



# Einfluss netzbildender Wechselrichterregelung auf die Frequenzhaltung nach einer Netzauftrennung

Name: Martin Knechtges, Markus Geulen, Maik Schönefeld, Albert Moser

---

Einleitung

Analyse und Modellierung

Verfahrensansatz

Exemplarische Untersuchungen

Zusammenfassung und Ausblick

---

▶ Einleitung

Analyse und Modellierung

Verfahrensansatz

Exemplarische Untersuchungen

Zusammenfassung und Ausblick

## Hintergrund und Motivation

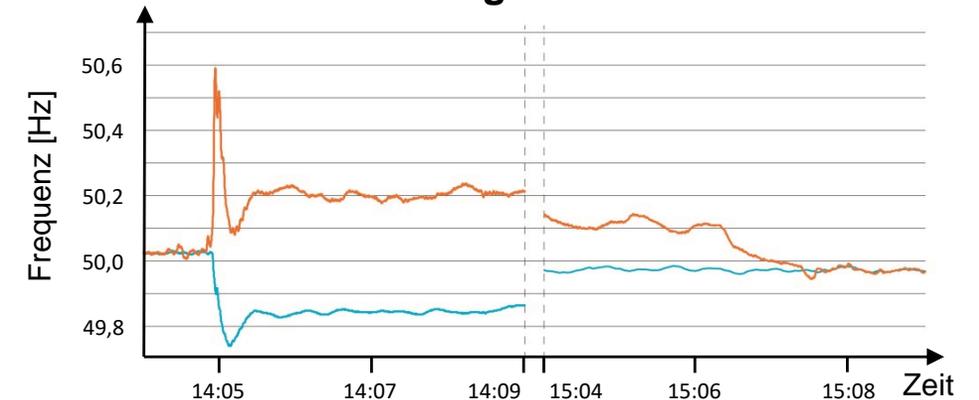
### Strukturwandel im Elektrizitätsversorgungssystem (EVS)

- Zubau von lastferner Erzeugung auf Basis erneuerbarer Energien bei gleichzeitiger Abschaltung von lastnahen konventionellen Kraftwerken
- Stetiger Anstieg der Höherauslastung des Übertragungsnetzes
- Zunehmendes Risiko von kaskadierenden Abschaltungen bedingt durch Anstieg der Transportkapazitäten und Höherauslastung des Netzes

### Netzauftrennungen

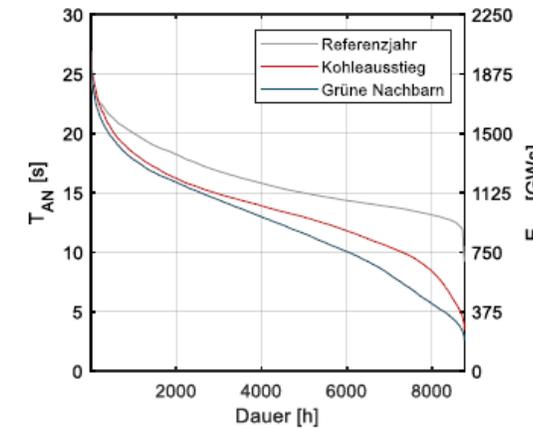
- Netzanlaufzeitkonstante ist ein Maß für die vorhandene Momentanreserve innerhalb des Verbundsystems
- Ausreichend Momentanreserve innerhalb der sich ergebenden Teilnetze zur Limitierung der auftretenden Frequenzgradienten
- Regionale Unterschiede in der vorhandenen Momentanreserve
- Bereitstellung von Momentanreserve und Frequenzstützung und durch leistungselektronisch angebundene Anlagen (LE-Anlagen) zukünftig notwendig

