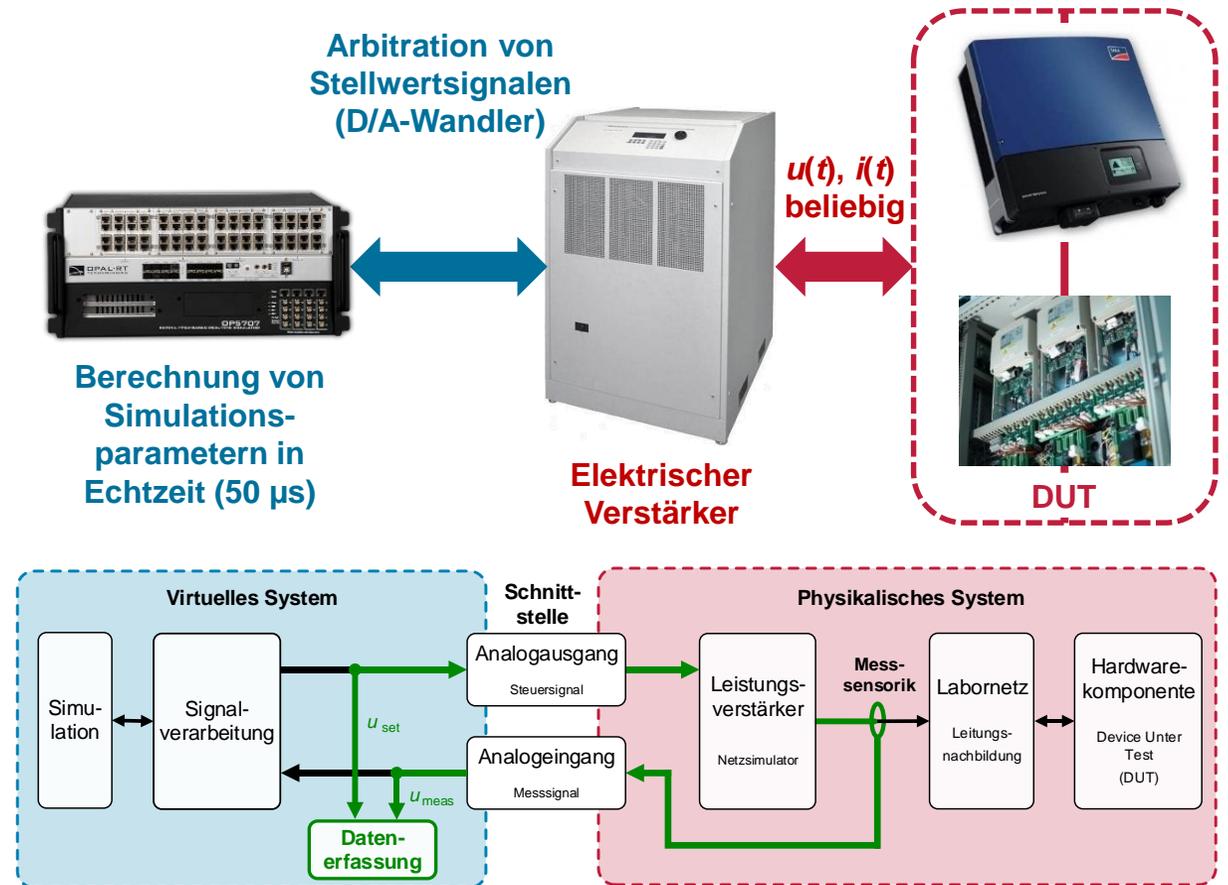


Fazit: Echtzeitrechner und Leistungsverstärker für Netzfehleruntersuchungen ist zu empfehlen

Erweiterung des Laboraufbaus

Die Erweiterung zum Power Hardware-in-the-Loop System ermöglicht weitergehende Netzstabilitätsanalysen

- Erweiterung zum Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) System durch Rückkopplung der Messsignale u_{Netz} und i_{Netz} in den Echtzeitrechner
- PHIL kombiniert virtuelles mit physikalischem System über eine analoge Schnittstelle
- Weitergehende Untersuchungsmöglichkeiten:
 - Test des DUT in komplexeren Stromnetzen
 - Test des DUT unter artifiziiell berechneter Netzereignisse

