

Smart Nord

# Systemtheorie für aktive Verteilnetze

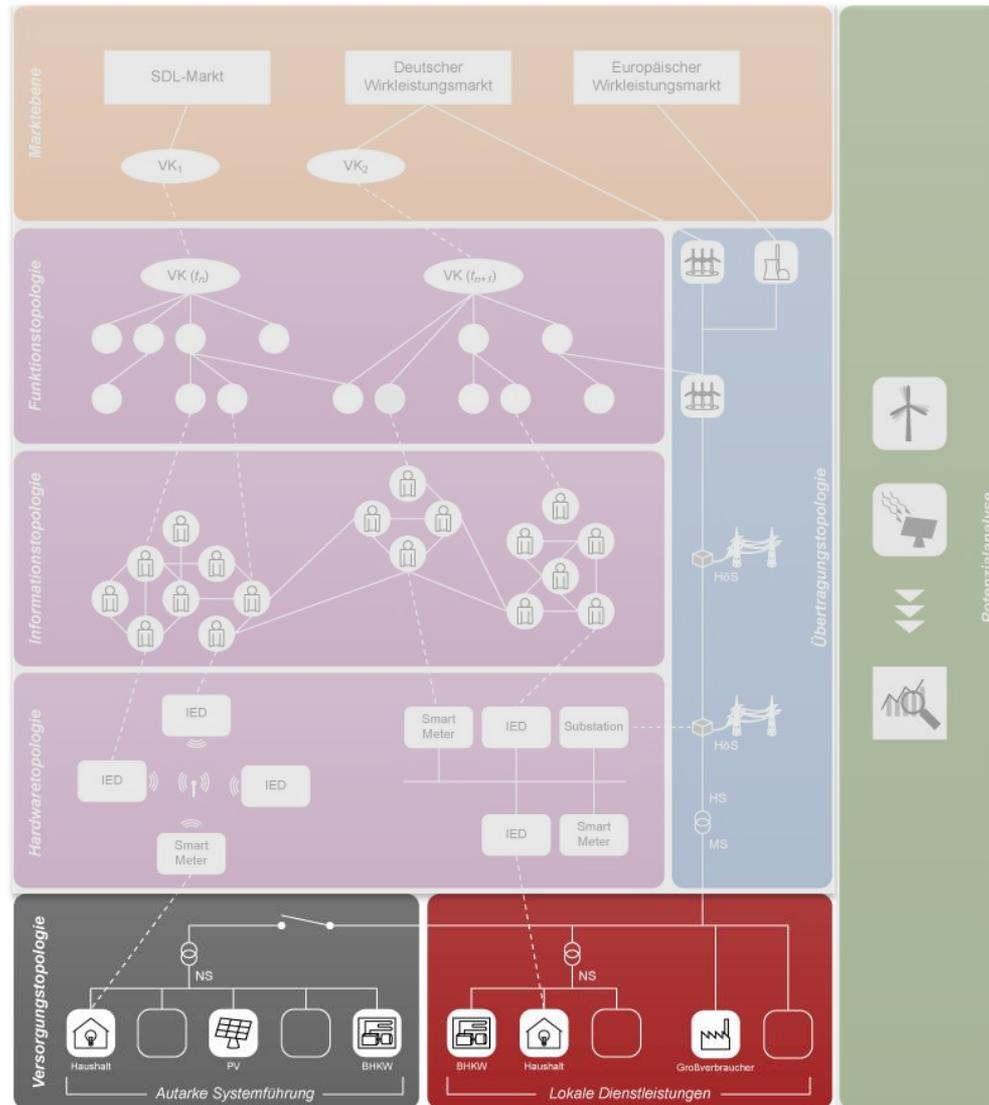
Smart Nord – Teilprojekt 5

Vortragender: Prof. Dr.-Ing. Christian Bohn  
Technische Universität Clausthal

# Zentrale Fragestellung

*Wie müssen MicroGrids konzipiert werden,  
um einen stabilen Netzbetrieb zu  
gewährleisten?*

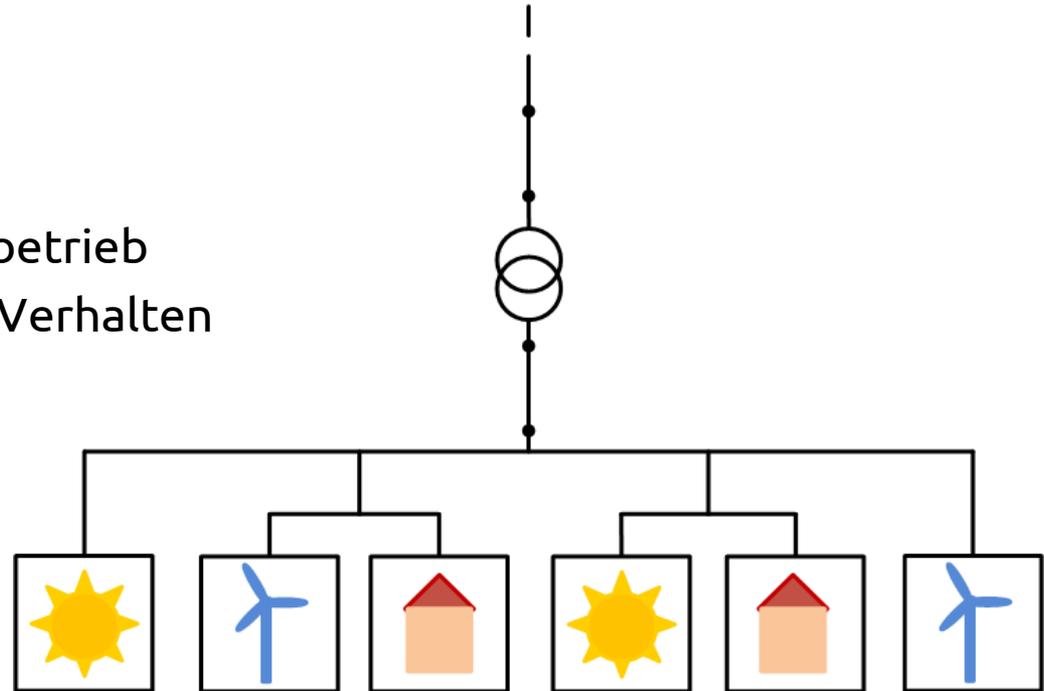
# Einordnung von TP 5



# Herausforderungen für ein „Smart Microgrid“

Ziele im Verbundbetrieb:

- Stabiler Netzbetrieb der Einzelanlagen im Verbundbetrieb
- Stochastisch vorteilhaftes Verhalten des MicroGrid am PCC
- Netzdienstleistungen bereitstellen

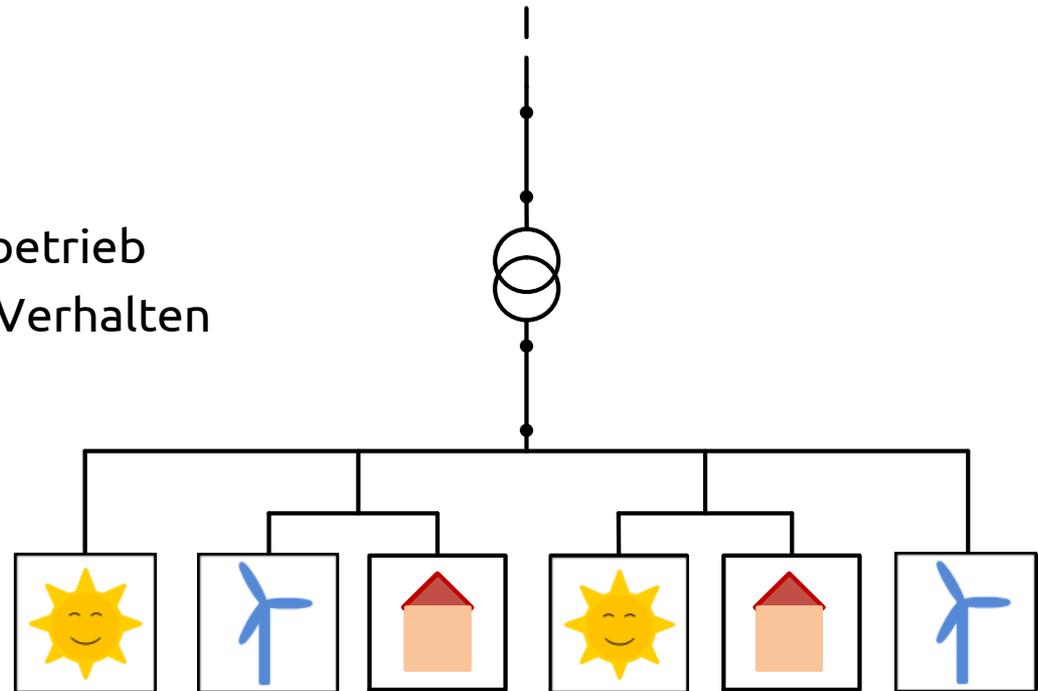


# Herausforderungen für ein „Smart Microgrid“

Ziele im Verbundbetrieb:

- Stabiler Netzbetrieb der Einzelanlagen im Verbundbetrieb
- Stochastisch vorteilhaftes Verhalten des MicroGrid am PCC
- Netzdienstleistungen bereitstellen

... trotz stark volatiler Erzeugung und Verbrauch

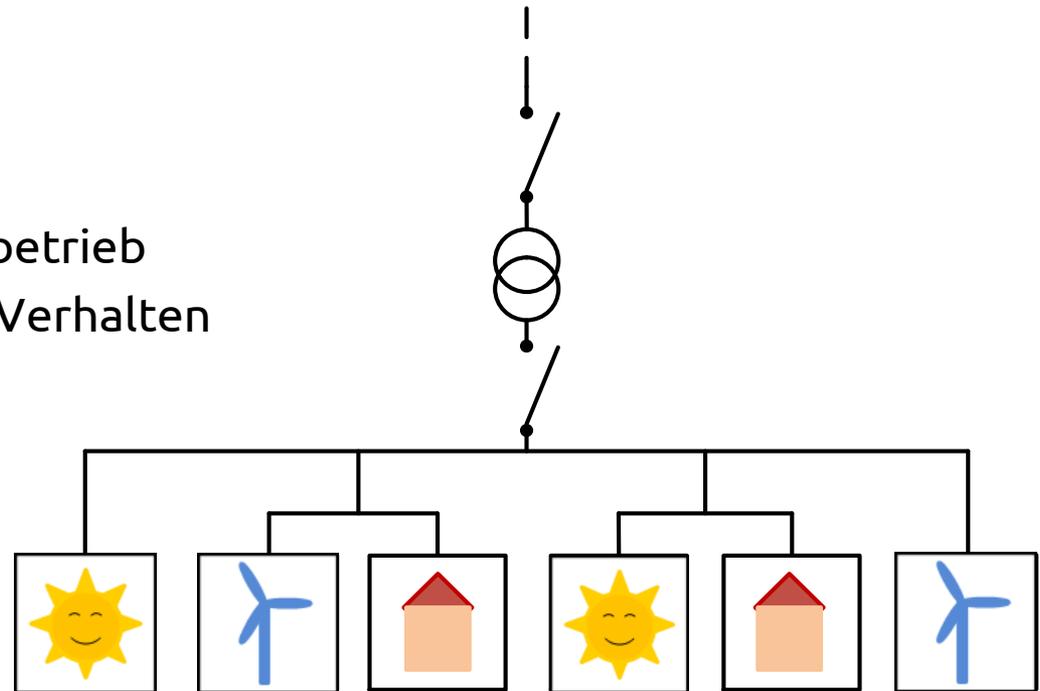


# Herausforderungen für ein „Smart Microgrid“

Ziele im Verbundbetrieb:

- Stabiler Netzbetrieb der Einzelanlagen im Verbundbetrieb
- Stochastisch vorteilhaftes Verhalten des MicroGrid am PCC
- Netzdienstleistungen bereitstellen

