

# Moderne Regelungskonzepte für zukünftige Energiesysteme: Anforderungen und aktuelle Forschungstrends

Horst Schulte, Jens Fortmann, Norbert Klaes, Jochen Twele

2. Research-School-Konferenz, 8.01.2019, HTW Berlin

University of Applied Sciences Berlin (HTW), Faculty 1: School of Engineering,  
12459 Berlin, Germany, [schulte@htw-berlin.de](mailto:schulte@htw-berlin.de)

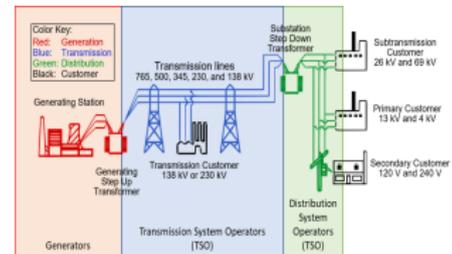
# Inhalt

- 1 Einführung
- 2 Charakterisierung zukünftiger elek. Energiesysteme
- 3 Forschung zur Transformation und Betrieb von EE
- 4 Forschung im Projekt Windkraftwerk

# Einführung

## Transformation der Netzstruktur zur Integration von Erneuerbaren Energiesystemen

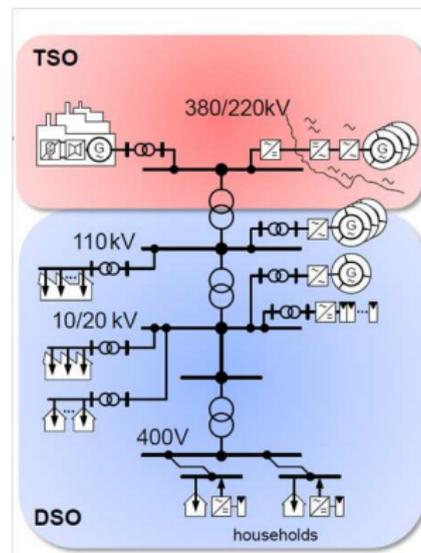
- bisheriger Netzbetrieb:
  - Großkraftwerke sind an das Übertragungsnetz angeschlossen
  - elektrische Energie wird direkt mit Synchrongeneratoren ( $\geq 100$  MW) ins Netz eingespeist
  - Hauptregelziel: lastunabhängige Bereitstellung von sinusförmigen Spannungen mit konstanter Frequenz
  - dafür verantwortlich ist der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB)
  - Anpassung der (zentralisierten) Erzeugung an den Verbrauch



# Einführung

## Transformation der Netzstruktur zur Integration von Erneuerbaren Energiesystemen

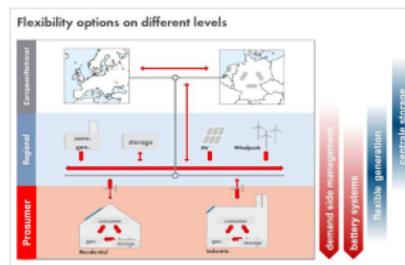
- aktueller (teilweise) / zukünftiger Netzbetrieb
  - Offshore-Windparks sind an das Übertragungsnetz (Betrieb durch TSOs) angeschlossen
  - Onshore-Windparks, WEAs an Einzelstandorten und PV Kraftwerke sind an das Verteilungsnetz (Betrieb durch DSOs) angeschlossen
  - virtuelle Kraftwerke sollen zukünftig am Netz wie Großkraftwerke wirken



# Charakterisierung zukünftiger elektrischer Energiesysteme

## Paradigmenwechsel - Struktur

- von unidirektionalen zu bidirektionalen Leistungsflüssen durch Einspeisung im Verteilnetz und Speicher
  - Energiefluss kann sich teilweise umkehren
- vom zentralen zum dezentralen Betrieb
  - Verteilung der Energieeinspeisung über das gesamte Netz
  - Energienetze sind bisher streng hierarchisch strukturiert
- von Synchronen. in Kraftwerken (direkt) hin zu verteilten Windkraft- und PV-anlagen und Gleichstromleitungen (Umrichter)