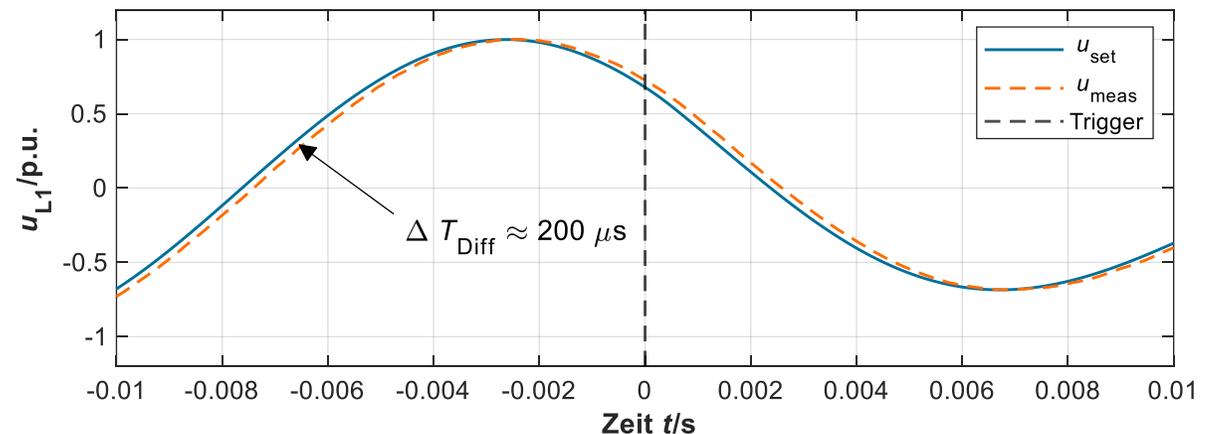
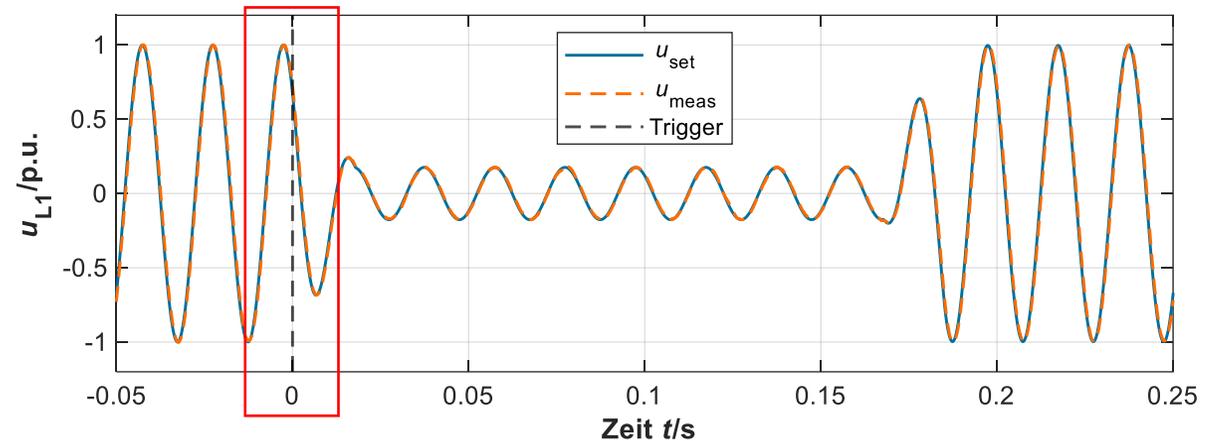


Frage: Ist das PHIL System für dynamische Netzstabilitätsuntersuchungen geeignet?

Eignung des PHIL für dynamische Netzstabilitätsuntersuchungen

Die Latenzzeit zwischen gestellter und gemessener Spannung beträgt ungefähr 200 μs