... trotz stark volatiler Erzeugung und Verbrauch

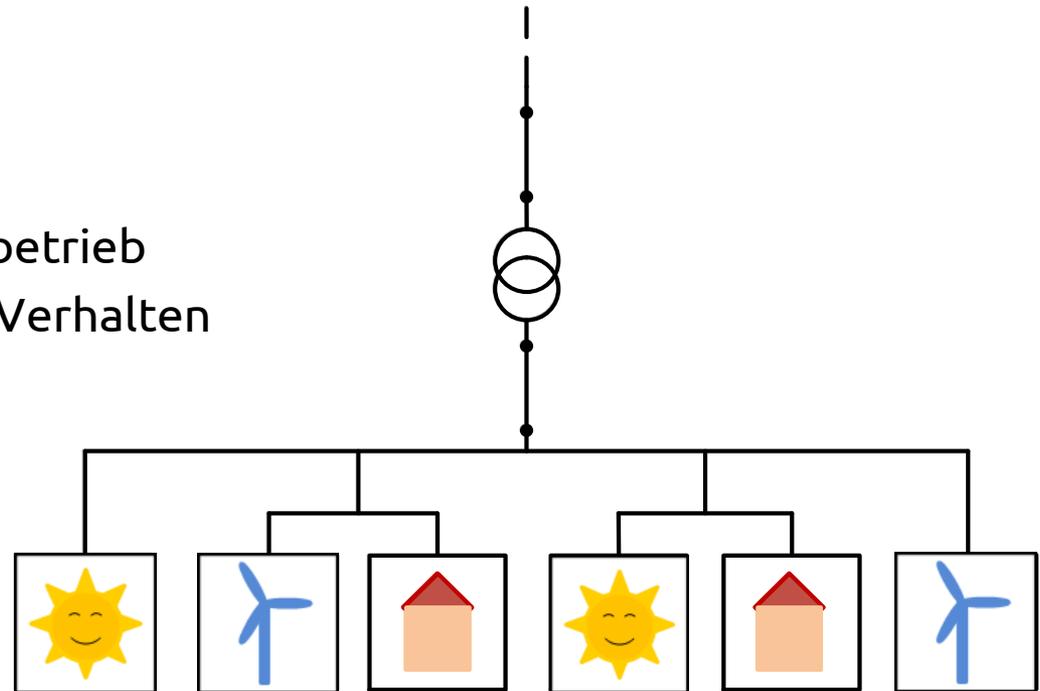


# Herausforderungen für ein „Smart Microgrid“

Ziele im Verbundbetrieb:

- Stabiler Netzbetrieb der Einzelanlagen im Verbundbetrieb
- Stochastisch vorteilhaftes Verhalten des MicroGrid am PCC
- Netzdienstleistungen bereitstellen

... trotz stark volatiler Erzeugung und Verbrauch

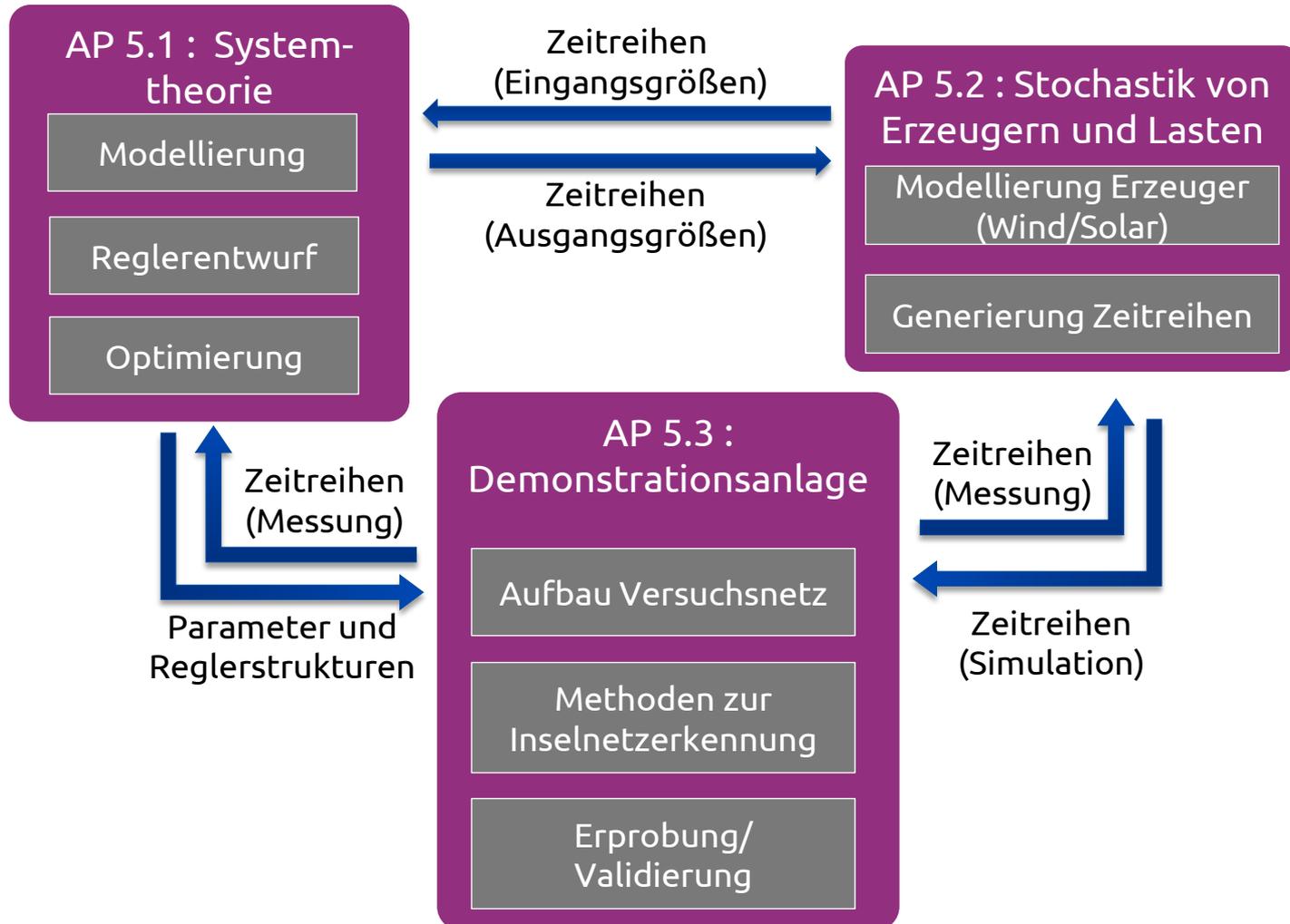


# Themen und Team

- Systemtheorie für umrichterdominierte Verteilnetze
  - Koordinator TP5.1: Prof. Bohn
  - Timo Dewenter
  - Prof. Alexander K. Hartmann
  - Wiebke Heins
  - Benjamin Werther
- Systemtheorie für Erzeuger und Lasten
  - Koordinator TP5.2: Prof. Peinke
  - Mehrnaz Anvari
  - Dr. Detlev Heinemann
  - Gerald Lohmann
  - Katrin Schmietendorf
  - Prof. Reza Tabar
- Demonstrationsanlage
  - Koordinator TP5.3: Prof. Beck
  - Florian Pöschke
  - Benjamin Werther



# Vernetzung der Arbeitspakete



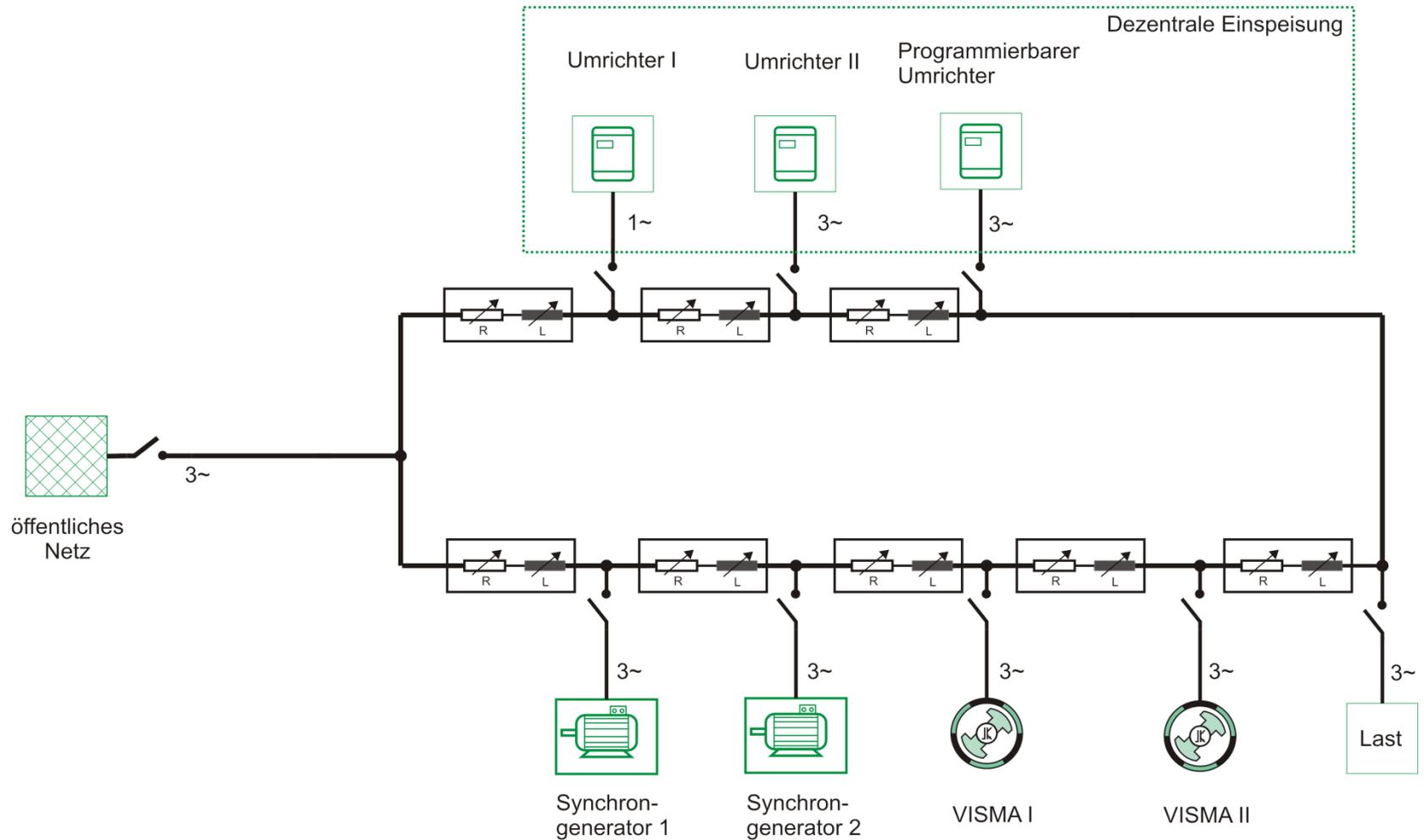
# Gliederung

- AP5.3: Demonstrator und Erprobung von Inselnetzerkennungsverfahren
  - Demonstrator
  - Inselnetzerkennung
- AP5.1: Systemtheorie für umrichterdominierte Verteilnetze
  - Optimierung einer Inselnetzregelung
  - Verteilte MicroGrid-Regelung
  - Robustheit von Netzen in Abhängigkeit der Netzstruktur
- AP5.2: Systemtheorie von Erzeugern und Lasten
  - Stochastische Modellierung von Erzeugung aus Wind- und Photovoltaik
  - Theoretischer Beitrag zur Auflösung bei Fluktuationsanalyse
  - Anwendung im Demonstrator

# Ziele AP5.3

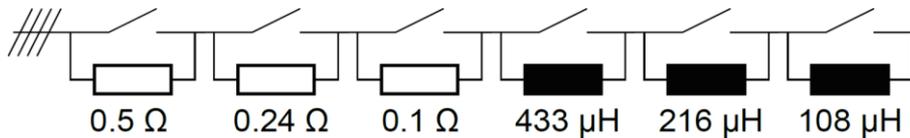
- Ertüchtigung einer Demonstrationsanlage
- Praktische Erprobung von Inselnetzerkennungsverfahren in umrichterdominierten Netzen
- Praktische Validierung von Ergebnissen aus anderen Arbeitspaketen

# Aufbau der Demonstrationsanlage



# Aufbau der Demonstrationsanlage

- Acht frei verschaltbare Leitungersatzelemente

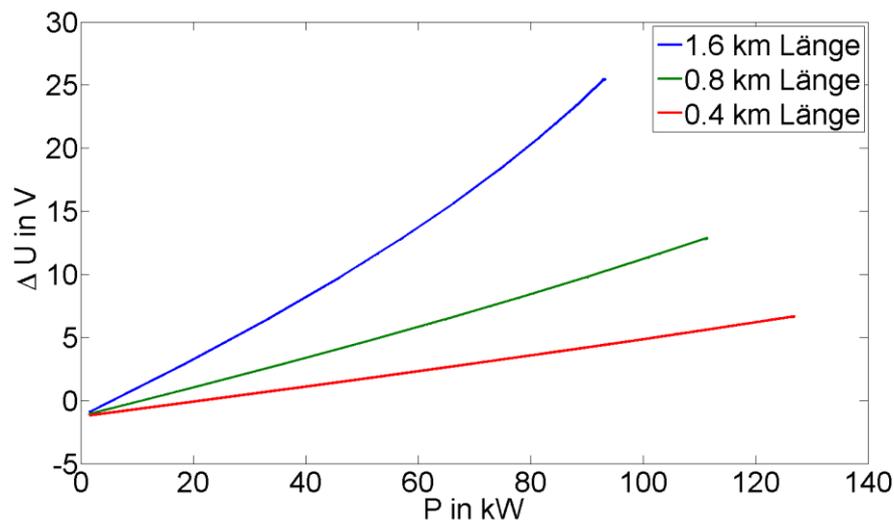


- Wahl der Leitungsparameter erfolgte so, dass Verteilnetze in folgenden Maßstäben nachgebildet werden können :

Spannungsmaßstab: 1:1

Strommaßstab: 1:10

Leistungsmaßstab: 1:10



Beispielmessung zur Nachbildung:

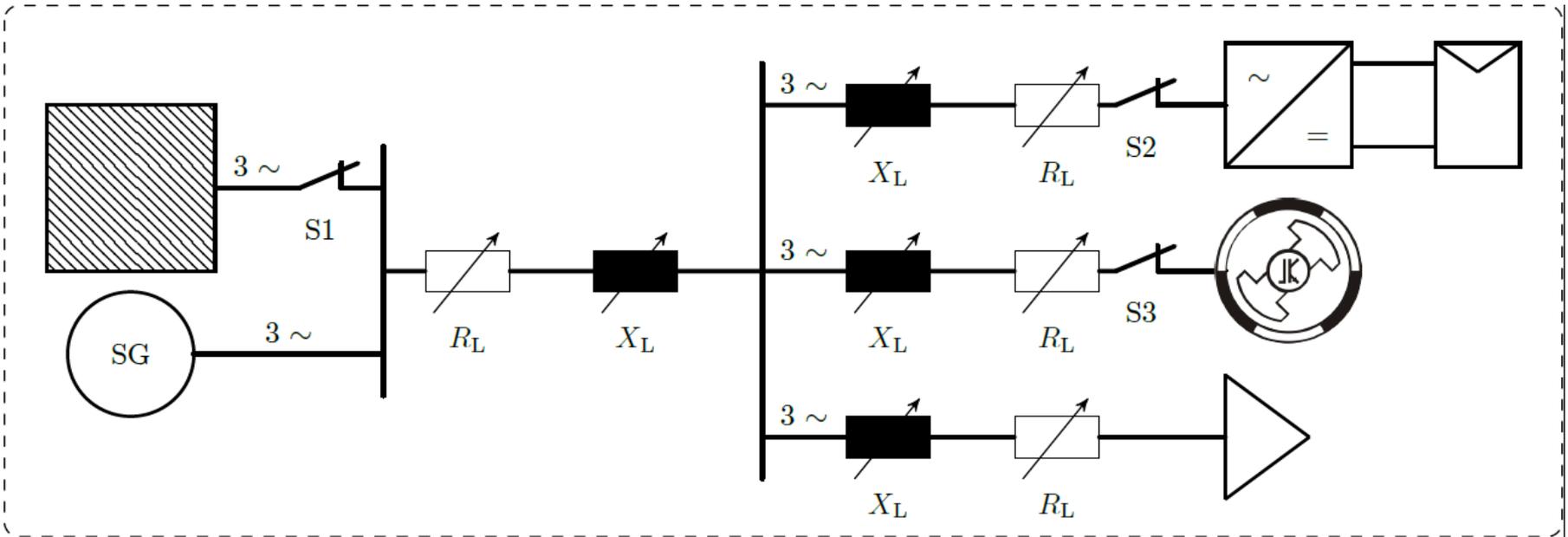
- Last an Impedanz mit Parametern einer 150 mm<sup>2</sup> Al Leitung

# Inselnetzerkennung

- Erhöhung des Anteils dezentraler Einspeisung erhöht die Chance der Ausbildung stabiler Inselnetze
- Problem: Inselnetzerkennung im stabilen Inselnetzbetrieb
- Test verschiedener passiver Verfahren zur Inselnetzerkennung
- Erprobung der Möglichkeit der Erkennung von Inselnetzen anhand verschiedener statistischer Parameter der Frequenz
- Analyse an verschiedenen Punkten innerhalb des Netzes und unterschiedlichen Netzkonfigurationen

# Inselnetzerkennung

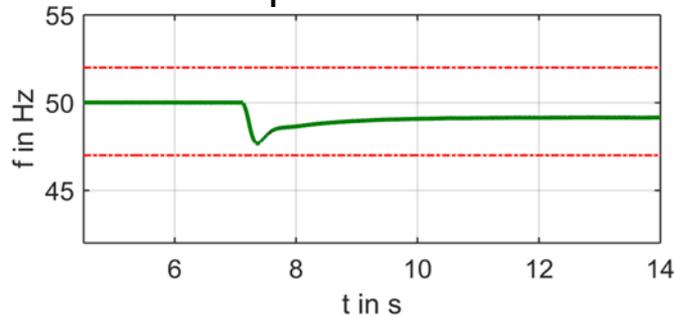
- Netzstruktur für Versuche:



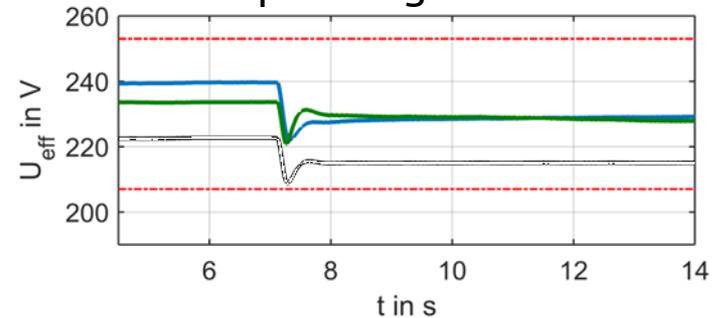
- Setup 1: Last, Wechselrichter und Synchronmaschinen (SM)
- Setup 2: Last, VISMA und Synchronmaschinen (SM)
- Durch Öffnen von S1 wird Verinselung herbeigeführt

# Inselnetzerkennung (Setup 1)

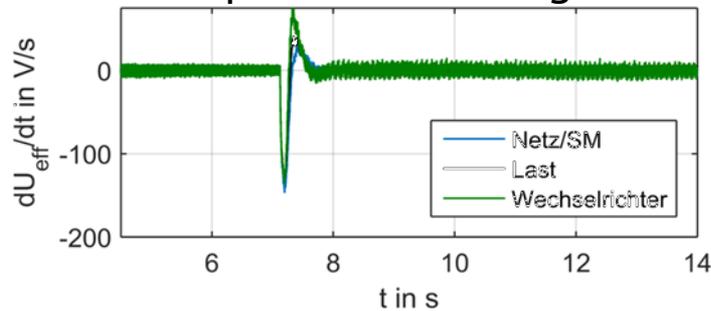
## Frequenzverlauf



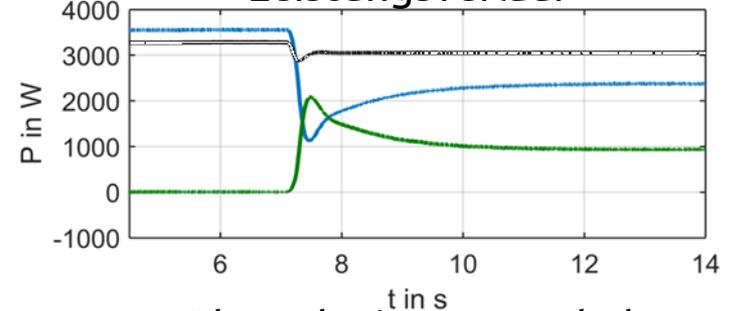
## Spannungsverlauf



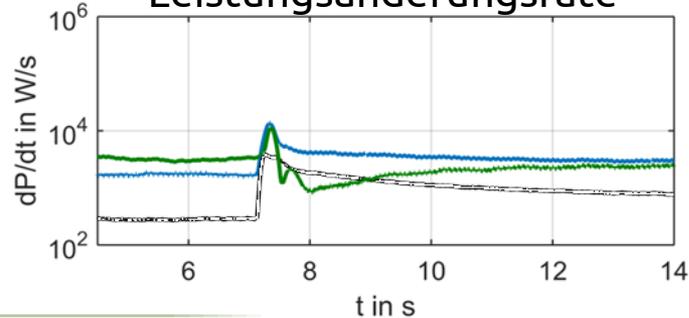
## Amplitudenänderungsrate



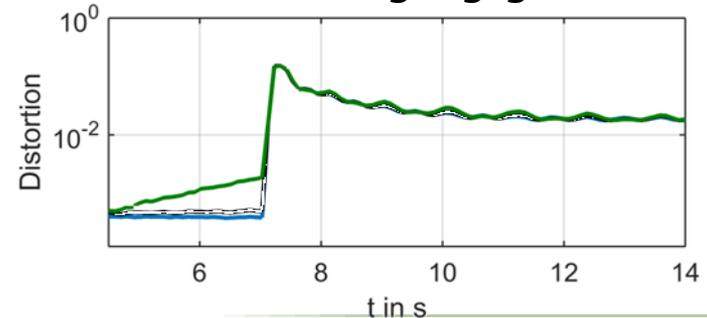
## Leistungsverlauf



## Leistungsänderungsrate



## Oberschwingungsgehalt

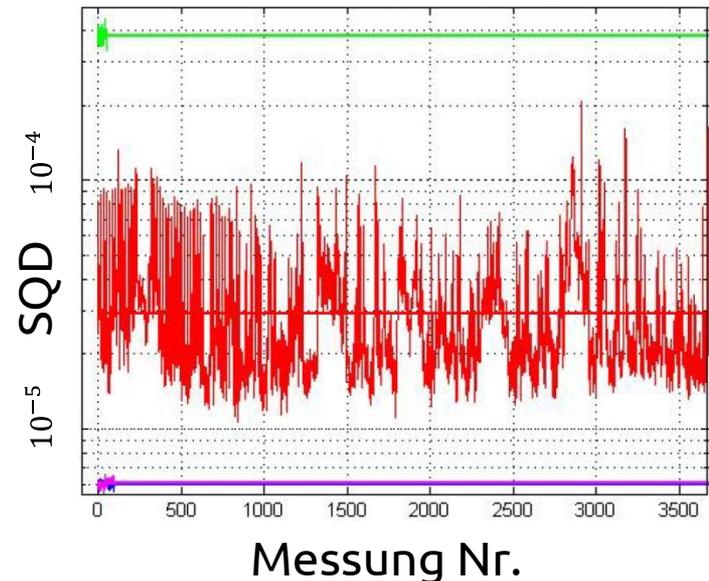


# Inselnetzerkennung (Setup 2)

- Summe der Quadrate der Differenzen als Maß für die Dynamik der Frequenzmesswerte

$$SQD = \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+1})^2$$

- Definition eines Detektionsbereiches 1...n, welcher bei bestimmter Abtastrate zu einer gewissen Detektionszeit führt
- Unterschiedliche Teilnehmer haben unterschiedliche Rauschniveaus
  - Grün: VISMA
  - Rot: Netz
  - Magenta: Synchrongenerator 1
  - Blau: Synchrongenerator 2



# Zusammenfassung AP5.3

- Aufbau und Betrieb der Demonstrationsanlage
- Inselnetzerkennungsverfahren:
  - Prüfen auf Grenzwertverletzungen in stabilem MicroGrid ist kein sicheres Kriterium
  - Kriterien, die einmalige Spannungs- und Frequenzänderungen als Basis nehmen, stellen sehr gute Indizien dar, sind ggf. aber nicht von Laständerungen zu unterscheiden
  - Brauchbar stellten sich Kriterien heraus, die kontinuierlich Änderungen bewerten, wie THD oder auf Frequenz-/Leistungsrauschen basierende Verfahren
  - Mit dem SQD-Verfahren sind zusätzlich noch prinzipielle Aussagen über das Anlagenverhalten im Netz möglich

# Gliederung

- AP5.3: Demonstrator und Erprobung von Inselnetzerkennungsverfahren
  - Demonstrator
  - Inselnetzerkennung
- **AP5.1: Systemtheorie für umrichterdominierte Verteilnetze**
  - Optimierung einer Inselnetzregelung
  - Verteilte MicroGrid-Regelung
  - Robustheit von Netzen in Abhängigkeit der Netzstruktur
- AP5.2: Systemtheorie von Erzeugern und Lasten
  - Stochastische Modellierung von Erzeugung aus Wind- und Photovoltaik
  - Theoretischer Beitrag zur Auflösung bei Fluktuationsanalyse
  - Anwendung im Demonstrator

# Fragestellung AP5.1

- Welche Anlagen- und Regelkonzepte sind geeignet, um zukünftig einen stabilen Netzbetrieb zu garantieren?
- Wie sind die vorhandenen Freiheitsgrade auszunutzen, um ein gewünschtes Verhalten des Microgrids zu erzeugen?
- Welche Netzstrukturen sind geeignet, um ein möglichst robustes Versorgungsnetz zu erreichen? (Poster)

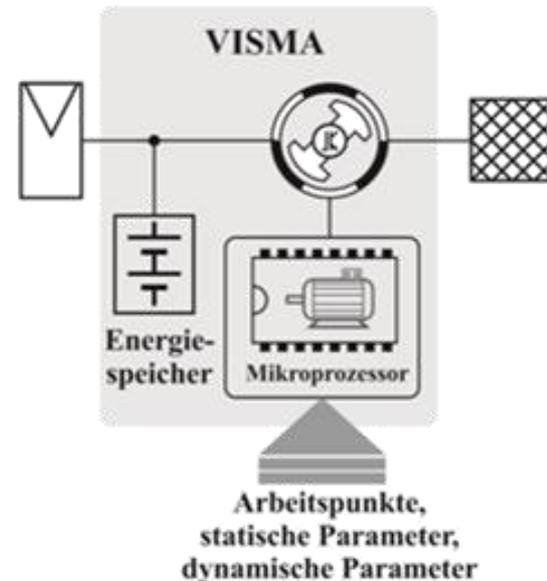
# Prinzip der Virtuellen Synchronmaschine

Vorgegebenes Modell  
(Synchronmaschine):

$$\dot{\theta} = \omega$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} \cdot \left( \frac{P_m - P_e}{\omega + \omega_N} - M_D \right)$$

$$\dot{M}_D = \frac{1}{T_D} \cdot (k_D \cdot \dot{\omega} - M_D)$$



Die freien Parameter  $k_d$ ,  $J$  und  $T_d$  bestimmen das dynamische Verhalten der virtuellen Synchronmaschine (VISMA).