# Charakterisierung zukünftiger elektrischer Energiesysteme

## Paradigmenwechsel - Aufgaben

- Verteilte umrichterbasierte Erzeuger müssen zukünftig das Netz betreiben
  - Vergangenheit: "negative Last"
    - PV-/Windenergie-Anlagen sind "negative Lasten"
    - Abschalten bei Netzfehlern
  - Gegenwart: "Netzstützend"
    - Netzfehler werden durchfahren ("Fault Ride Through" Fähigkeit)
    - Kein Abschalten verhindert Folgefehler (Teilnetzabschaltung, Blackout)
    - Bereitstellung von Blindleistung
  - nahe Zukunft: "Netzbetrieb"
    - Netzbildung mit umrichterbasierten regenerativen Erzeugern
    - Regelung von Frequenz (mit Wirkleistung) und Spannung (mit Blindleistung) Umrichter
    - Bereitstellung von Trägheit (Wirkleistung) und Kurzschlussleistung (Blindleistung)

# Charakterisierung zukünftiger elektrischer Energiesysteme

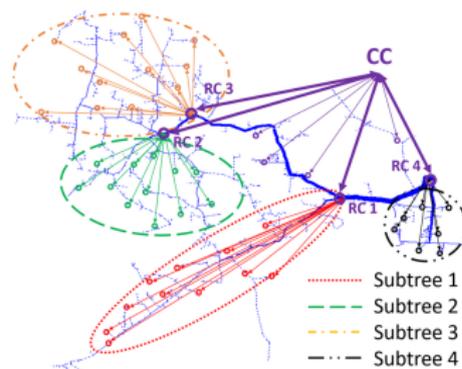
## Massiver Einsatz von dezentralen umrichterbasierten Einheiten

- Trägheit (rotierende Masse) der Kraftwerkssynchronmaschinen hat bisher wesentlich zur Frequenzstabilität des Netzes beigetragen
  - Reduktion der mechanischen Trägheit bewirkt einen signifikanten Anstieg der Änderung der Netzfrequenz (ROCOF) nach einem Netzfehler
- Induktivität des Generators hat bisher wesentlich zur Spannungsstabilität des Netzes beigetragen
  - Umrichter sind weniger Überlastbar und deren Regelung trägt bislang nicht zur Kurzschlussleistung bei
- Geregelte schaltende Umrichter
  - erzeugen störende höherfrequente Anteile in Strom und Spannung
  - erhöhen das Risiko unvorhergesehener Reglerinteraktion
- Notwendig ist der Ausgleich der Volatilität erneuerbarer E.quellen
  - durch das Schaffen von Pufferkapazitäten
  - durch Hochspannungsgleichstromleitungen

# Forschung zur Transformation und Betrieb von EE

## Netzstruktur und Netzregelung

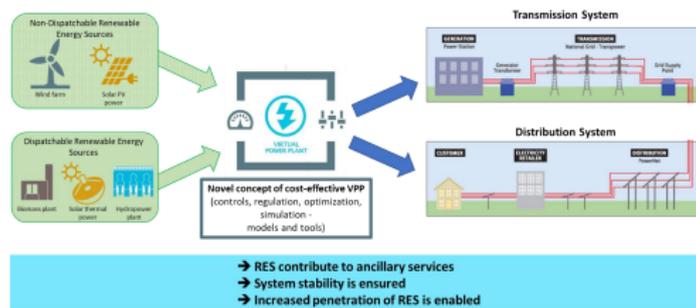
- Segmentierung der Netzstruktur
  - Segmentierung in kleinere Kontrollzonen (z.B. in Mikrogrids)
  - Verstärkung der Kopplung größerer Gebiete mittels hybrider Netze
  - hybride Netze (Drehstrom-/Gleichstromnetze) stellen völlig neue Anforderungen an die Regelung und den Betrieb