### Frequenzverläufe in Folge der Netzauftrennung am 8. Januar 2021

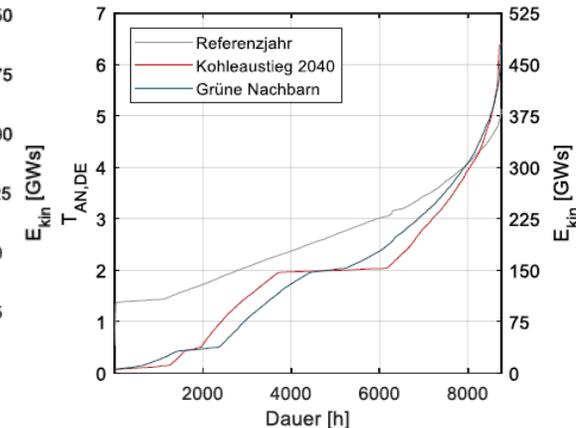


### Prognostizierte Netzanlaufzeitkonstanten\*

#### Verbundsystem



#### Deutschland



---

Einleitung

▶ Analyse und Modellierung

Verfahrensansatz

Exemplarische Untersuchungen

Zusammenfassung und Ausblick

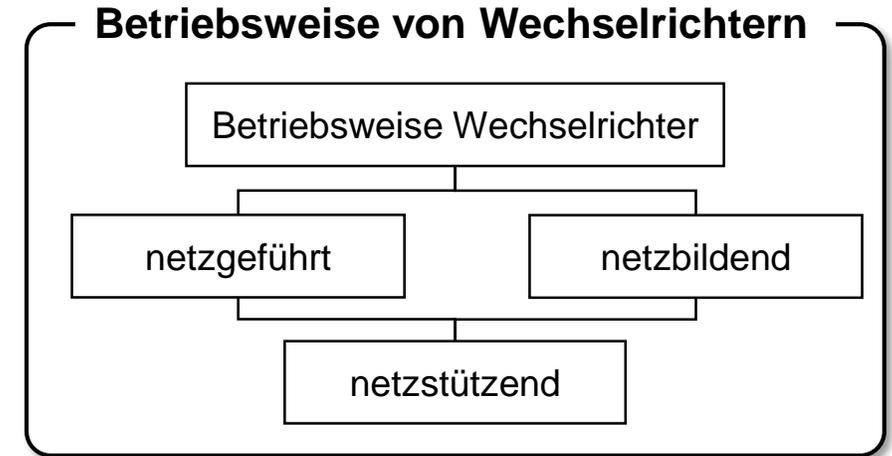
# Analyse und Modellierung

## Betriebsweise von Wechselrichtern

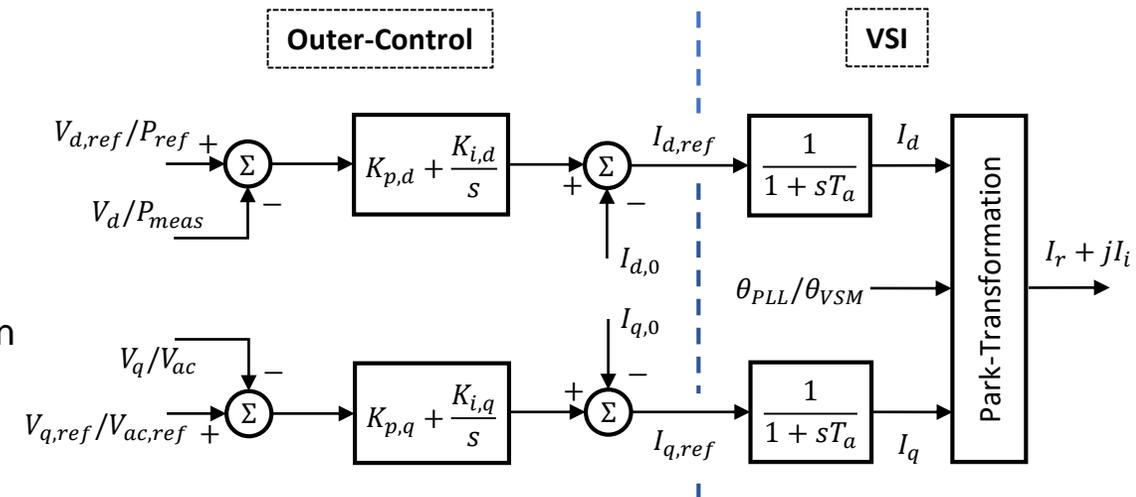
- Unterschiedliche Regelungskonzepte von Wechselrichtern vorhanden
  - Netzgeführte, Netzstützende und Netzbildende Wechselrichterregelung

## Regelung leistungselektronisch angebundener Anlagen

- Kaskadierende Stromregelung ermittelt Spannungsreferenzwerte die in Schaltsignale für die Leistungselektronik überführt werden
- Leistungselektronik folgt mit einer Verzögerung den Stromreferenzwerten
- Modellierung über PT1-Glied mit der Zeitkonstante  $T_a$
- Mithilfe der Outer-Control (PI-Regler) können aus Sollwerten die Referenzströme ermittelt werden
- Regelung erfolgt in dq-Komponenten (Park-Transformation)
  - Netzfolgend: Transformation mithilfe des Winkels am Netzanschlussknoten
  - Netzbildend: Transformation mithilfe des Winkels der eigenen Regelung