Eigenschaften des Modells:

- Eingespeiste Energie bei Frequenzsprung:

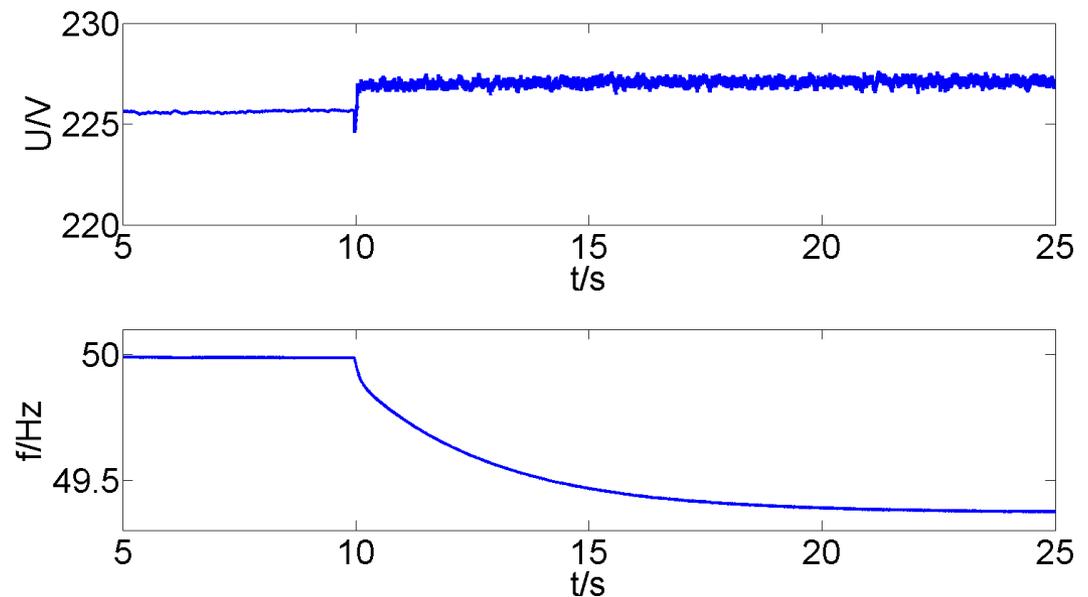
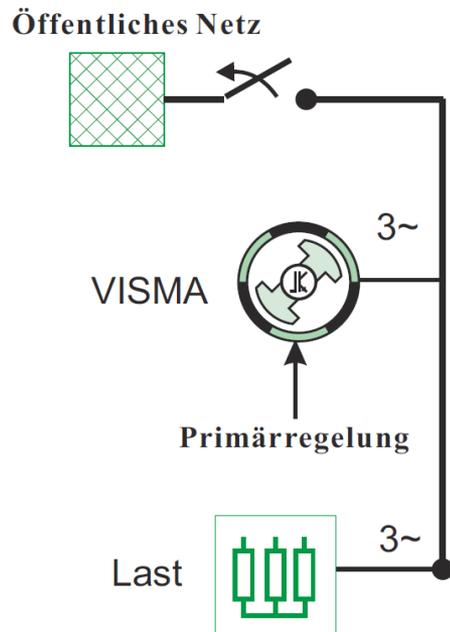
$$E = \frac{1}{2} (J + k_D) \cdot [\omega_1^2 - \omega_2^2]$$

- Stabilitätsverhalten der Ruhelagen gleicht Massenschwinger, falls :

$$T_D \cdot \frac{k_D}{J} > 0$$

# Verhalten bei Verinselung

- Herausforderung: Sicherer Übergang vom Netzparallel in den Inselnetzbetrieb



- Die Untersuchungen wurden mit verschiedensten Lastsituationen durchgeführt
- Solange die Anlagenspezifikationen eingehalten wurden, war der Netzbetrieb stabil.

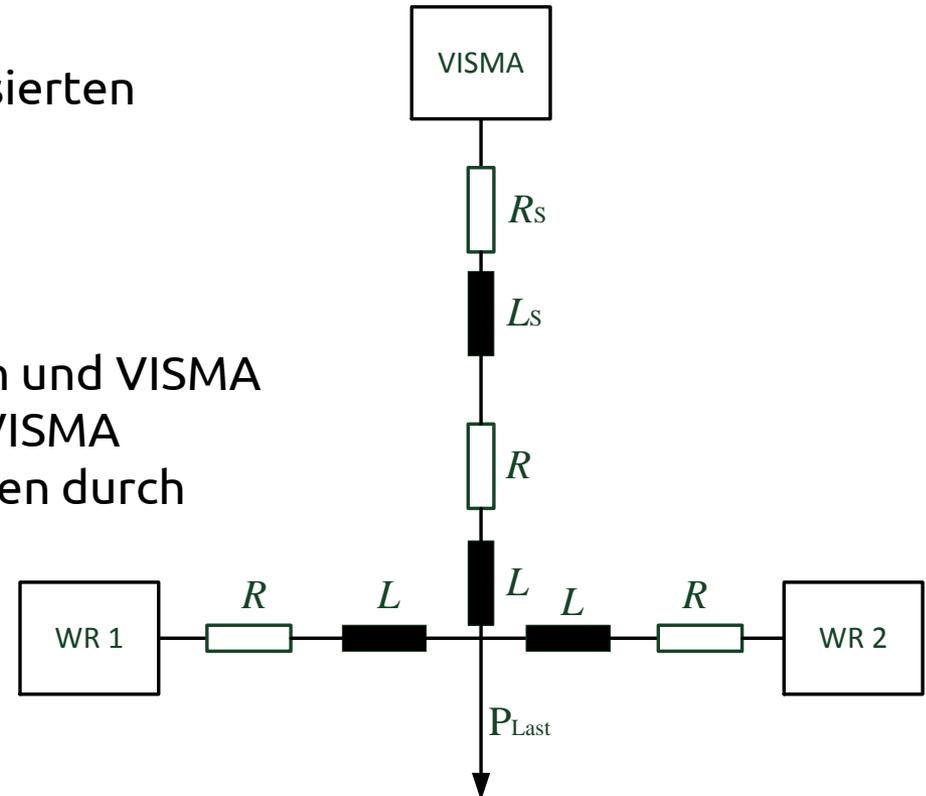
# Optimierung einer Inselnetzregelung

Ziel:

- Wunschverhalten einer VISMA-basierten Inselnetzregelung bei Lastsprung

Szenario:

- Inselnetz
- Statikregelung an Wechselrichtern und VISMA
- Sekundärregelung (PI-Regler) an VISMA
- Dynamik von Erzeugern beschrieben durch Beziehungen zwischen  $f$ ,  $U$ ,  $P$ ,  $Q$
- Last konstant bis auf Sprung von 15 kW auf 30 kW



# Optimierung einer Inselnetzregelung

Optimierung von:

- VISMA-Parametern ( $T_d, k_d, J$ )
- Parametern der Sekundärregelung ( $K_I, K_p=0$ )

Gütefunktional  $S \rightarrow \min$ :

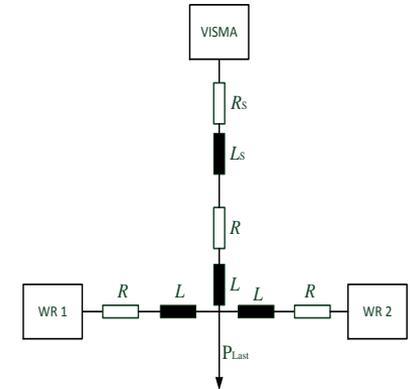
$$S = t_R + \sum_i^4 \lambda(i) \cdot \int_{t_0}^{t_0+t_R} |P_i(t) - P_{\text{Soll},i}(t)| dt + \beta \cdot (J + k_d)$$

mit Relaxierungszeit  $t_R$ ,  $\lambda(i) = \begin{cases} \alpha/100, & \text{für } i = 1 \text{ (VISMA)} \\ \alpha, & \text{für } i \neq 1 \end{cases}$

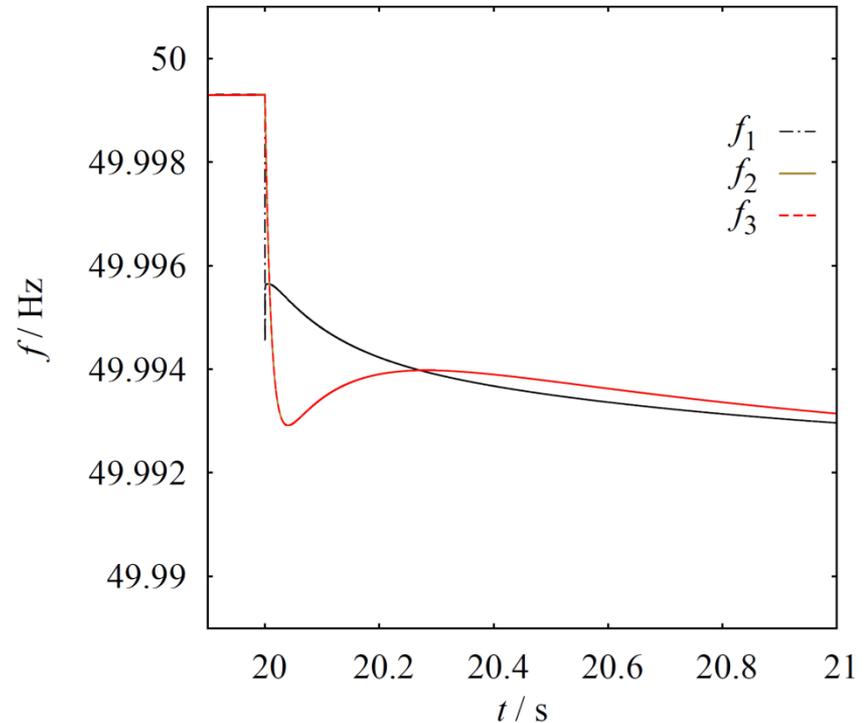
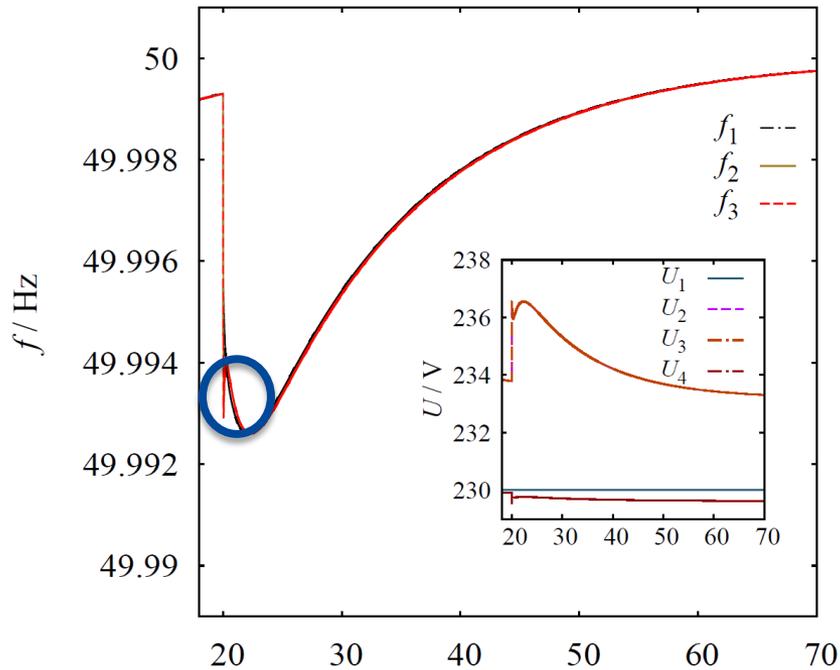
Trägheitsmoment  $J$ , Dämpfungsparameter  $k_d$  und Parametern  $\alpha$  und  $\beta$ .