# Forschung zur Transformation und Betrieb von EE

## Netzstruktur und Netzregelung

- Systemanalyse und Regelung auf der Netzebene
  - Ableitung von Stabilitätskriterien für Netze mit geringer mechanischer Trägheit
  - verteilte Regelungs- und Optimierungsstrategien für prognoseunsichere Systeme
  - Energiemarkt: u.a. Entwicklung von nachhaltigen Geschäftsmodellen basierend auf Methoden der Spieltheorie für verschiedene Arten der Energiespeicherung



# Forschung zur Transformation und Betrieb von EE

## Erzeuger (erneuerbare Energiesysteme) und Komponenten (Umrichter, Speicher)

- PV Kraftwerke/Windkraftwerke
  - Übernahme von Netzdienstleistungen wie Frequenz- und Spannungsstabilisierung
  - Untersuchung der sich daraus ergebenden Netzdynamik
- Windparkregelung zur Netzstabilisierung und Netzbildung
  - Leistungsfolgeregelung statt Leistungsoptimierung / Leistungsbegrenzung
  - Gesamtoptimierung von Windparks und nicht von Einzelanlagen (extrem Interdisziplinär)
- Entwicklung hochdynamischer virtueller Kraftwerke zur Koordinierung von PV/Windkräften im Verteilungsnetz

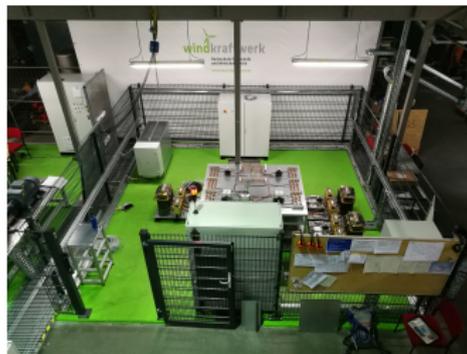
# Forschung im Projekt Windkraftwerk (HTW FB1)

- unsere bisherigen Beiträge zu den genannten Fragestellungen
  - Methodisch theoretische Untersuchungen basierend auf mathematischen Modellen und der Kontrolltheorie
  - Teilprojekte (u.a.):
    - 1 Umrichterregelung: Regelverfahren zur Netzeinspeisung
    - 2 Nichtlineare Mehrgrößregelung von Windturbinen
    - 3 dezentrale Netzregelung mit verteilten Umrichtersystemen
  - Systematischer Experiment/Simulationsvergleich



# Forschung im Projekt Windkraftwerk (HTW FB1)

- unsere bisherigen Beiträge zu den genannten Fragestellungen
  - Experiment/Simulationsvergleich wird ermöglicht durch
    - 1 Entwicklung von Tools zur schnellen Auswertung von Versuchsdaten
    - 2 Automatisierte Steuerung von Netzereignissen
    - 3 Auto-Codegenerierung zur schnellen Umsetzung von Regelungskonzepten
    - 4 Entwicklung von Hardware zur Nachbildung realer Netze / Leistungen

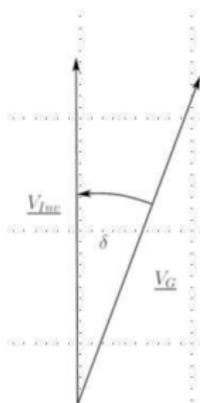




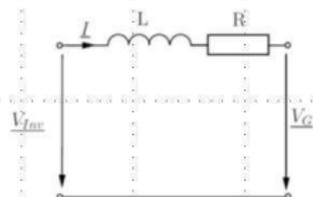
# Forschung im Projekt Windkraftwerk (HTW FB1)