## Regelung von LE-Anlagen



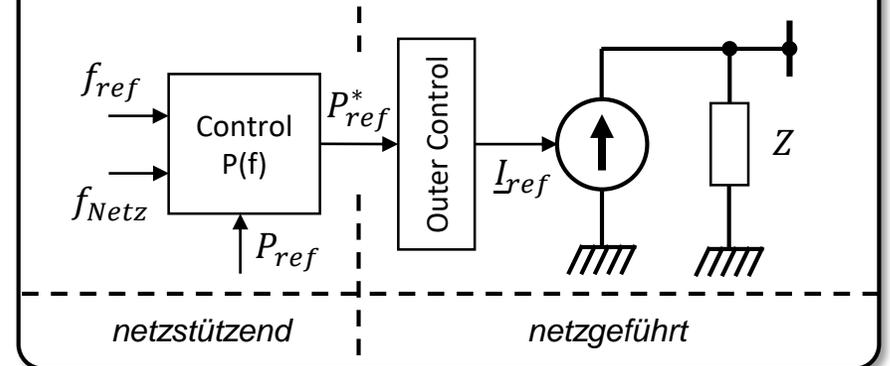
# Analyse und Modellierung

## Betriebsweise von Wechselrichtern

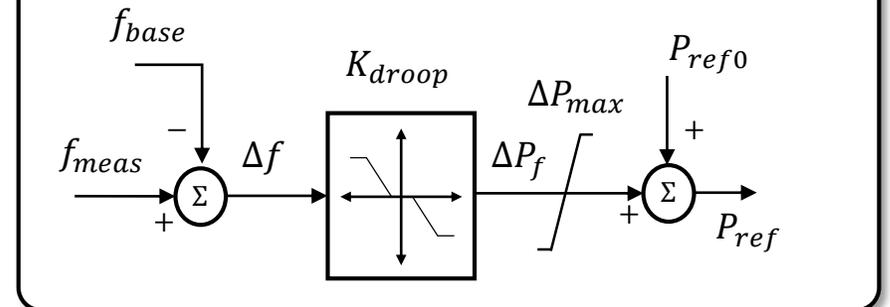
### Netzgeführte Wechselrichterregelung

- Stromquelle, die vorgegebene Leistungsreferenzwerte  $P_{ref}$  in das Netz einspeist
  - Betrieb aktueller EE-Anlagen über netzgeführte Regelung im MPP\*
- Transformation der Regelgrößen und Synchronisierung zur Netzfrequenz mittels einer Phasenregelschleife
  - Parallelbetrieb von mehreren Wechselrichtern möglich
- Frequenzstützung durch geeignete übergeordnete Regelungen möglich
- Totzeiten bei der Messung der Netzfrequenz führen zu Verzögerungen der Referenzwertänderungen im Fehlerfall
- Kein Beitrag zu synthetischer Schwungmasse