Nebenbedingungen:

- Sekundärregelung langsamer als VISMA
- VISMA nicht schneller als herkömmlicher Wechselrichter (Energiezufuhr der VISMA beschränkt)

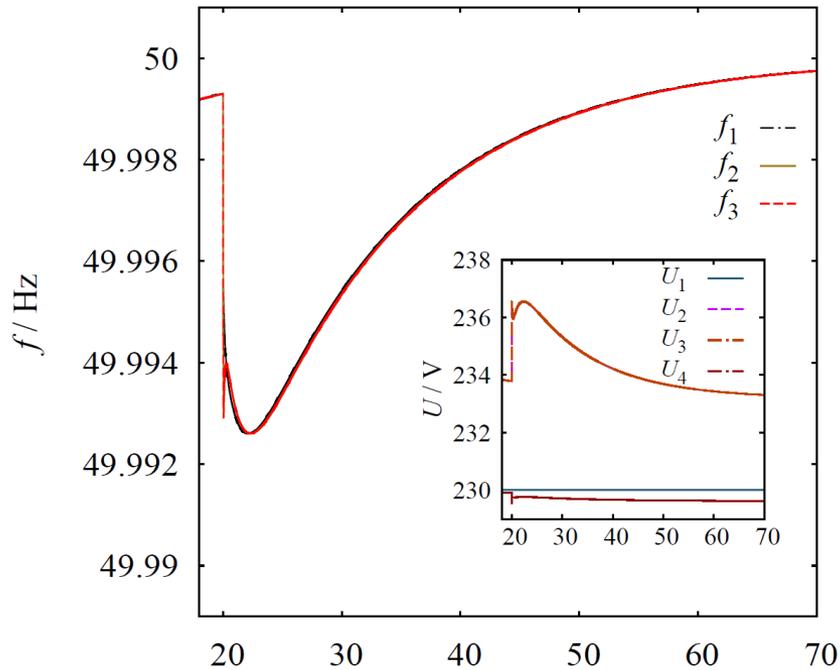


# Optimierung einer Inselnetzregelung

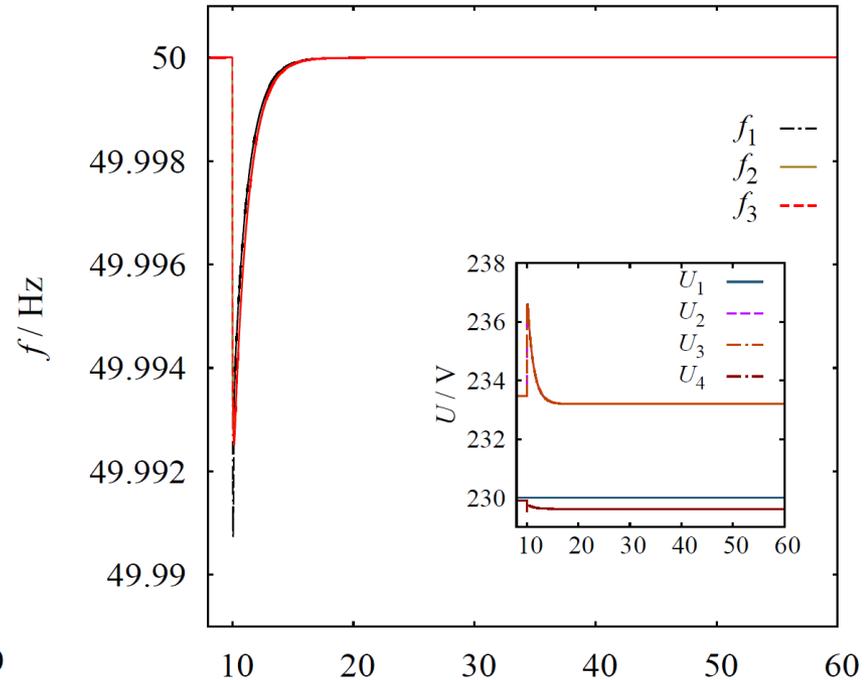


Minimum für  $\alpha = 2 \cdot 10^{-6}$ ,  
 $\beta = 0.01$ ,  $J = 5.12 \cdot 10^{-3}$ ,  
 $k_d = 50.83$ ,  $T_d = 0.78$ ,  
 $K_I = 2.07 \cdot 10^3$ ,  $K_P = 0$

# Optimierung einer Inselnetzregelung



Minimum für  $\alpha = 2 \cdot 10^{-6}$ ,  
 $\beta = 0.01$ ,  $J = 5.12 \cdot 10^{-3}$ ,  
 $k_d = 50.83$ ,  $T_d = 0.78$ ,  
 $K_I = 2.07 \cdot 10^3$ ,  $K_P = 0$



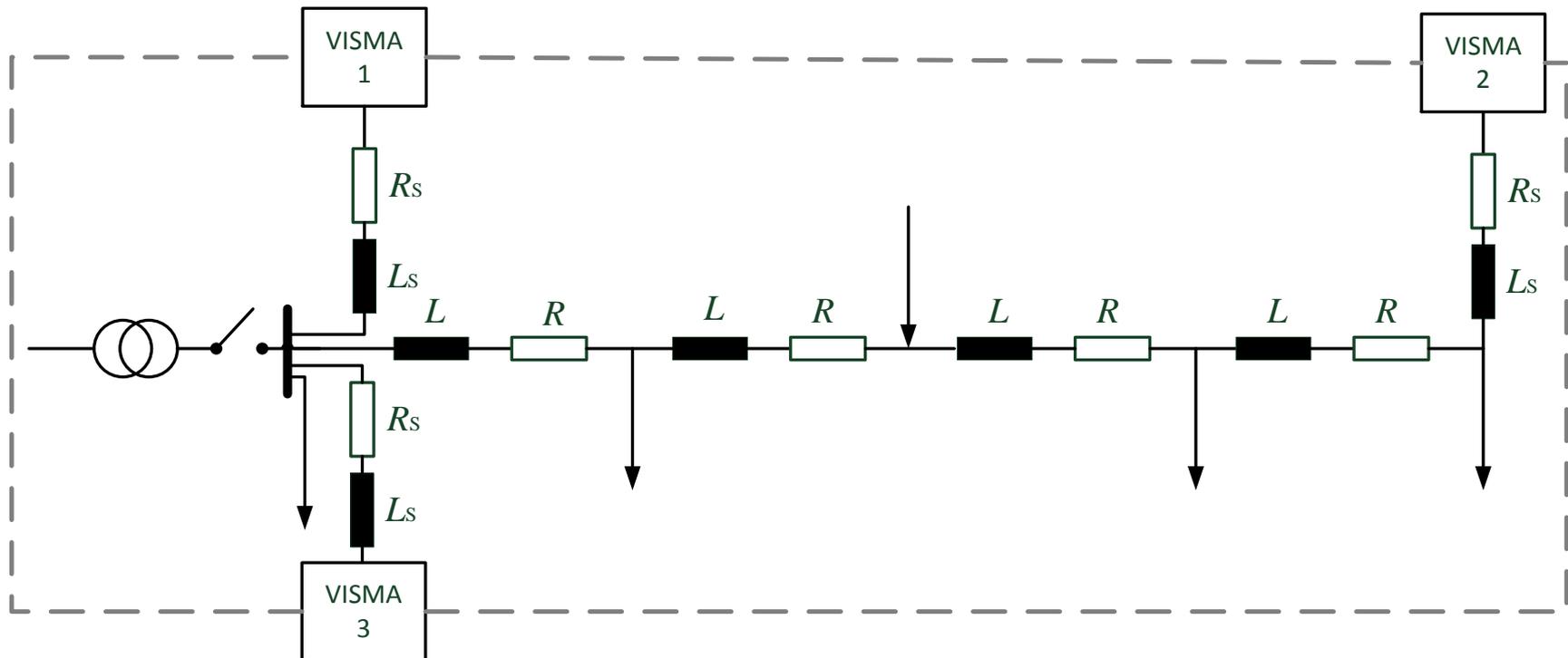
Minimum für  $\alpha = 4 \cdot 10^{-6}$ ,  
 $\beta = 1$ ,  $J = 0.83$ ,  
 $k_d = 1.94 \cdot 10^{-3}$ ,  
 $T_d = 9.32 \cdot 10^{-7}$ ,  $K_I = 2.72 \cdot 10^4$ ,  
 $K_P = 0$

# Ergebnisse

- Abklingverhalten des Systems lässt sich durch Änderung der Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  steuern
- Verschiedene Kombinationen von  $\alpha$  und  $\beta$  verschieben Fokus der Optimierung
- Mit Nebenbedingung, dass Energiezufuhr der VISMA beschränkt ist, erzeugt die Optimierung ein realistisches Ergebnis

# Verteilte MicroGrid-Regelung

- Verteilte, VISMA-basierte Sekundärregelung (PI) für ein MicroGrid
- Beispiel:
  - Drei Erzeuger über VISMA, die Daten austauschen können
  - Ziel: Frequenzhaltung im Inselnetzfall durch verteilte Regelung (Kommunikation nur zwischen den drei VISMA), dabei Aufrechterhaltung der Lastverteilung



# Verteilte MicroGrid-Regelung

- Vergleich: Dezentrale (P)I-Regler ohne Kommunikation vs. verteilter (P)I-Regler mit Kommunikation\*

Ohne Kommunikation:

$$P_{\text{Sek},i}(t) = x_{\text{I},i}(t),$$

$$\dot{x}_{\text{I},i}(t) = k_{\text{I},i} (\omega_{\text{soll}} - \omega_i),$$

$i = 1, 2, 3$

Mit Kommunikation:

$$P_{\text{Sek},i}(t) = x_{\text{I},i}(t),$$

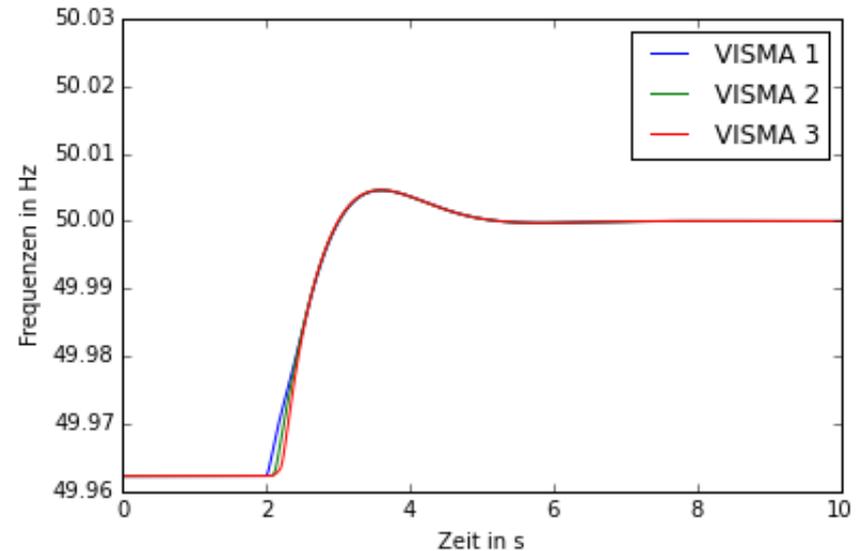
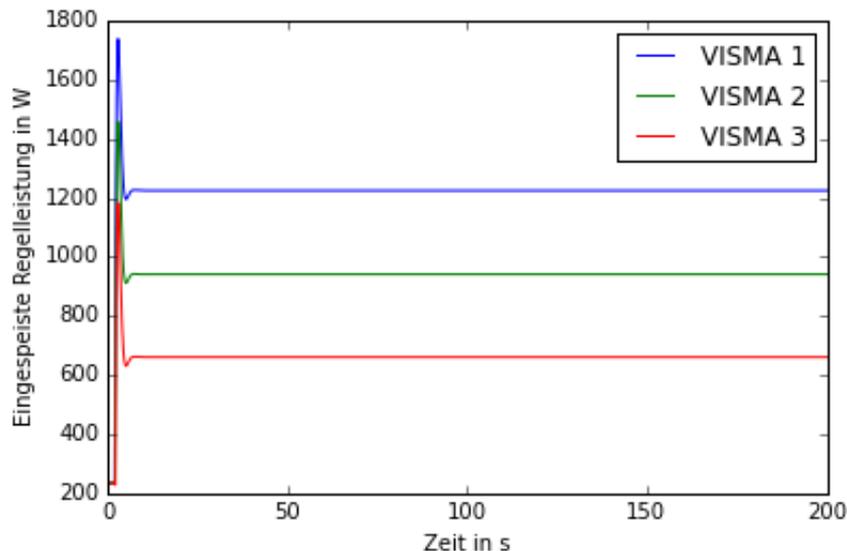
$$T_{\text{I},i} \dot{x}_{\text{I},i}(t) = k_{\text{I},i} (\omega_{\text{soll}} - \omega_i) - \sum_{\substack{j=1,2,3 \\ j \neq i}} \left( \frac{x_{\text{I},i}(t)}{k_{\text{I},i}} - \frac{x_{\text{I},j}(t)}{k_{\text{I},j}} \right),$$

$i = 1, 2, 3$

\* vgl. Simpson-Porco et al. „Synchronization and power sharing for droop-controlled inverters in islanded microgrids“, Automatica 49 (2013), Nr. 9, S. 2603–2611