## 1.) Umrichterregelung: Regelverfahren zur Netzeinspeisung

- Grundprinzip der Leistungsregelung in AC Netzen



Zeigerdiagramm

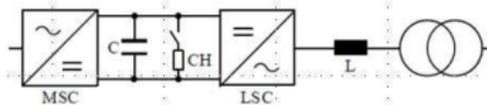


vereinfachtes Ersatzschaltbild

$$p = \frac{v_G}{v_{sc}^2} (v_{sc,R} \cdot (v_{Inv} \cos \delta_V - v_L)) + v_{sc,X} \cdot v_{Inv} \cdot \sin \delta_V$$

$$q = \frac{v_G}{v_{sc}^2} (v_{sc,R} \cdot v_{Inv} \sin \delta_V +) + v_{sc,X} \cdot (v_{Inv} \cdot \cos \delta_V - v_G)$$

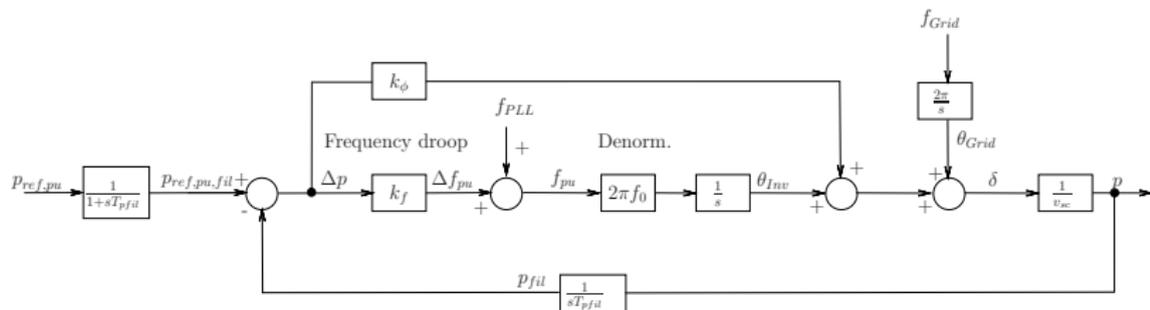
$$p \approx \frac{v_G}{v_{sc}} (v_{Inv} \cdot \delta_V) \quad q \approx \frac{v_G}{v_{sc}} (v_{Inv} - v_G)$$



# Forschung im Projekt Windkraftwerk (HTW FB1)

## 1.) Umrichterregelung: Regelverfahren zur Netzeinspeisung

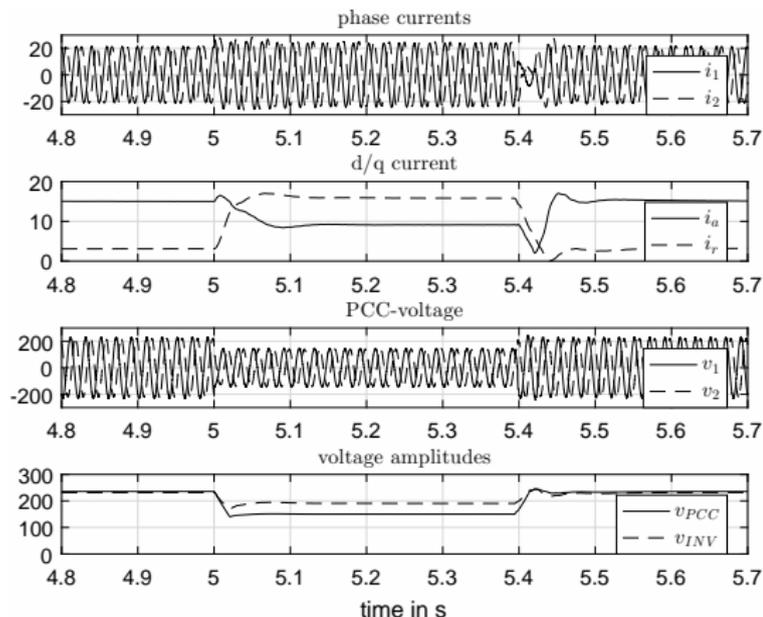
### ■ Struktur der Frequenzregelung



# Forschung im Projekt Windkraftwerk (HTW FB1)

## 1.) Umrichterregelung: Regelverfahren zur Netzeinspeisung

### ■ Laborergebnis Verhalten bei Netzkurzschluss

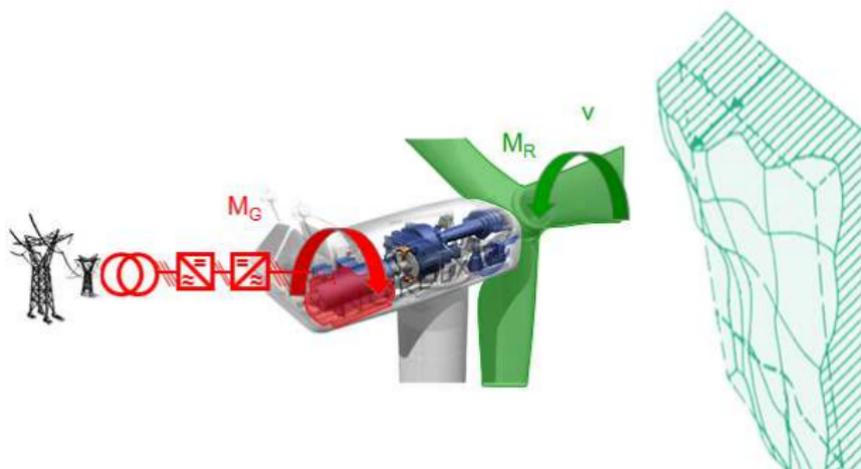




# Forschung im Projekt Windkraftwerk (HTW FB1)

## 2.) Nichtlineare Mehrgrößenregelung von Windturbinen

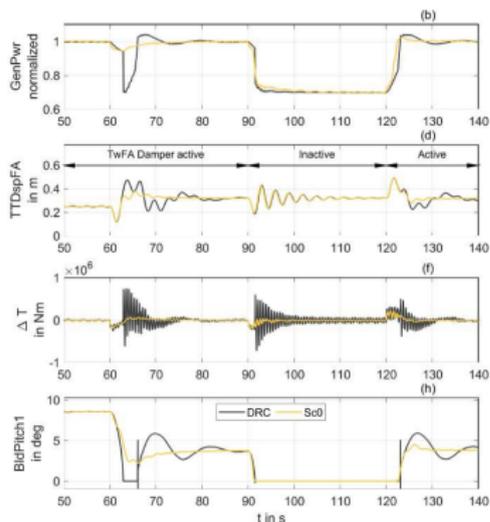
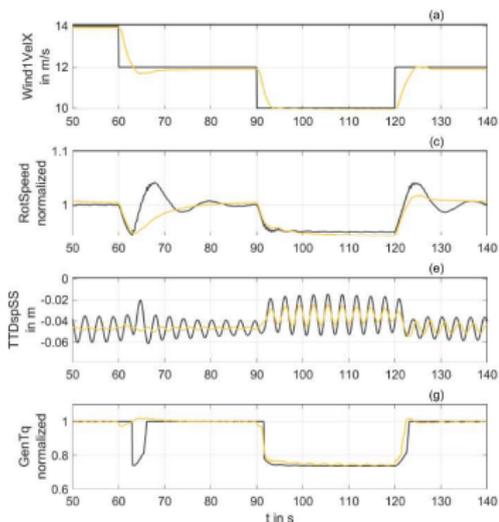
- Stellgrößen, Netzanbindung und Windgeschwindigkeitsverteilung bei Turbinen der Megawattklasse



# Forschung im Projekt Windkraftwerk (HTW FB1)

## 2.) Nichtlineare Mehrgrößenregelung von Windturbinen

### ■ Simulationsergebnisse



# Forschung im Projekt Windkraftwerk (HTW FB1)

## 3.) Dezentrale Netzregelung mit verteilten Umrichtersystemen

- Eigenwertanalyse: Variation der Anzahl der Einspeisungen durch Umrichter bei gitterförmiger Netztopologie