### Vereinfachte Darstellung netzgeführter und -stützender Wechselrichter



### Wirkleistungsregelung netzstützender netzfolgender Wechselrichter



# Analyse und Modellierung

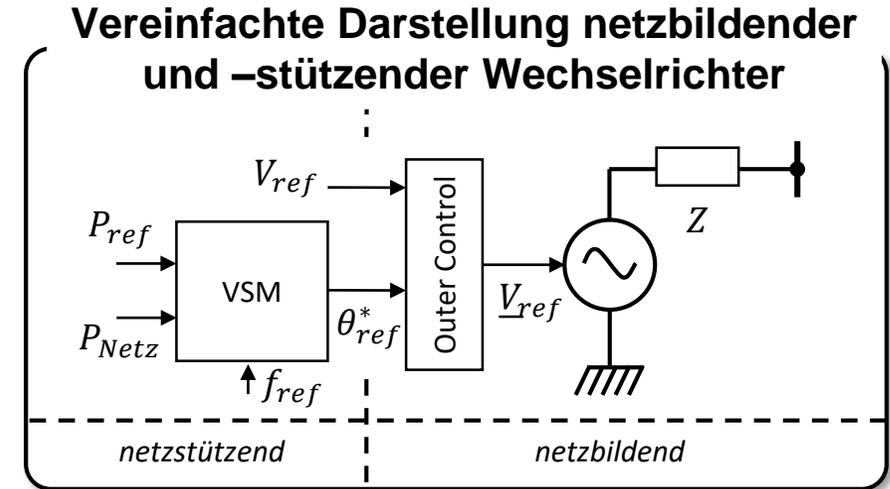
## Betriebsweise von Wechselrichtern

### Netzbildende Wechselrichterregelung

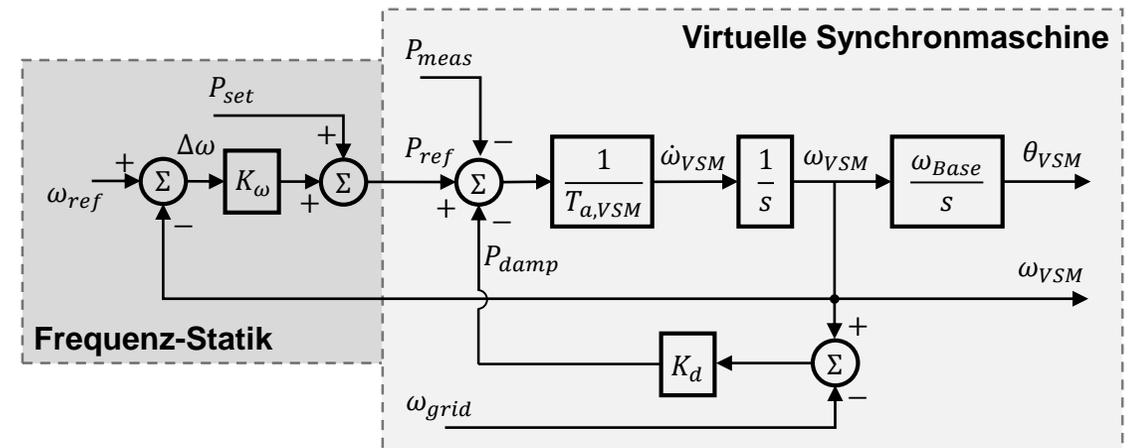
- Verhalten einer geregelten Spannungsquelle
- Eine Vielzahl von netzbildenden Wechselrichterregelungen
  - Droop-Control, Synchronverter, virtuelle Synchronmaschine

### Virtuelle Synchronmaschine

- Modellierung der mechanischen Schwingungsgleichungen eines Synchrongenerators
- Rotierendes Bezugssystem innerhalb der Regelung
  - Leistungsbilanzierung resultiert in einer Änderung der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{VSM}$  des rotierenden Bezugssystems
  - Verwendung des Phasenwinkels  $\theta_{VSM}$  zur dq-Transformation
  - Bereitstellung einer Primärregelleistung durch einfache Frequenz-Statik analog eines Drehzahlreglers