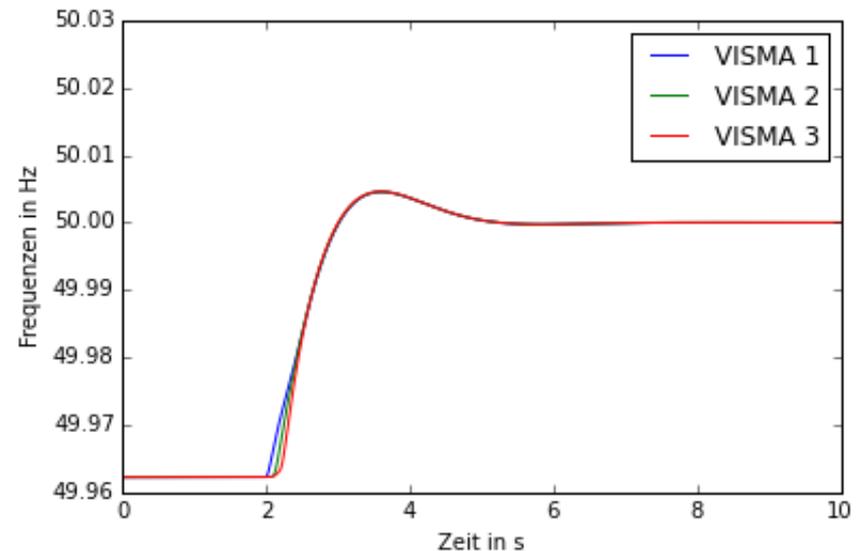
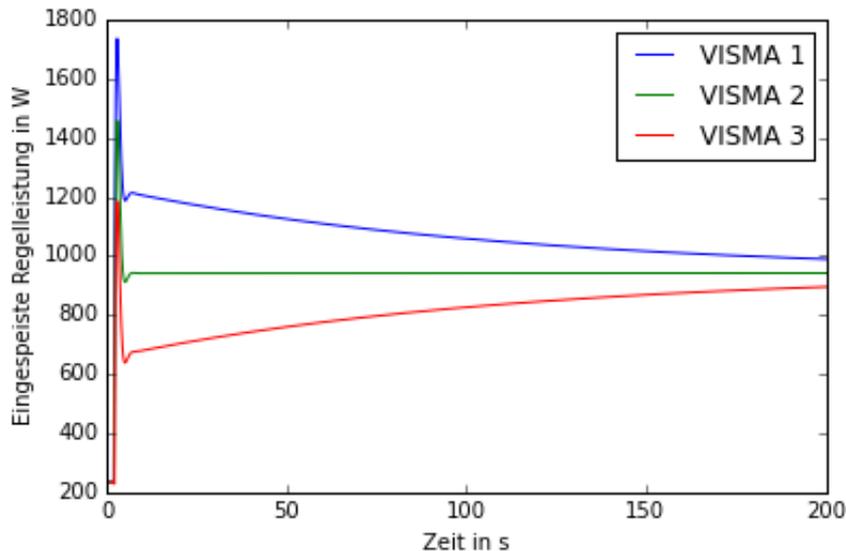
# Verteilte MicroGrid-Regelung

- Szenario: Nach einer Verinselung wird Sekundärregelung zugeschaltet
- Zuschaltung erfolgt theoretisch gleichzeitig, praktisch verzögert
- Hier in Abständen von 0,1s
- Dezentraler PI-Regler ohne Kommunikation stellt Sollfrequenz nach Einschaltung wieder her, nicht aber die durch Statiken vorgegebenen Lastverteilungen



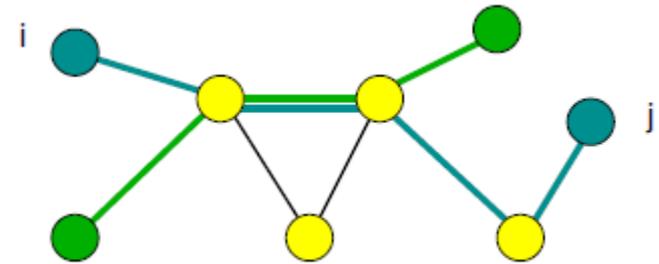
# Verteilte MicroGrid-Regelung

- Szenario: Nach einer Verinselung wird Sekundärregelung zugeschaltet
- Zuschaltung erfolgt theoretisch gleichzeitig, praktisch verzögert
- Hier zur Veranschaulichung in Abständen von 0,1s
- Verteilter Regler mit Kommunikation stellt Sollfrequenz wieder her und kehrt zur ursprünglichen Lastverteilung zurück



# Stabilität von Energienetzen in Abhängigkeit der Netztopologie

Welche Netzwerktopologien sind sehr sicher/unsicher/typisch?  
Variable Erzeugung/Last-Zustände  
↔ Ensembles von Netzwerken



- 3 Topologie-Ensembles: Erdős-Rényi Netzwerke, Small-World Netzwerke, räumliche Netzwerke
- 3 Grid-Modelle: kürzeste Pfade, Lastfluss, Kuramoto(-ähnliche) Oszillatoren
- 2 Stabilitätsmaße:  $N - 1$  Kriterium, Stabilität von Ruhelagen

# Ergebnisse

- Grundlage für robuste MicroGrid-Regelung
- Primärregelung:
  - VISMA-Prinzip mit herkömmlicher Statik-Regelung
  - Regelleistung wird nach Anlagengröße auf Erzeuger verteilt
  - Netzstützende Eigenschaften der VISMA werden ausgenutzt
  - Übergang von Verbund- zu Inselnetz einfach möglich (hier nicht gezeigt)
  - Herkömmliche Statik-geregelte Wechselrichter können einfach in das MicroGrid integriert werden
- Sekundärregelung:
  - Verteilte Regelung angewendet auf VISMA-Prinzip
  - Netzstützende Eigenschaften der VISMA bleiben erhalten
  - Nach Störung wird gewünschte Aufteilung der Regelleistung wieder hergestellt
  - Kommunikation nur zwischen an Regelung beteiligten Anlagen benötigt
  - Bei Kommunikationsausfall Übergang in eine stabilisierende dezentrale Regelung

# Zusammenfassung AP5.1

- Anlagen- und Regelungskonzepte, die netzparallel arbeiten und bei abruptem Übergang in das Inselnetz ein Netz bereitstellen, wurden erprobt
- Optimierungs-Methodik zur Parametrierung von Anlagen zur Erzielung eines Wunschverhaltens wurde entwickelt
- Methodik zur Untersuchung des Einflusses der Netztopologie auf die Robustheit des Gesamtsystems wurde entwickelt

# Gliederung

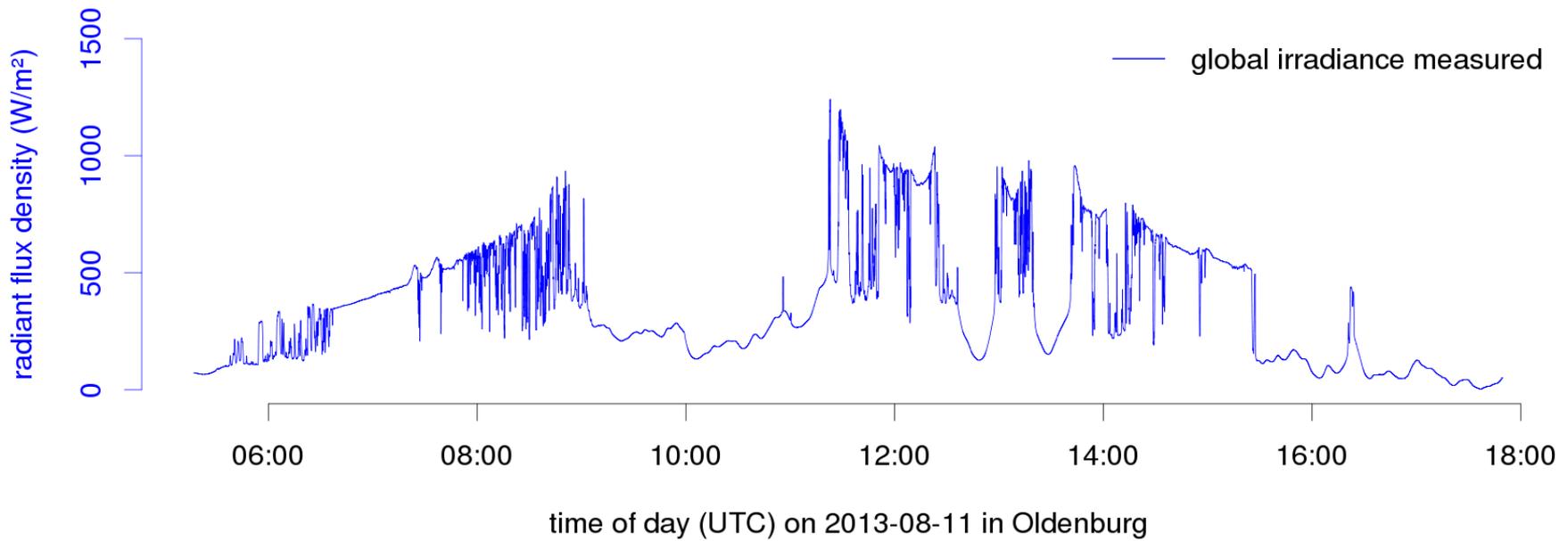
- AP5.3: Demonstrator und Erprobung von Inselnetzerkennungsverfahren
  - Demonstrator
  - Inselnetzerkennung
- AP5.1: Systemtheorie für umrichterdominierte Verteilnetze
  - Optimierung einer Inselnetzregelung
  - Verteilte MicroGrid-Regelung
  - Robustheit von Netzen in Abhängigkeit der Netzstruktur
- **AP5.2: Systemtheorie von Erzeugern und Lasten**
  - Stochastische Modellierung von Erzeugung aus Wind- und Photovoltaik
  - Theoretischer Beitrag zur Auflösung bei Fluktuationsanalyse
  - Anwendung im Demonstrator

# Fragestellung AP5.1

- Welche zeitliche Auflösung ist notwendig, um die stochastischen Eigenschaften realer Daten von Wind- und Photovoltaikanlagen abzubilden?
- Wie sind die verschiedenen Erzeuger regenerativer Energiequellen zu charakterisieren und zu modellieren?
- Können parametrierbare Anlagen die stochastische Eigenschaften der Leistung am PCC beeinflussen?