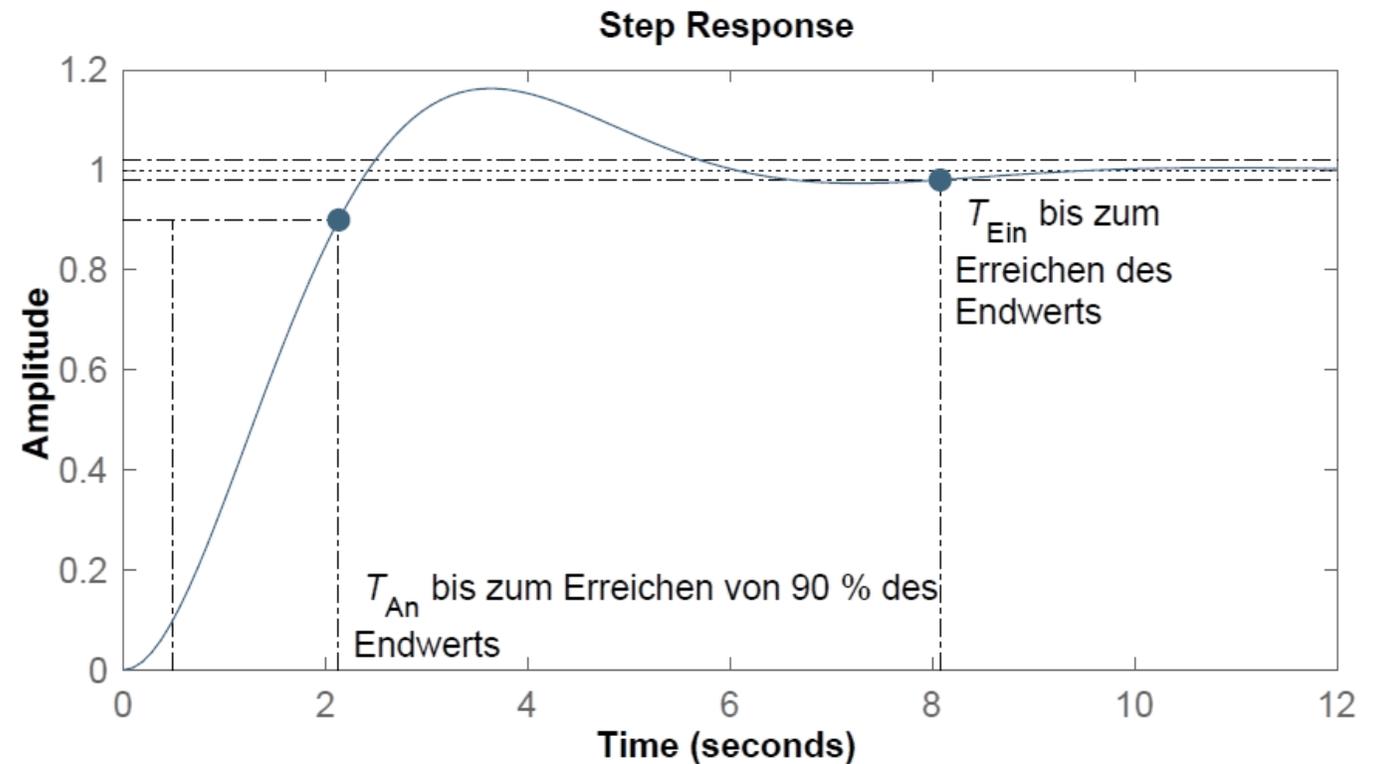
- Spannungseinbruch auf 0,2 p.u. für 150 ms nach FGW TR3 Prüfvorschrift
- Auswertung der Latenzzeit ΔT_{Diff} zwischen gestellter und gemessener Spannung anhand einer Spannungsphase u_{L1}
- Die Latenzzeit ΔT_{Diff} beträgt sowohl vor, während und auch nach dem Spannungseinbruch ungefähr 200 μs
- Latenzzeit ΔT_{Diff} ist kleiner als der Zeitbereich von Netzfehlern



Fazit: Untersuchungen mit dem PHIL System im Millisekundenbereich sind repräsentativ

Agenda

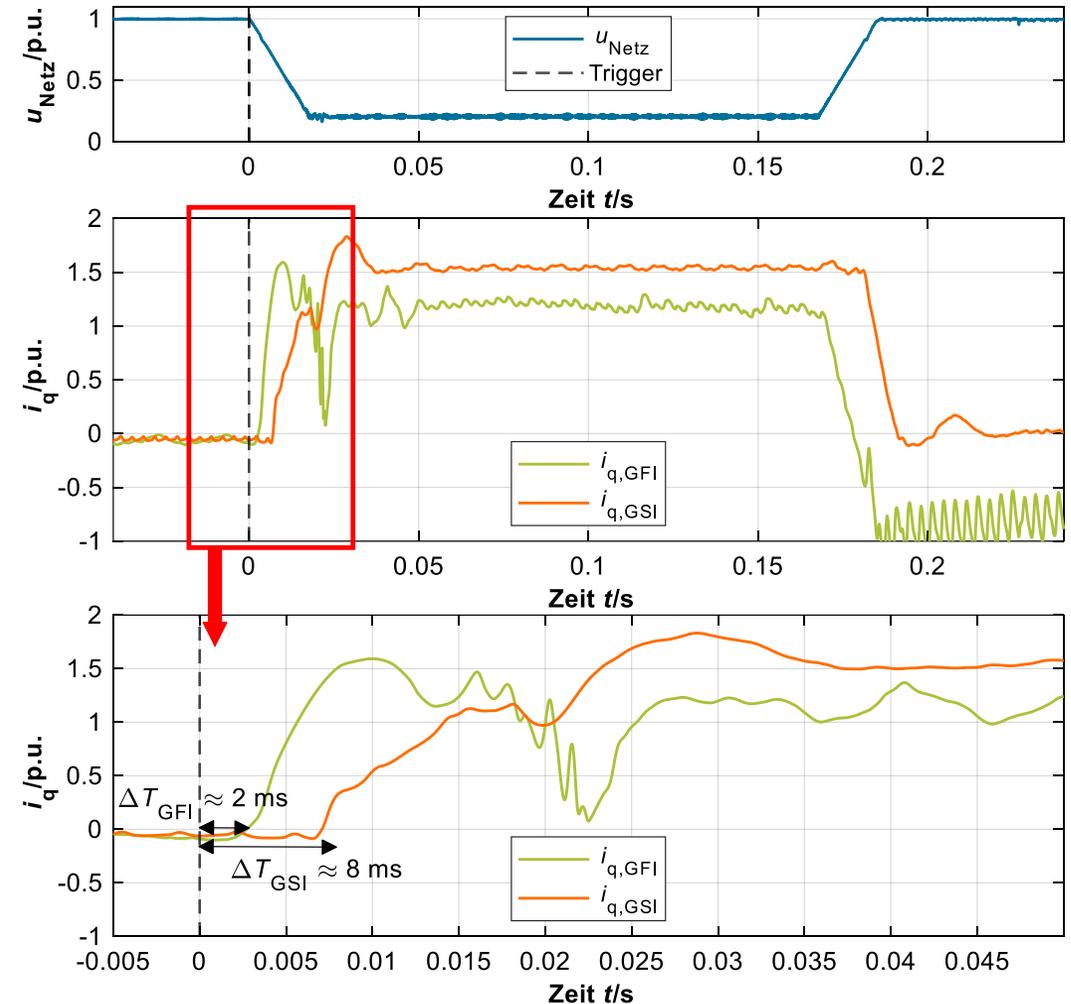
1. Motivation und Problemstellung
2. Laboraufbau und Eignung der Geräte für die Umsetzung standardisierter Prüfverfahren
- 3. Vergleich der Wirk- und Blindströme in Netzfehlersituationen**
4. Zusammenfassung und Ausblick



Vergleich des Anschwingverhaltens der Blindströme bei Fehlereintritt

- Spannungseinbruch auf 0,2 p.u. für 150 ms nach FGW TR3 Prüfvorschrift
- Wirkleistung vor dem Fehler bei 1,0 p.u.
- Annahme, dass Ausgangsströme im Fehlerfall 1,5 p.u. betragen können
- Sowohl GSI als auch GFI reagiert auf den Spannungseinbruch mit dem Einspeisen von i_q
- Verzögerte Reaktion bis zur Blindstromeinspeisung beim GSI (8 ms) aufgrund der notwendigen Fehlerdetektion und Umschaltung zur FRT-Funktion
- Instantane Blindstromeinspeisung beim GFI (2 ms) aufgrund des inhärenten Spannungsquellenverhalten

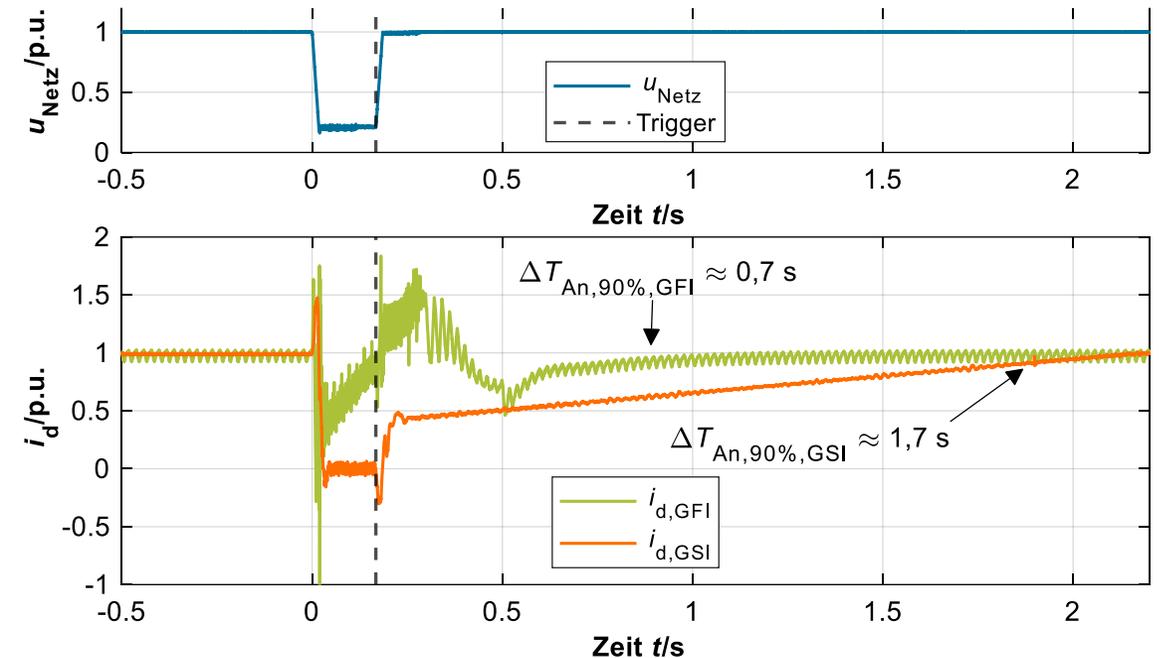
Fazit: Unterschiedliche schnelle Blindstromeinspeisung aufgrund verschiedener Regelungscharakteristiken