### netzbildende Regelung – Virtuelle Synchronmaschine

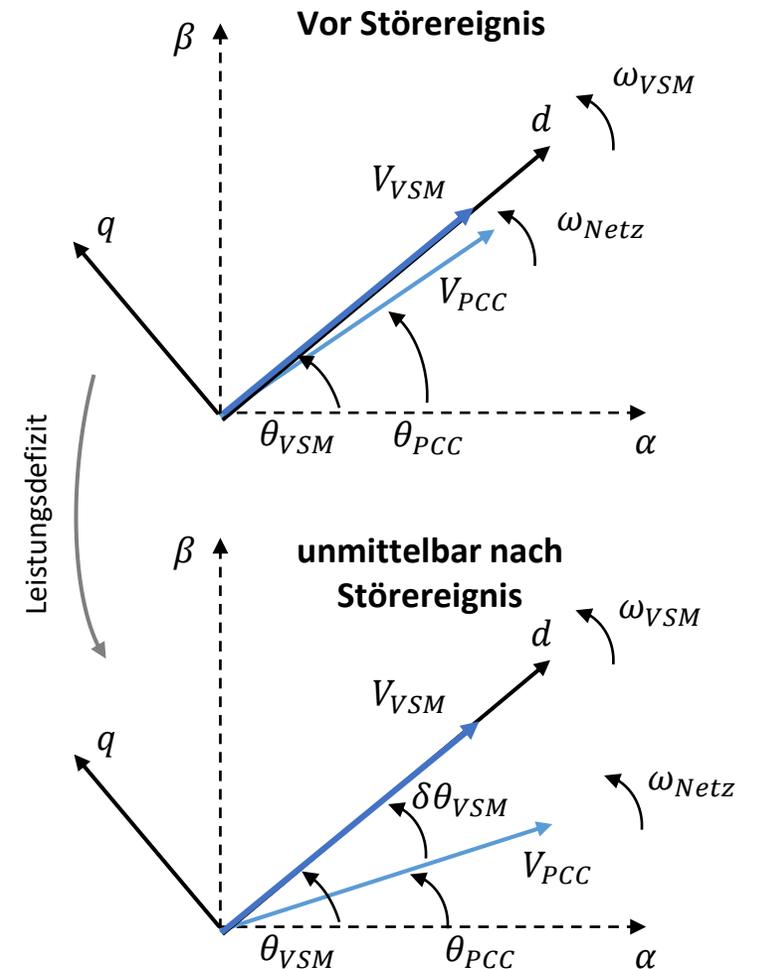
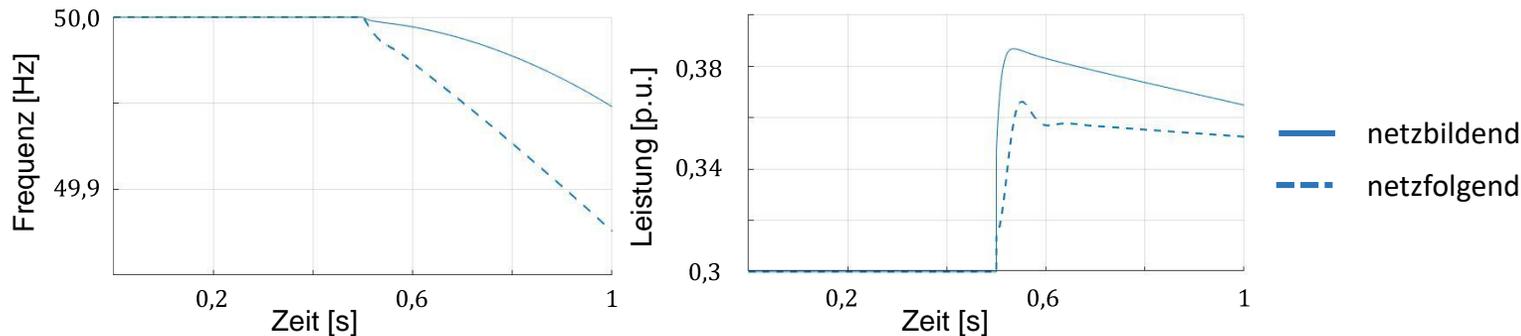


## Betriebsweise von Wechselrichtern

### Funktionsweise der virtuelle Synchronmaschine

- Virtuelles rotierendes Bezugssystem innerhalb der Regelung
- Stationär rotiert das virtuelle Bezugssystem der Regelung mit der gleichen Frequenz wie die Netzspannung am Netzanschlussknoten
- Nach Fehlereintritt rotiert das virtuelle Bezugssystem mit Nennfrequenz, indes variiert der Winkel am Verknüpfungspunkt aufgrund des Störereignisses
- Bereitstellung synthetischer Schwungmasse durch netzbildenden Wechselrichter nach Fehlereintritt im Vergleich zu netzstützender netzfolgender Regelung