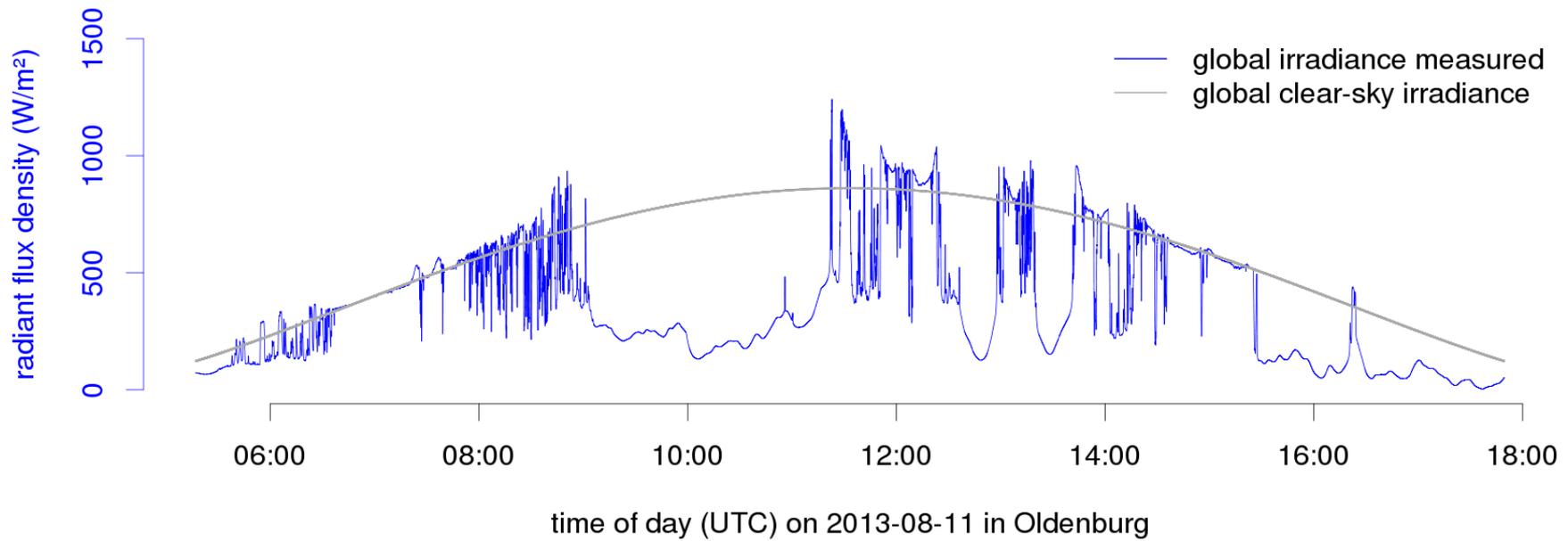
# Stochastische Modellierung

Tages- und Jahresgang erschweren die stochastische Analyse und Modellierung



# Stochastische Modellierung

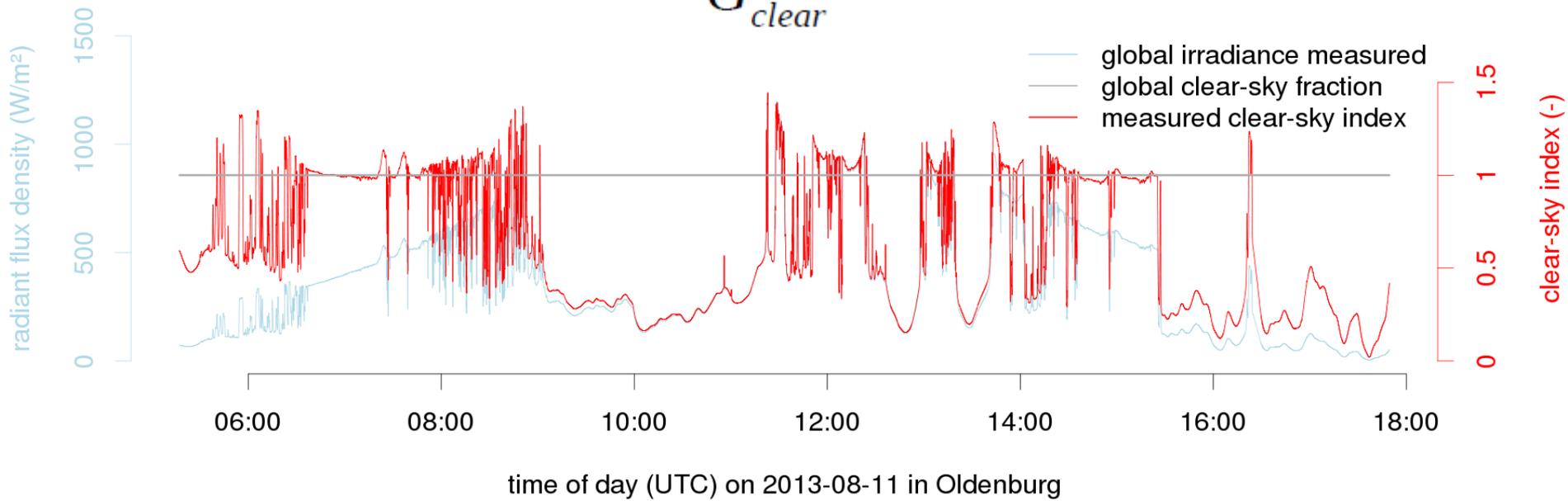
Trendbereinigung durch Normierung auf typische wolkenlose Einstrahlung



# Stochastische Modellierung

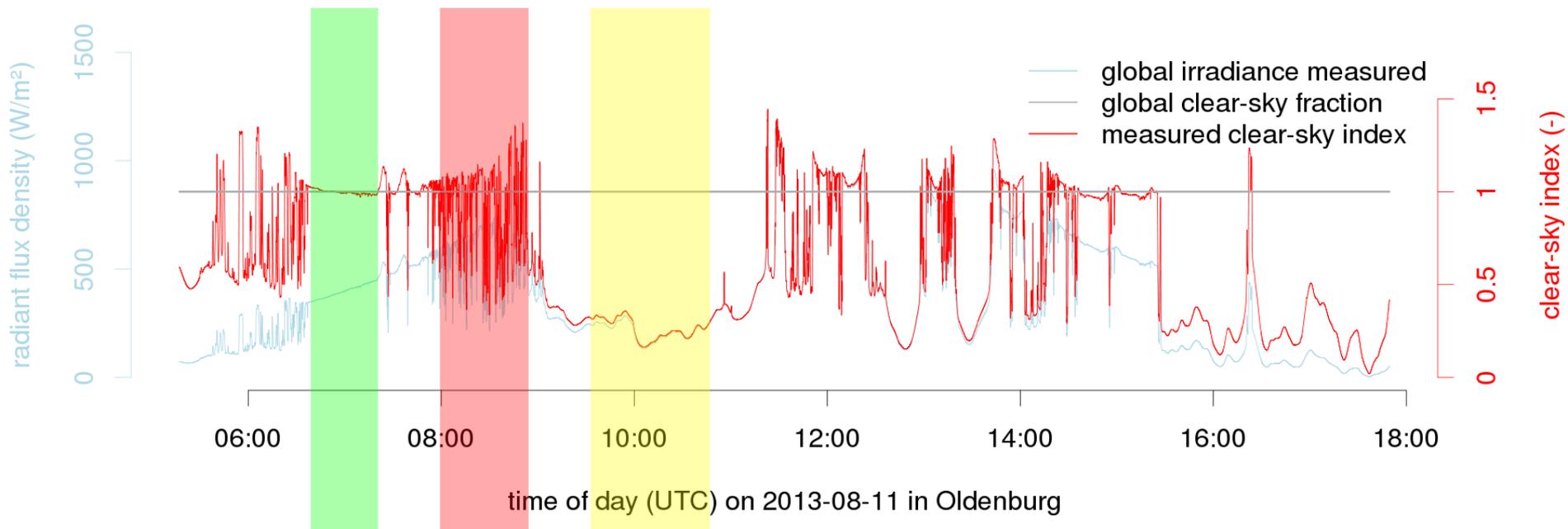
Das Verhältnis aus Globalstrahlung  $G$  und Clear-Sky Strahlung  $G_{\text{clear}}$  ergibt den Clear-Sky Index (dimensionslos)

$$k^* = \frac{G}{G_{\text{clear}}}$$



# Stochastische Modellierung

- Wolkenloser Himmel:  $k^* \approx 1$  (geringe Streuung)
- Durchbrochene Bewölkung:  $k^*$  fluktuierend (hohe Streuung)
- Bedeckter Himmel:  $k^* \ll 1$  (geringe Streuung)

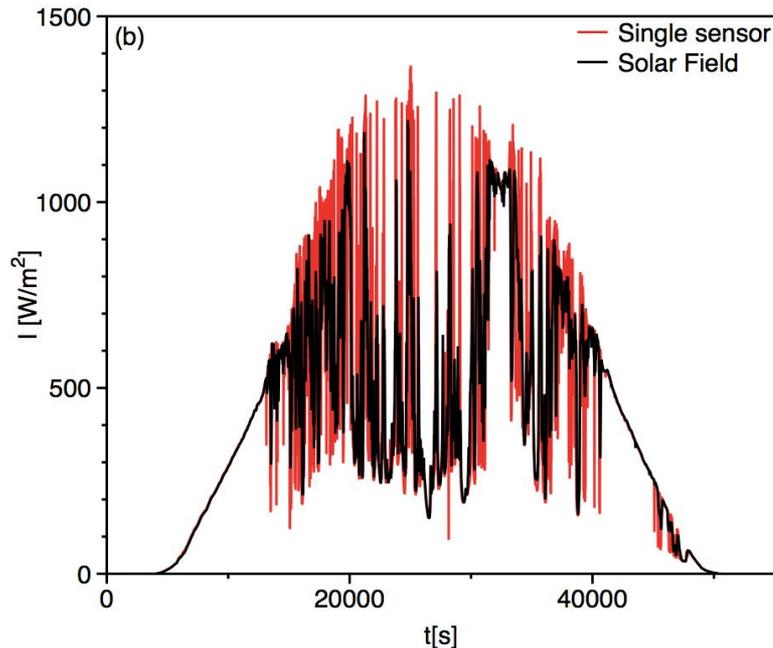


# Stochastische Modellierung

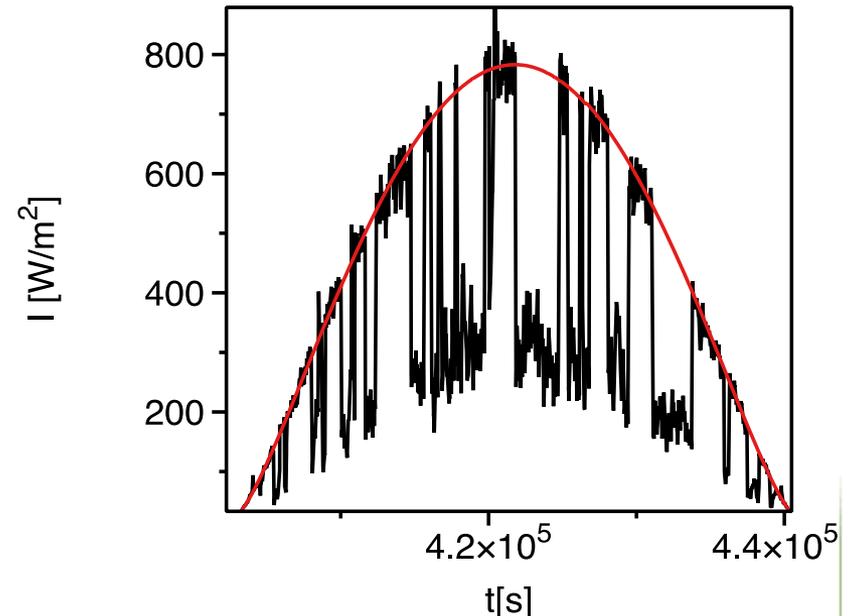
- Drift-Diffusion-Jump-Modell simuliert Fluktuationen im Clear-Sky Index

$$dx_t = \mu(x_t, t) dt + \sigma(x_t, t) dw_s + \zeta dJ_t$$

- Durch theoretischen Clear-Sky Strahlungsgang lässt sich ein natürlicher Verlauf (z. B. Tagesgang) rekonstruieren:



Messung von Globalstrahlung (hier: auf Hawaii)