Gegenüberstellung der Wirkstromwiederkehr nach der Fehlerklärung

Die Regelungskonzepte zur Wirkstromwiederkehr unterscheiden sich voneinander

- Spannungseinbruch auf 0,2 p.u. für 150 ms nach FGW TR3 Prüfvorschrift
- Wirkleistung vor dem Fehler bei 1,0 p.u.
- Blindleistung vor dem Fehler bei 0 p.u.
- Der GSI reduziert den Wirkstrom zugunsten der Blindstromeinspeisung
- Der GSI regelt nach der Fehlerklärung nur langsam auf den Vorfehlerwirkstromwert ($\Delta T_{AN,90\%,GSI} = 1,7 \text{ s}$)
- Beim GFI werden i_d und i_q nicht aktiv geregelt
- Wirkstromwiederkehr ist abhängig von der Strombegrenzung des GFI ($\Delta T_{AN,90\%,GFI} = 0,7 \text{ s}$)



Fazit: Unterschiedliches Verhalten bei der Wirkstromwiederkehr aufgrund verschiedener Regelungscharakteristiken

Agenda

1. Motivation und Problemstellung
2. Laboraufbau und Eignung der Geräte für die Umsetzung standardisierter Prüfverfahren
3. Vergleich der Wirk- und Blindströme in Netzfehlersituationen
4. Zusammenfassung und Ausblick

- Für die zukünftigen Bereitstellung von Momentanreserve werden netzbildende Wechselrichter benötigt, die sich in ihrer Regelungscharakteristik von konventionellen netzstützenden Wechselrichter unterscheiden
- Zur Wahrung der Versorgungsqualität müssen beide Wechselrichtertypen Netzfehler durchfahren
- Zur Prüfung des Verhaltens unter normativer Prüfvorschriften ist ein genauer Fehlerkorridor vorgegeben
- Ein Netzsimulator mit Echtzeitrechner ist geeignet um reproduzierbare Tests durchzuführen
- Die Erweiterung des Laboraufbaus zu einem Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) System ermöglicht das Testen der Komponente in komplexeren Stromnetzen
- Die Wechselrichter weisen unterschiedliches Netzfehlerverhalten aufgrund verschiedener Regelungscharakteristiken auf
 - **GFI:** Instantane Blindstromeinspeisung (2 ms) aufgrund des inhärenten Spannungsquellenverhalten, Wirkstromwiederkehr ist abhängig von der Strombegrenzungsfunktion
 - **GSI:** verzögerte Reaktionszeit (8 ms) aufgrund der nötigen Fehlerdetektion und Umschaltung zur FRT-Funktion, gewollte langsame Wirkstromwiederkehr (1,7 s)

Kontakt und Danksagung



TIMO SAUER, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Team Netzdynamik und
Systemstabilität

t.sauer@tu-braunschweig.de



**elenia Institut für Hochspannungstechnik u.
Energiesysteme**

Technische Universität Braunschweig

Schleinitzstraße 23
38106 Braunschweig
Germany



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Danksagung

Die vorliegenden Erkenntnisse wurden im Rahmen des BMWK-geförderten Verbundvorhabens „Netzregelung 2.0“ (Förderkennzeichen 0350023B) ermittelt. Die Autoren danken dem BMWK für die finanzielle Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor und spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Projektkonsortiums Netzregelung 2.0 wieder.