### Leistungsinjektion und Frequenzverlauf nach Fehlereintritt



---

Einleitung

Analyse und Modellierung

▶ **Verfahrensansatz**

Exemplarische Untersuchungen

Zusammenfassung und Ausblick

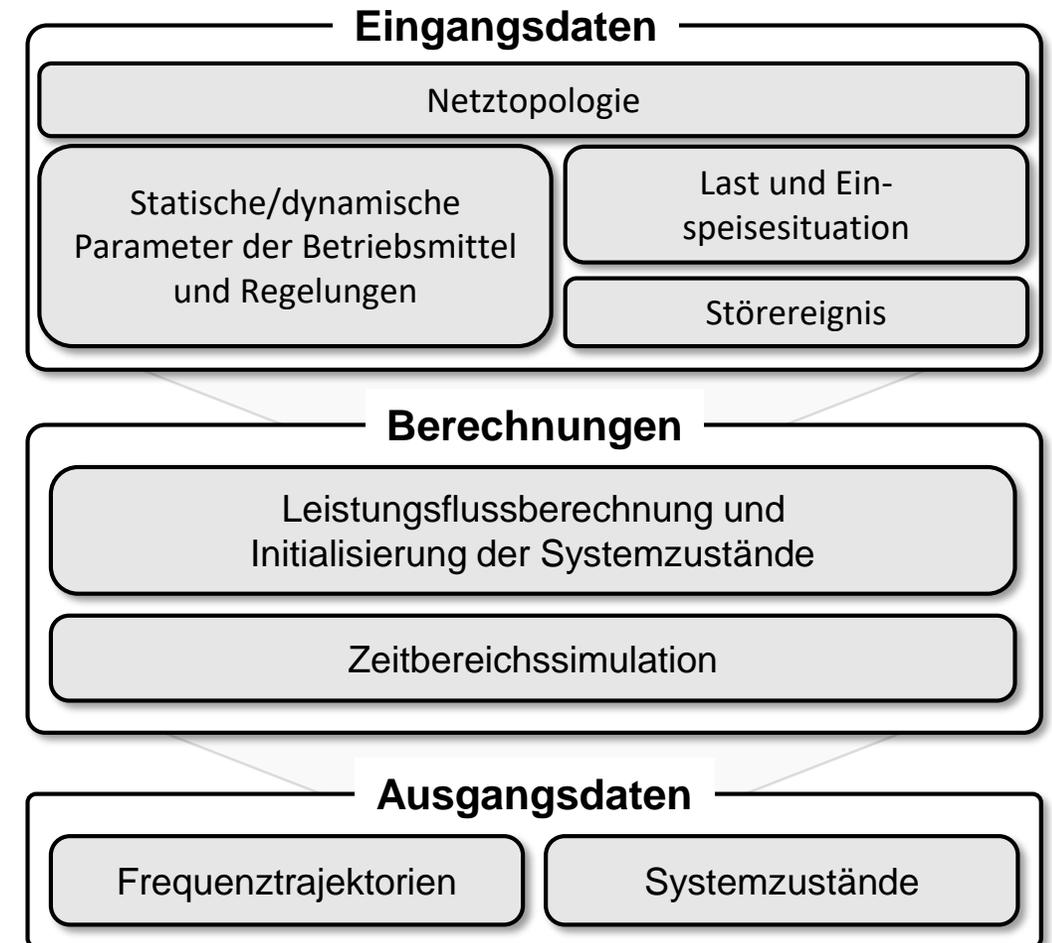
## Übersicht

### Anforderungen an Modell und Verfahren

- Abbildung relevanter Komponenten im EVS mit Einfluss auf Frequenz
- Abbildung von Regelstrategien zur Frequenzstützung
- Modellierung transienter Ausgleichvorgänge und Regelungen

### Zeitbereichssimulation

- Differential-algebraisches Gleichungssystem
  - Abbildung dynamischer Vorgänge durch Differentialgleichungen
  - Abbildung von physikalischen Erhaltungssätzen und Nebenbedingungen der dynamischen Prozesse/Regelungen durch algebraische Gleichungen
- Leistungsflussberechnung zur Bestimmung eines stationären Startzustands und Initialisierung der Systemzustände
- Bestimmung von Frequenztrajektorien und Ableitung von Indikatoren wie statische/dynamische Frequenzabweichung und Frequenzänderungen nach Netzauftrennung



---

Einleitung

Analyse und Modellierung

Verfahrensansatz

▶ **Exemplarische Untersuchungen**

Zusammenfassung und Ausblick

# Exemplarische Untersuchungen

## Exemplarischer Untersuchungsrahmen

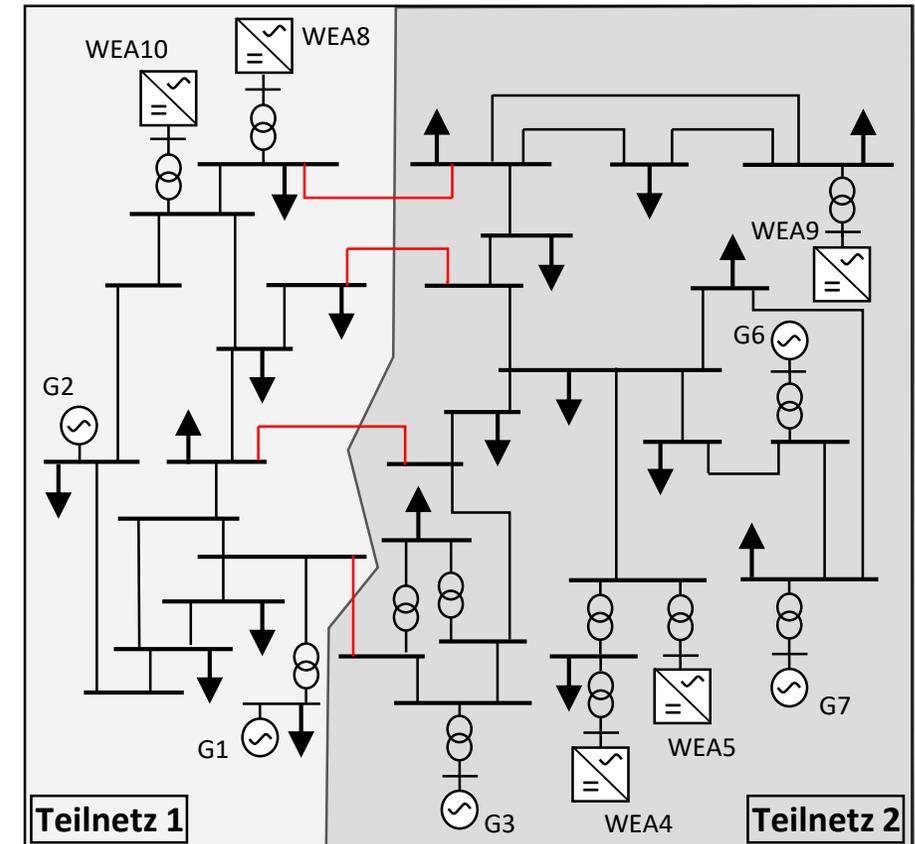
### Netzmodell

- IEEE-39 Knoten Netz mit 10 Erzeugungsanlagen und 19 Lasten
- Konventionelle Kraftwerke als Dampfkraftwerke mit einfachen Dampfturbinenregler dargestellt
- Regelung der LE angebenen Anlagen einerseits mit netzfolgender und andererseits mit netzbildender Wechselrichterregelung
- Abschaltung der rot markierten Leitungen bei  $t = 0,1s$  zur Abbildung einer Netzauftrennung
  - Leistungsdefizit von 31,8 % der eingespeisten Wirkleistung in Teilnetz 1
  - Leistungsüberschuss von 19,5 % der eingespeisten Wirkleistung in Teilnetz 2

### Exemplarische Untersuchungen

- Vergleich der Frequenztrajektorien der Synchrongeneratoren und die eingespeiste Wirkleistung der WEA bei Verwendung der netzfolgenden und netzbildenden Wechselrichterregelung

### Modifiziertes 39-Knoten IEEE Netz

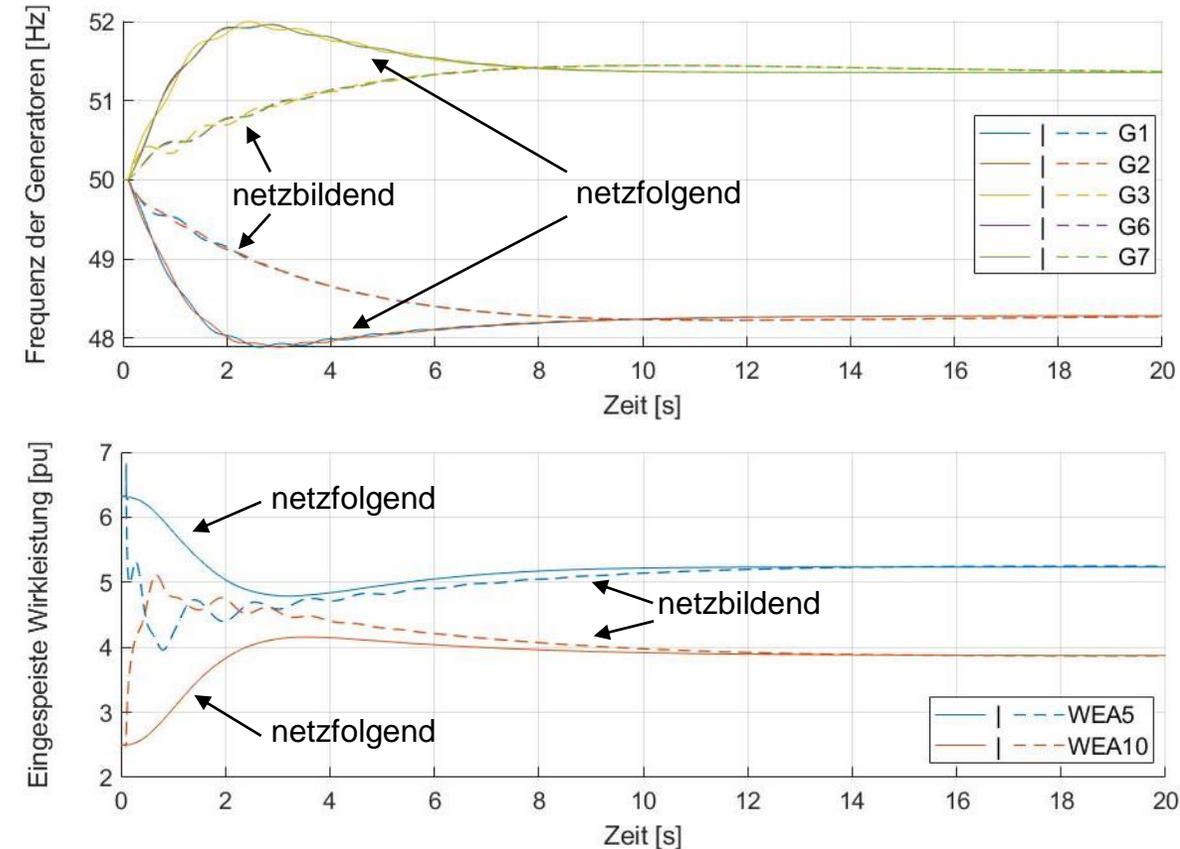


## Exemplarische Untersuchungsergebnisse

### Netzfolgende vs. netzbildende Wechselrichterregelung

- Geringerer Frequenzgradient nach Fehlereintritt bei Berechnung des Netzes mit VSMs im Vergleich zu netzfolgender Regelung
- Nahezu aperiodischer Frequenzverlauf aufgrund der schnellen Regelung und Bereitstellung synthetischer Schwungmasse
  - Keine dynamische Frequenzabweichung
- Zeitliche Verzögerung durch synthetische Schwungmasse, so dass weitere Maßnahmen (Last-Abwurf) durchgeführt werden können
- Verletzung der Grenzwerte von 51,5 Hz in Teilnetz 2 bei Verwendung der netzfolgenden Wechselrichterregelung
- Abschaltung von systemstützenden Erzeugungseinheiten
- Systemstützender Einfluss einer netzbildenden Wechselrichterregelung auf die Frequenzhaltung nach einer Netzauftrennung

### Frequenztrajektorien der Synchrongeneratoren und Wirkleistungseinspeisung der WEA



---

Einleitung

Analyse und Modellierung

Verfahrensansatz

Exemplarische Untersuchungen

▶ Zusammenfassung und Ausblick

# Zusammenfassung und Ausblick

---

## Hintergrund und Motivation

- Stetiger Anstieg der Höherauslastung des Übertragungsnetzes durch Zubau lastferner EE-Erzeugung bei gleichzeitiger Abschaltung lastnaher konventioneller Kraftwerke
- Zunehmendes Risiko von kaskadierenden Abschaltungen bedingt durch Höherauslastung des Netzes
- Regionale Vorhaltung von Momentanreserve zur Beherrschung der Netzauftrennungen notwendig

## Analyse und Modellierung

- Frequenzstützung durch netzfolgende und netzbildende Wechselrichterregelung möglich
- Bereitstellung von synthetischer Schwungmasse lediglich durch netzbildende Wechselrichterregelung (bspw. VSM)

## Exemplarische Untersuchungen

- Bereitstellung von synthetischer Schwungmasse hat Einfluss auf den Frequenzgradienten nach der Netzauftrennung
- Verzögertes Erreichen von systemkritischen Grenzwerten, so dass weitere Maßnahmen durchgeführt werden können und das Teilnetz stabilisieren

## Ausblick

- Energiereservebeschränkungen innerhalb der LE-Anlagen und Stromlimitierung der Wechselrichter zu berücksichtigen

**Vielen Dank  
für Ihre Aufmerksamkeit**



**M.Sc. Martin Knechtges**

RWTH Aachen University

Institut für Elektrische Anlagen & Netze,  
Digitalisierung und Energiewirtschaft

Übertragungsnetze und Energiewirtschaft

Tel. +49 (0) 241 / 80 97884

[m.knechtges@iaew.rwth-aachen.de](mailto:m.knechtges@iaew.rwth-aachen.de)