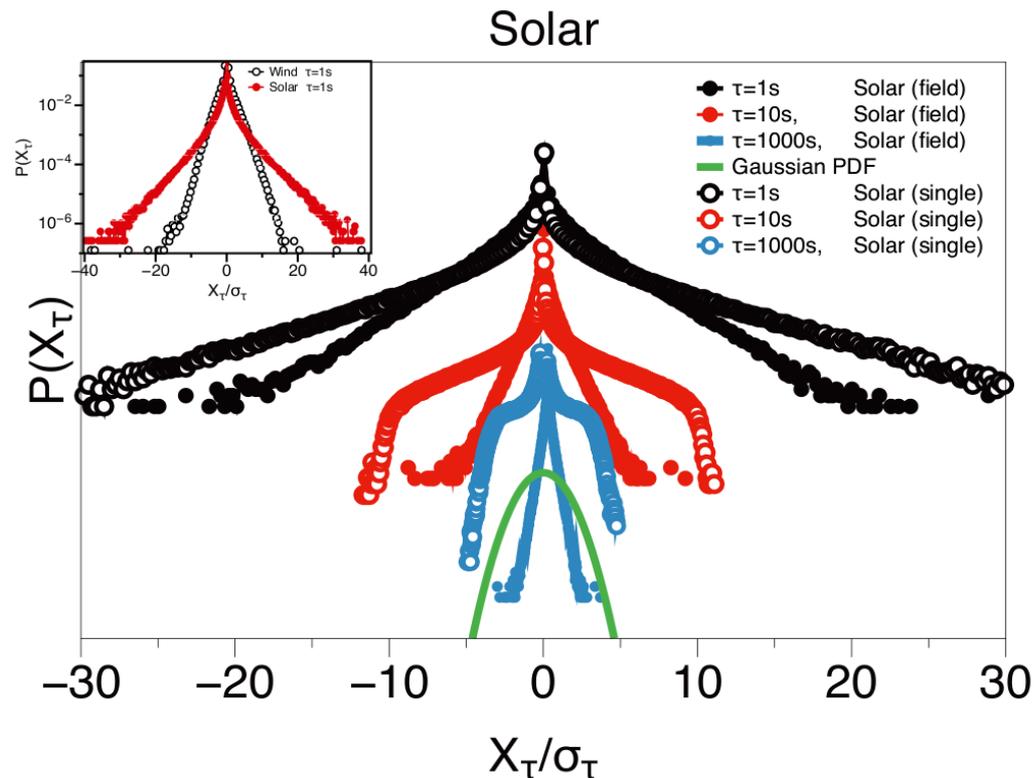


Simulation mit gleichen stochastischen Eigenschaften

# Methodik Fluktuationsanalyse

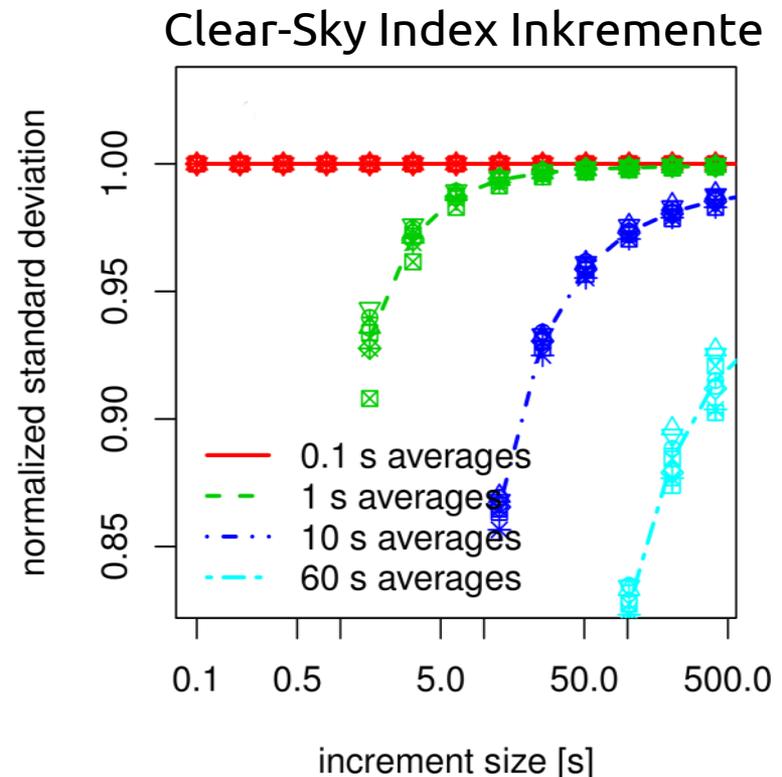
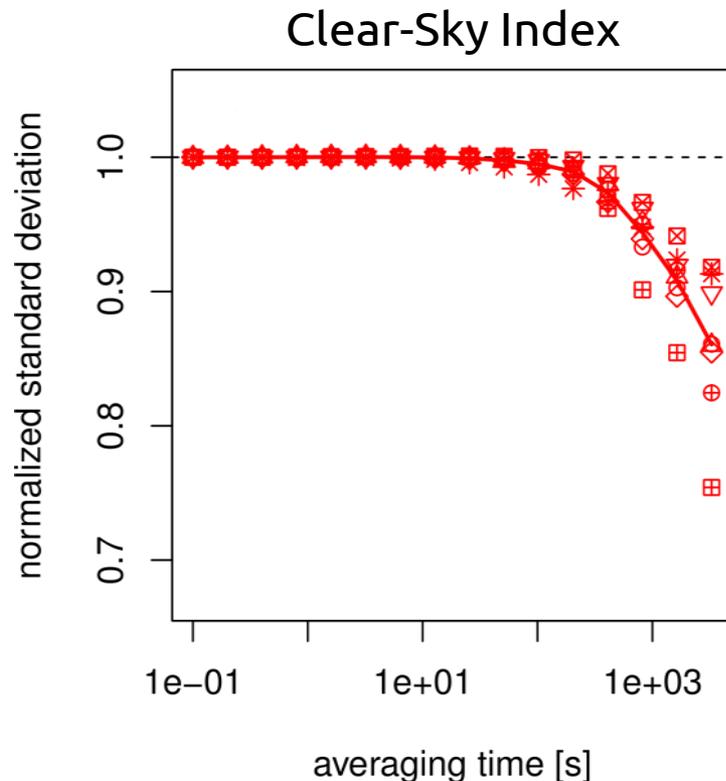
Inkrementstatistik: Schwankungen innerhalb eines Zeitintervalls  $\tau$

- $X_\tau = G(t + \tau) - G(t)$  mit Messwert *Globalstrahlung*
- sehr häufige Extremwerte im Vergleich zu Gauß-Verteilung!



# Methodik Fluktuationsanalyse

- Ergebnis: Hohe zeitliche Auflösung ist von größter Bedeutung
  - für Ressourcenanalyse genügen ca. Minutendaten
  - für Fluktuationsanalysen nicht! → mindestens 1 Hz



# Anwendung im Demonstrator

Parameter eines  
Ersatzelementes:

$$R_L = 0.206 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

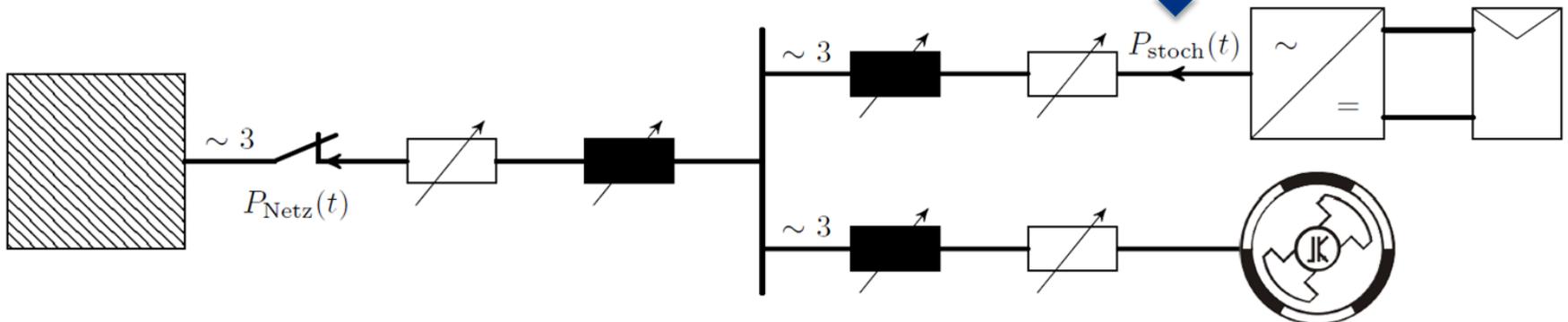
$$X_L = 0.067 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$l = 800 \text{ m}$$

Stochastische  
Differentialgleichung

$$dx_t = \mu(x_t, t) dt + \sigma(x_t, t) dw_s + \zeta dJ_t$$

Eingangs-  
größe



# Anwendung im Demonstrator

- Gezielte Veränderung von Parametern erzeugt verschiedene stochastische Eigenschaften in simulierter Zeitreihe

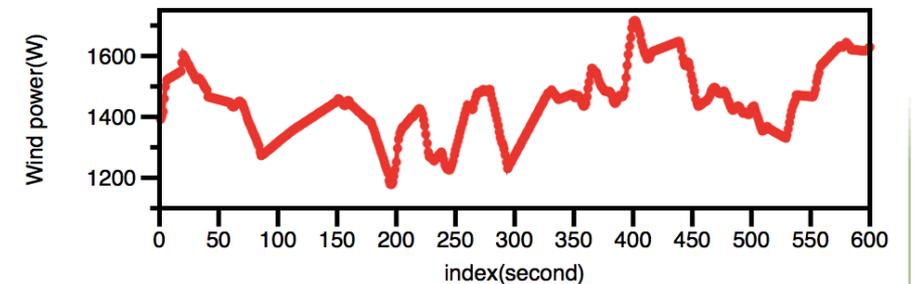
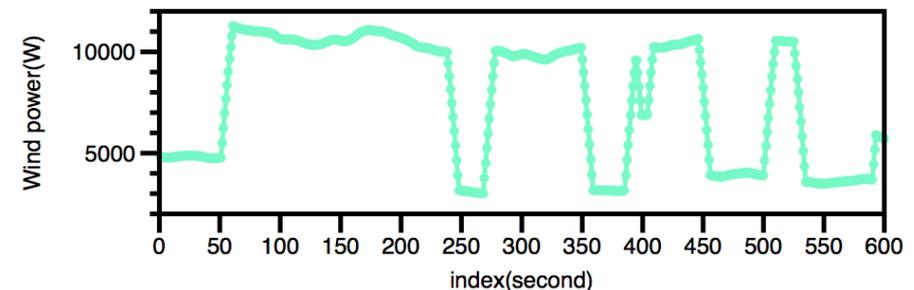
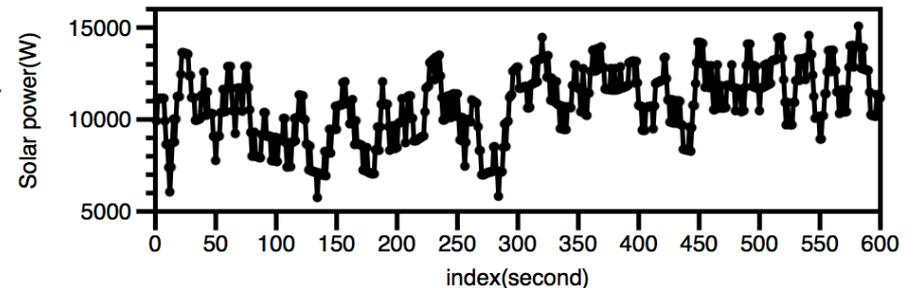
$$dx_t = \mu(x_t, t)dt + \sigma(x_t, t)dw_s + \zeta dJ_t$$

Eingangs-  
daten

Rauschen  
(zeitlich  
unkorreliert)

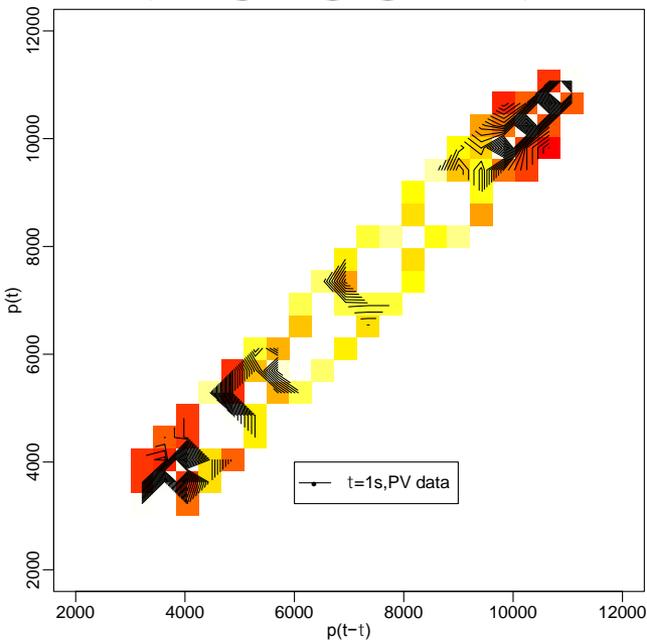
„Jump“

Diffusion (ohne  
„Jump“, zeitlich  
korreliert)

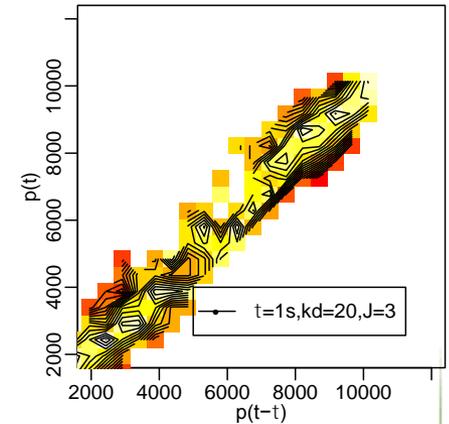
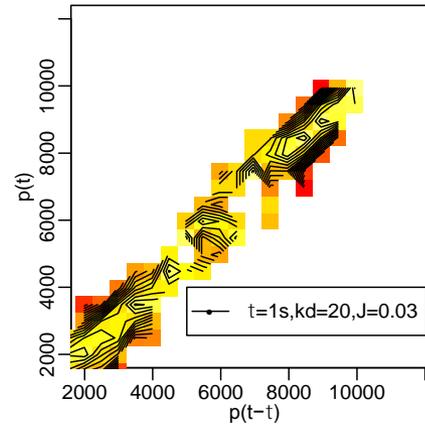
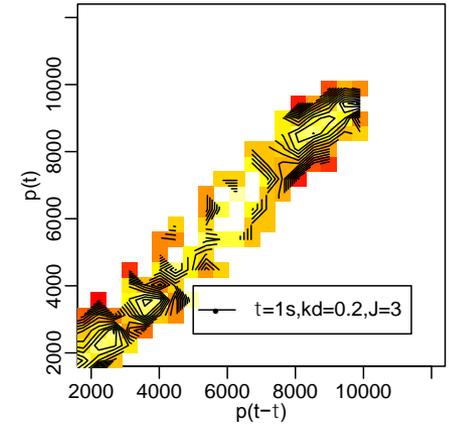
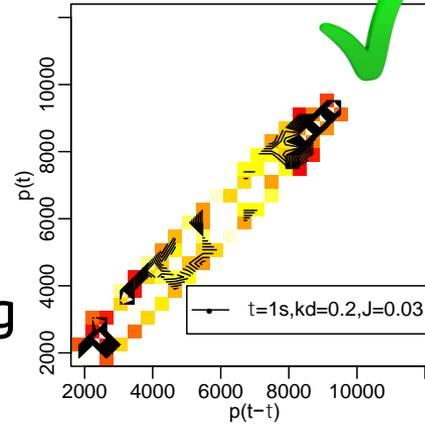


# Anwendung im Demonstrator

Jump  
(Eingangsgröße)



Wirkleistung  
am  
PCC



# Zusammenfassung AP5.2

- Reale Daten von Wind- und Photovoltaikanlagen (einzelne Anlagen, Parks) wurden auf kleiner Zeitskala gemessen und analysiert
- Verschiedene stochastische Charakteristiken in Erzeugungleistung wurden identifiziert und ein stochastisches Modell dafür wurde aufgestellt
- Verschiedene stochastische Eigenschaften können durch den Einsatz parametrierbarer Anlagen gezielt beeinflusst werden

# Zusammenfassung TP5

- Optimierung von Anlagen- und Regelungskonzepten, die sowohl netzparallel arbeiten, als auch stabile Inselnetzeigenschaften aufweisen
- Methodik zur Analyse der stochastischen Einspeisung aus Wind- und Photovoltaikanlagen, Erzeugung von parametrierbaren Einspeiseprofilen
- Methodik zur Untersuchung des Einflusses der Netztopologie auf die Robustheit des Gesamtsystems wurde entwickelt
- Aufbau einer flexiblen Demonstrationsanlage

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !**