



# Methoden und Forschungsschwerpunkte für eine sichere elektrische Energieversorgung

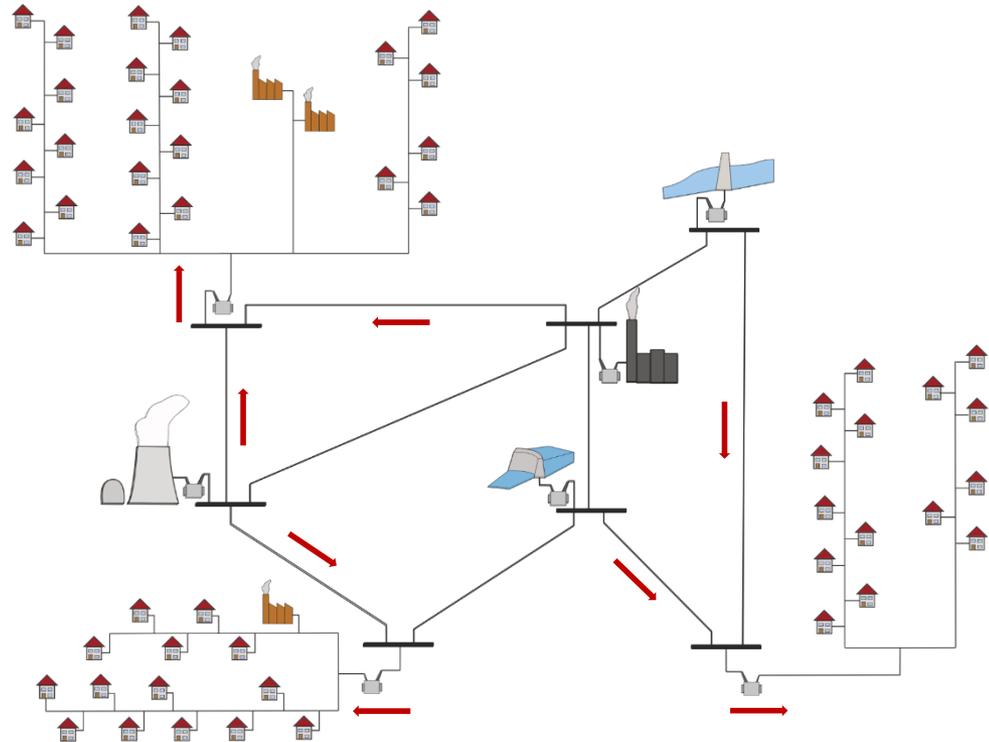
18. November 2016

Prof. Gabriela Hug, [ghug@ethz.ch](mailto:ghug@ethz.ch)

In Zusammenarbeit mit: Stavros Karagiannopoulos, Dinghuan Zhu, Larry Pileggi, Uros Markovic, Amritanshu Pandey, David Bromberg, Xin Li

# Einführung

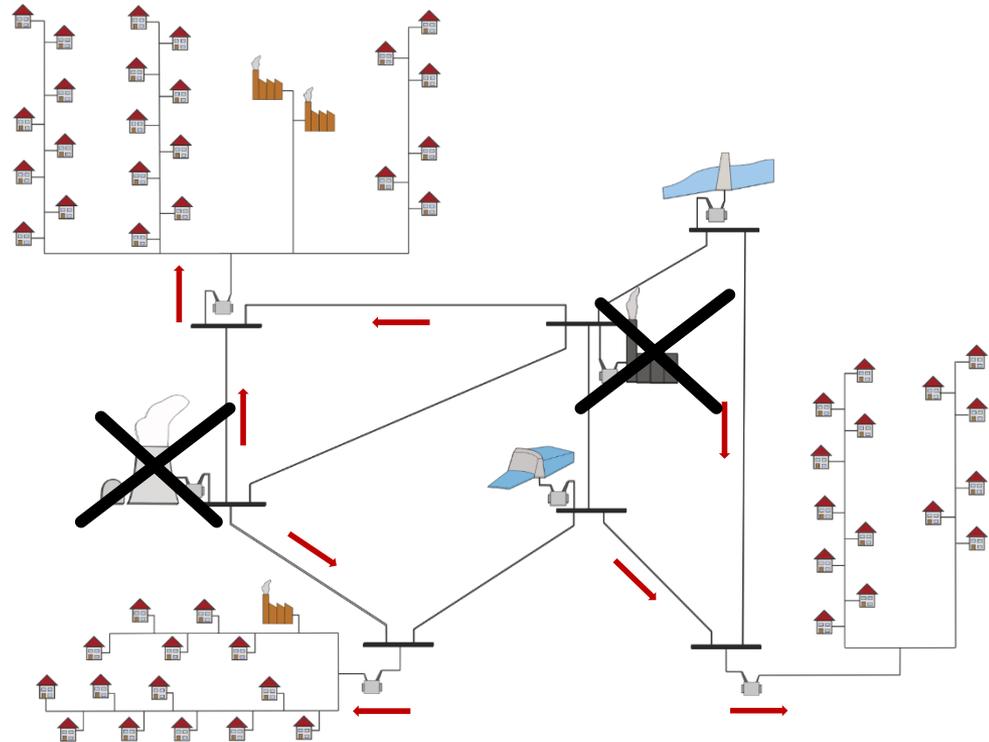
- Traditionelles elektrisches Netz
  - Abrufbare Grosserzeugung
  - Unflexible Lasten
  - Stromflussrichtung bekannt
  - Zentralisierte Überwachung und Steuerung



# Einführung

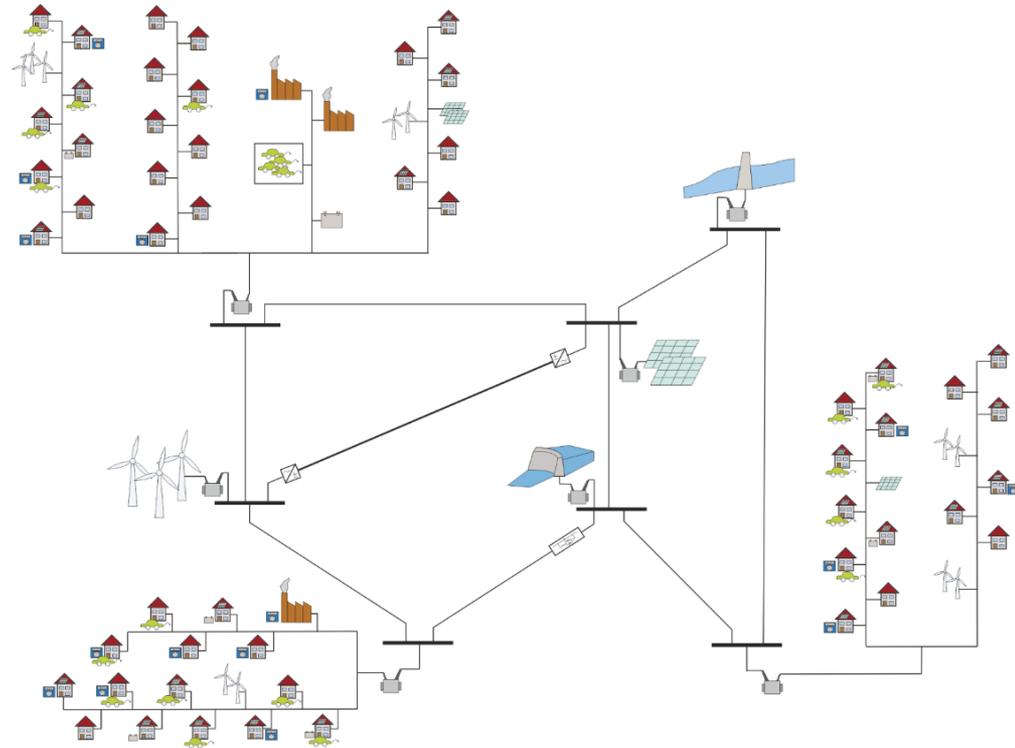
- Traditionelles elektrisches Netz
  - Abrufbare Grosserzeugung
  - Unflexible Lasten
  - Stromflussrichtung bekannt
  - Zentralisierte Überwachung und Steuerung

Ziel: Ersatz von Kernkraft und fossilen Energieträgern



# Einführung

- Zukünftiges elektrisches Netz
  - Verteilte Erzeugung und Speicherung
  - Flexible Lasten
  - Stromflussrichtung variabel
  - Variable/intermittierende erneuerbare Erzeugung
  - Lastflusssteuerung

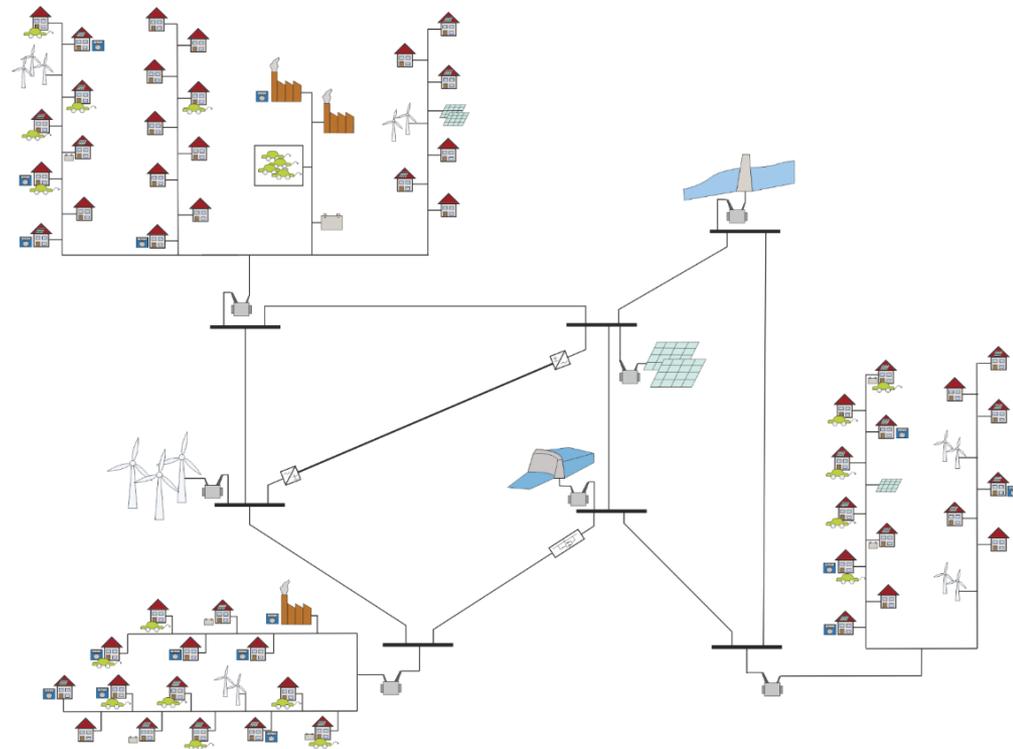


# Einführung

- Zukünftiges elektrisches Netz
  - Verteilte Erzeugung und Speicherung
  - Flexible Lasten
  - Stromflussrichtung variabel
  - Variable/intermittierende erneuerbare Erzeugung
  - Lastflusssteuerung

Mehr Variabilität und  
Unsicherheit, aber auch mehr  
Flexibilität

Tausende verteilte regelbare  
Größen



# Zentrale Fragestellungen

- Wie sieht die Struktur des zukünftigen Energieleitsystems aus (verteilt vs. zentral) so dass das Potenzial aller Ressourcen ausgenutzt wird?

# Zentrale Fragestellungen

- Wie sieht die Struktur des zukünftigen Energieleitsystems aus (verteilt vs. zentral) so dass das Potenzial aller Ressourcen ausgenutzt wird?
- Wie kann die Infrastruktur eines Systems mit einer solch grossen Anzahl an «beweglichen Teilen» und unsicheren Einspeisung effizient betrieben und geplant werden?

# Zentrale Fragestellungen

- Wie sieht die Struktur des zukünftigen Energieleitsystems aus (verteilt vs. zentral) so dass das Potenzial aller Ressourcen ausgenutzt wird?
- Wie kann die Infrastruktur eines Systems mit einer solch grossen Anzahl an «beweglichen Teilen» und unsicheren Einspeisung effizient betrieben und geplant werden?
- Welche Möglichkeiten bestehen von der methodischen Seite her Charakteristiken wie die Variabilität im Betrieb zu berücksichtigen?

# Zentrale Fragestellungen

- Wie sieht die Struktur des zukünftigen Energieleitsystems aus (verteilt vs. zentral) so dass das Potenzial aller Ressourcen ausgenutzt wird?
- Wie kann die Infrastruktur eines Systems mit einer solch grossen Anzahl an «beweglichen Teilen» und unsicheren Einspeisung effizient betrieben und geplant werden?
- Welche Möglichkeiten bestehen von der methodischen Seite her Charakteristiken wie die Variabilität im Betrieb zu berücksichtigen?
- Welche neuen Phänomene / Charakteristiken werden wir im Netz sehen und wie können diese simuliert und gehandhabt werden?

# Zentrale Fragestellungen

- Wie sieht die Struktur des zukünftigen Energieleitsystems aus (verteilt vs. zentral) so dass das Potenzial aller Ressourcen ausgenutzt wird?
- Wie kann die Infrastruktur eines Systems mit einer solch grossen Anzahl an «beweglichen Teilen» und unsicheren Einspeisung effizient betrieben und geplant werden?
- Welche Möglichkeiten bestehen von der methodischen Seite her Charakteristiken wie die Variabilität im Betrieb zu berücksichtigen?
- Welche neuen Phänomene / Charakteristiken werden wir im Netz sehen und wie können diese simuliert und gehandhabt werden?

# Planung und Betrieb des Verteilnetzes

- Passiver Verteilnetzbetreiber
  - Maximale Last = benötigte Kapazität von Leitungen und Transformatoren
- Aktiver Verteilnetzbetreiber
  - Miteinbezug der Möglichkeiten für Lasten- und Einspeiseregulierung (Wirk- und Blindleistung) und lokale Speicher
  - ⇒ Abwägung von Netzausbau gegenüber aktiven Regelmethode

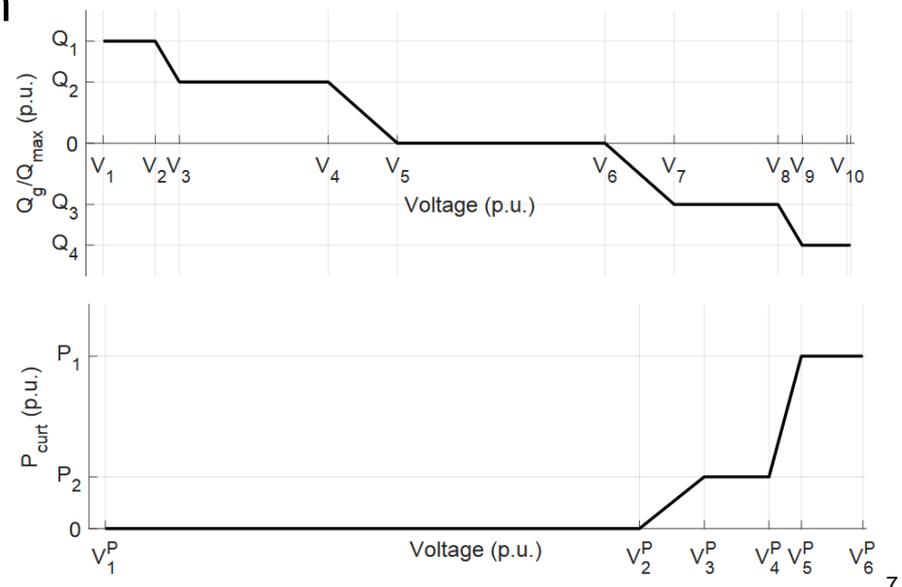
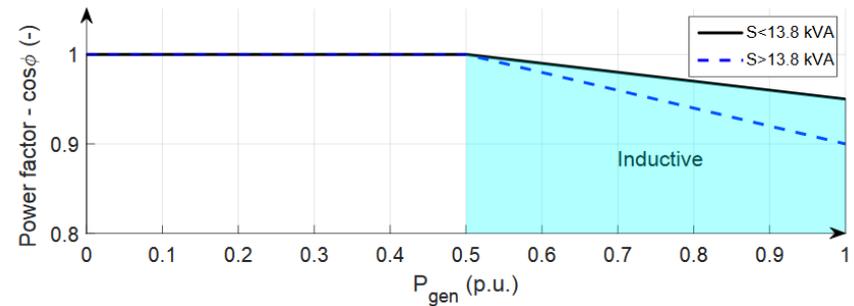
- Projekt:  smart planning

- Partner:



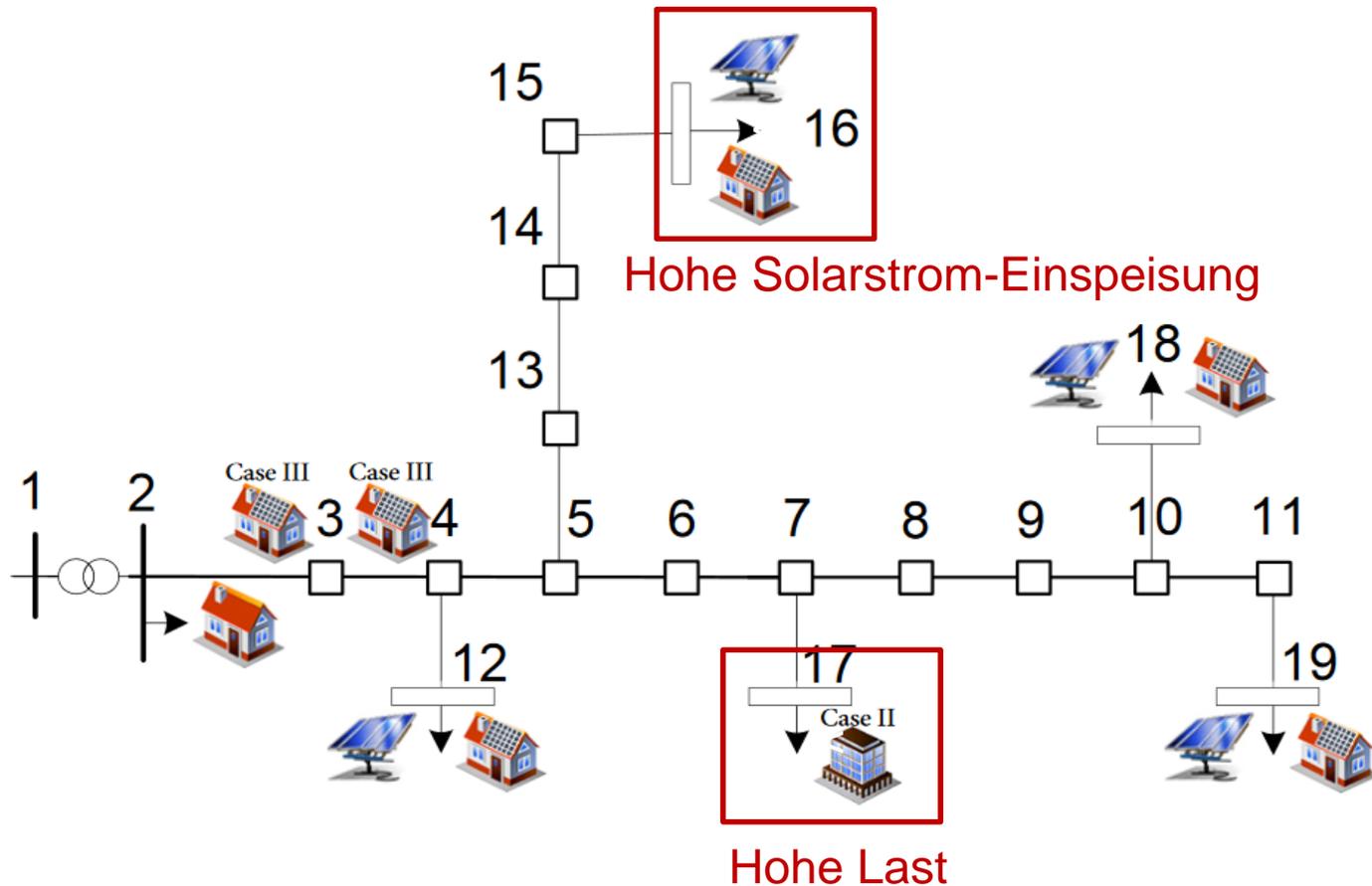
# Betrieb von Solarstrom im Verteilnetz

- Momentane Regelein-  
stellungen verteilter  
Erzeuger
  - Einfach, können aber  
kontraproduktiv sein
- Zentrale Optimierung
  - Optimale Koordinierung jedoch  
komplex insbesondere in  
Echtzeit
- Koordinierte lokale  
Einstellungen
  - Bestimmung der Kurven  
basierend auf offline OPF  
Berechnungen



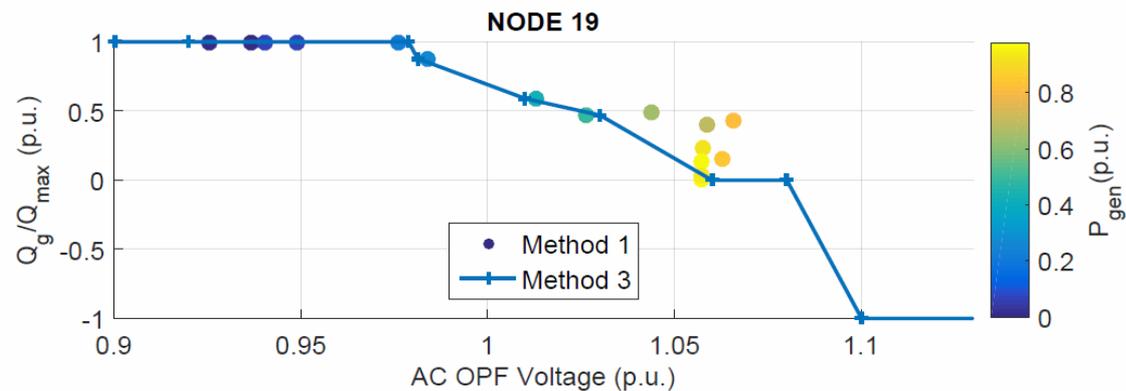
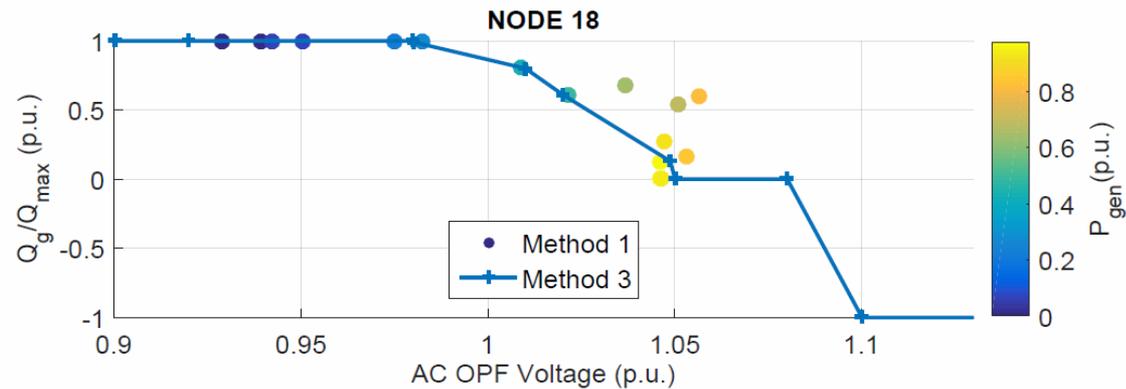
# Betrieb von Solarstrom im Verteilnetz

- Motivationsbeispiel



# Betrieb von Solarstrom im Verteilnetz

- Betriebskurven basierend auf AC OPF



# Betrieb von Solarstrom im Verteilnetz

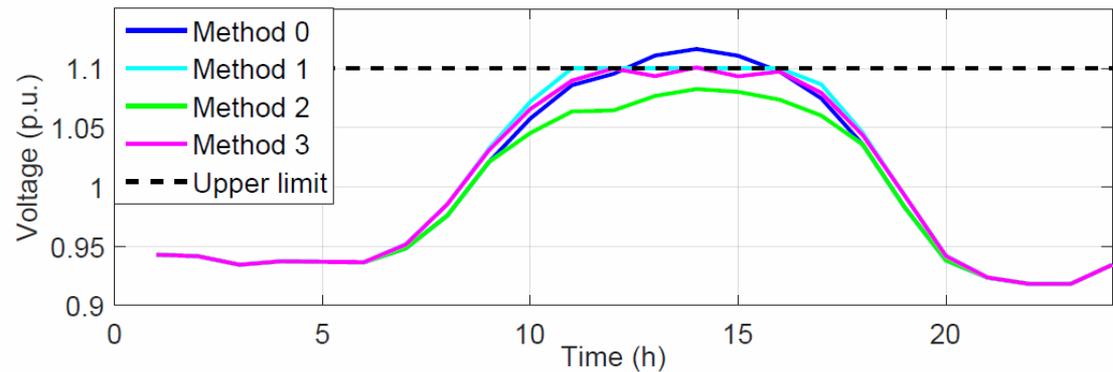
## Resultierende Spannungen

Method 0: Lastfluss,  $pf = 1$

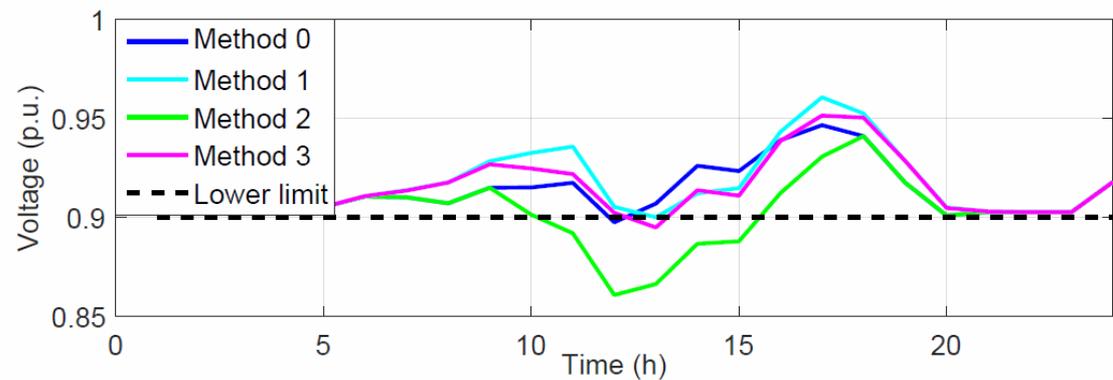
Method 1: Zentraler AC  
OPF mit  
Blindleistungsregelung

Method 2: Lastfluss,  
Deutsche Norm

Method 3: Lastfluss mit  
berechneten Kurven



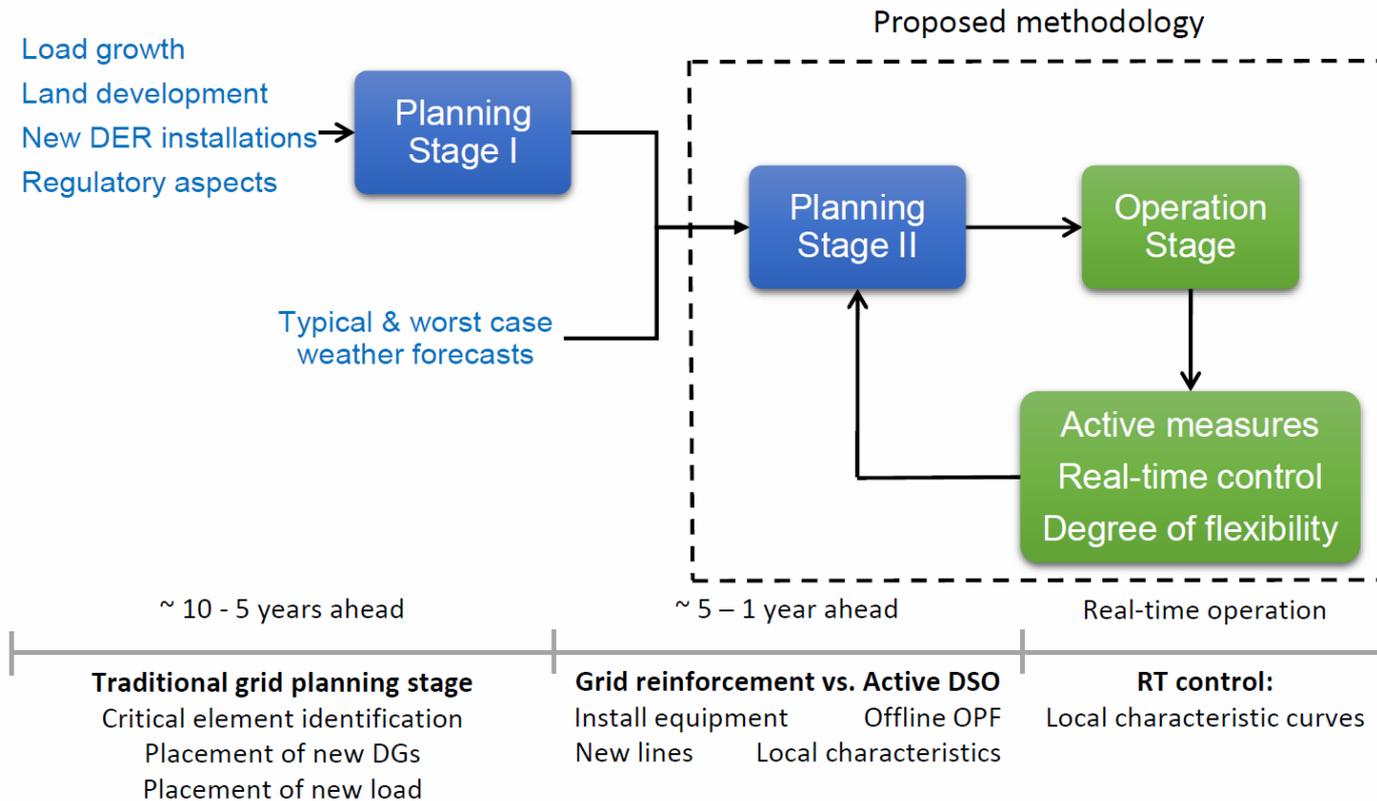
(a)



(b)

# Planung und Betrieb des Verteilnetzes

- Planungsansatz



# Planung und Betrieb des Verteilnetzes

- Schlussfolgerungen
    - Lokale aber «custom designed» und koordinierte betriebliche Massnahmen können Lösungen zu lokalen Problemen sein
    - Betrieb hat Einfluss darauf wie Netz ausgebaut werden sollte
- ⇒ **Fokus weiterer Forschung: Einbezug des Betriebs inklusive Lastenregelung in die Verteilnetzplanung**

# Zentrale Fragestellungen

- Wie sieht die Struktur des zukünftigen Energieleitsystems aus (verteilt vs. zentral) so dass das Potenzial aller Ressourcen ausgenutzt wird?
- Wie kann die Infrastruktur eines Systems mit einer solch grossen Anzahl an «beweglichen Teilen» und unsicheren Einspeisung effizient betrieben und geplant werden?
- Welche Möglichkeiten bestehen von der methodischen Seite her Charakteristiken wie die Variabilität im Betrieb zu berücksichtigen?
- Welche neuen Phänomene / Charakteristiken werden wir im Netz sehen und wie können diese simuliert und gehandhabt werden?

# Stochastische Einspeisung

- Wind- und Solarenergie
  - nur limitiert regelbar
  - variabel und intermittierend (kurz- und langfristig)
  - mögliche grosse Einspeise-Änderungen in kurzer Zeit
  - nur mit Ungenauigkeit vorhersehbar
- Mögliche Kompensation durch
  - abrufbare Erzeugung
  - Speicher
  - Lastenregelung

# Stochastische Einspeisung

- Wind- und Solarenergie
  - nur limitiert regelbar
  - variabel und intermittierend (kurz- und langfristig)
  - mögliche grosse Einspeise-Änderungen in kurzer Zeit
  - nur mit Ungenauigkeit vorhersehbar
- Mögliche Kompensation durch
  - abrufbare Erzeugung
  - Speicher
  - Lastenregelung

# Stochastische Einspeisung

- Wind- und Solarenergie
  - nur limitiert regelbar
  - variabel und intermittierend (kurz- und langfristig)
  - mögliche grosse Einspeise-Änderungen in kurzer Zeit
  - nur mit Ungenauigkeit vorhersehbar
- Mögliche Kompensation durch
  - abrufbare Erzeugung
  - Speicher
  - Lastenregelung

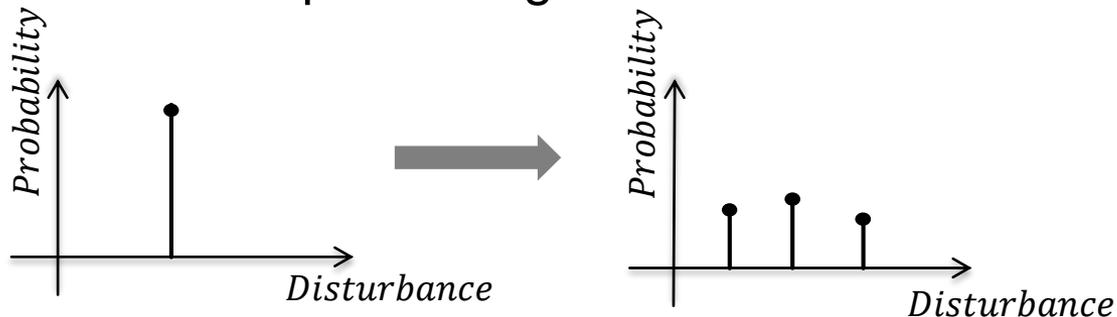
Für optimale Betriebsführung und Planung sollten diese Unsicherheiten explizit miteinbezogen werden!

# Lösungsansätze

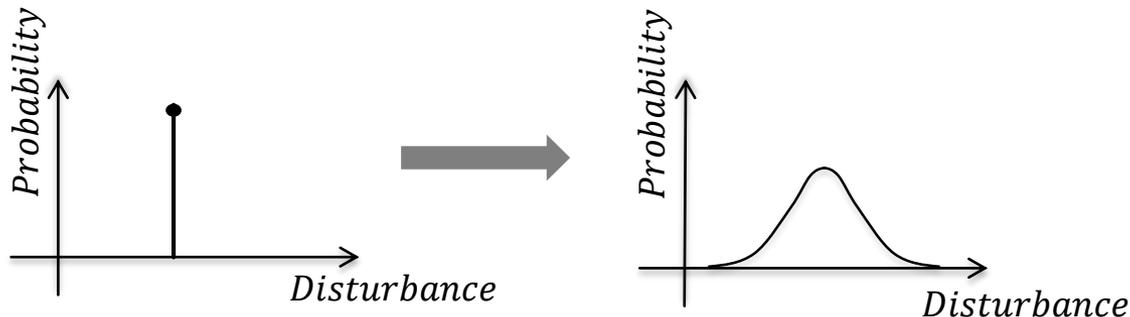
- Traditioneller Ansatz
  - Vorhersage von Netto-Last
  - Deterministische Optimierung von Kraftwerksfahrplan basierend auf diesen Vorhersagen
  - Bereitstellung von Reserven
- Stochastische Optimierung
  - Explizite Integration von Unsicherheit in die Kraftwerksfahrplan-Bestimmung
  - Rechnerisch anspruchsvoll
  - «Hedging» gegen schlechte Vorhersagen

# Stochastische Optimierung

- Szenarien basierte Ansätze
  - Bestimmung von möglichen Szenarien für variable Erzeugung
  - Deterministische Optimierung über diese Szenarien



- Probabilistische Ungleichungen
  - Erfüllung der Ungleichung mit Wahrscheinlichkeit  $\beta$  basierend auf gegebener Wahrscheinlichkeitsverteilung



# Stochastische Optimierung

- Szenarien basierte Ansätze
  - Bestimmung von möglichen Szenarien für variable Erzeugung
  - Deterministische Optimierung über diese Szenarien

$$\min E(f(x_s)) = \sum_{s=1}^S p_s \cdot f(x_s)$$

$$\text{s. t. } g_s(x_s) = 0, s = 1, \dots, S$$

$$h_s(x_s) \leq 0, s = 1, \dots, S$$

- Probabilistische Ungleichungen
  - Erfüllung der Ungleichung mit Wahrscheinlichkeit  $\beta$  basierend auf gegebener Wahrscheinlichkeitsverteilung

$$\min f(x)$$

$$\text{s. t. } g(x) = 0$$

$$h(x) \leq 0$$

$$\Pr\{p(x, \xi) \leq 0\} \geq \beta$$

# Stochastische Optimierung

- Szenarien basierte Ansätze
  - Bestimmung von möglichen Szenarien für variable Erzeugung
  - Deterministische Optimierung über diese Szenarien

$$\min E(f(x_s)) = \sum_{s=1}^S p_s \cdot f(x_s)$$

$$\text{s. t. } g_s(x_s) = 0, s = 1, \dots, S$$

$$h_s(x_s) \leq 0, s = 1, \dots, S$$

- Probabilistische Ungleichungen
  - Erfüllung der Ungleichung mit Wahrscheinlichkeit  $\beta$  basierend auf gegebener Wahrscheinlichkeitsverteilung

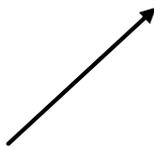
$$\min f(x)$$

$$\text{s. t. } g(x) = 0$$

$$h(x) \leq 0$$

$$\Pr\{p(x, \xi) \leq 0\} \geq \beta$$

$\Pr(p(x, \xi) \leq 0) = \Phi_p(0) \geq \beta$



# Stochastische Optimierung

- Szenarien basierte Ansätze
  - Bestimmung von möglichen Szenarien für variable Erzeugung
  - Deterministische Optimierung über diese Szenarien

$$\min E(f(x_s)) = \sum_{s=1}^S p_s \cdot f(x_s)$$

$$\text{s. t. } g_s(x_s) = 0, s = 1, \dots, S$$

$$h_s(x_s) \leq 0, s = 1, \dots, S$$

- Probabilistische Ungleichungen

- Erfüllung der Ungleichung mit Wahrscheinlichkeit  $\beta$  basierend auf gegebener Wahrscheinlichkeitsverteilung

$$\min f(x)$$

$$\text{s. t. } g(x) = 0$$

$$h(x) \leq 0$$

$$\Pr\{p(x, \xi) \leq 0\} \geq \beta$$

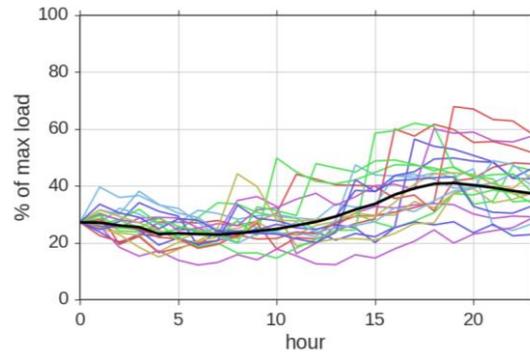
$$\Pr(p(x, \xi) \leq 0) = \Phi_p(0) \geq \beta$$

Im Falle einer Normalverteilung:

$$\left( \frac{0 - \mu'}{\sigma'} \right) \geq \Phi^{-1}(\beta)$$

# Szenarien basierter Ansatz

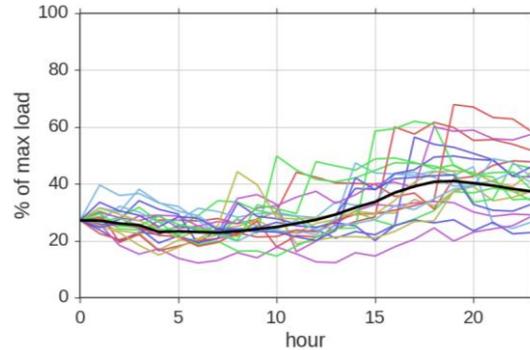
- Stochastisches Model Predictive Control
  - Szenarien



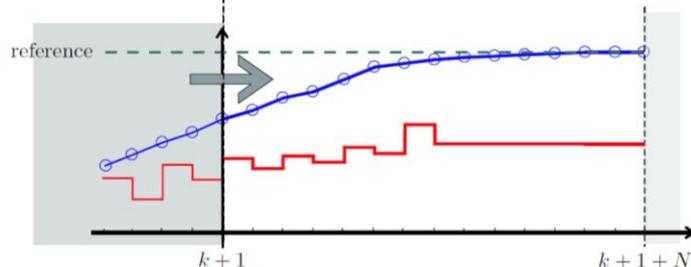
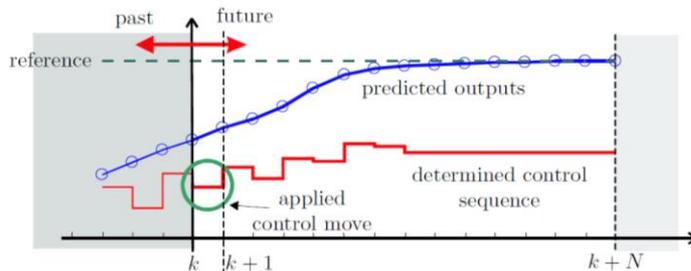
# Szenarien basierter Ansatz

- Stochastisches Model Predictive Control

- Szenarien



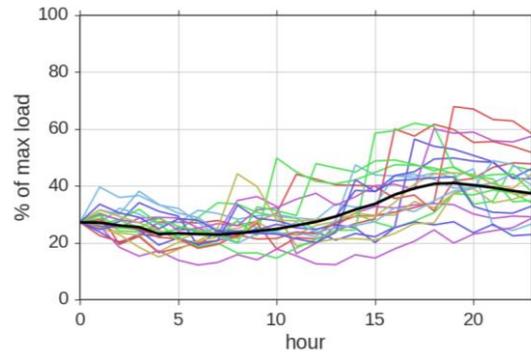
- Optimierungsproblem



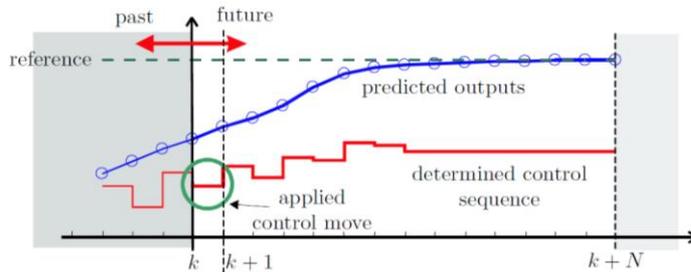
# Szenarien basierter Ansatz

- Stochastisches Model Predictive Control

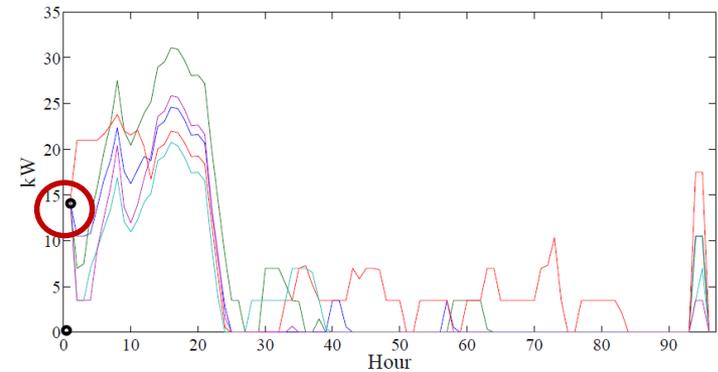
- Szenarien



- Optimierungsproblem



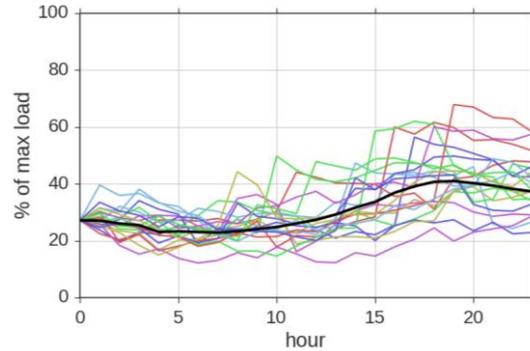
Mehrere Szenarien



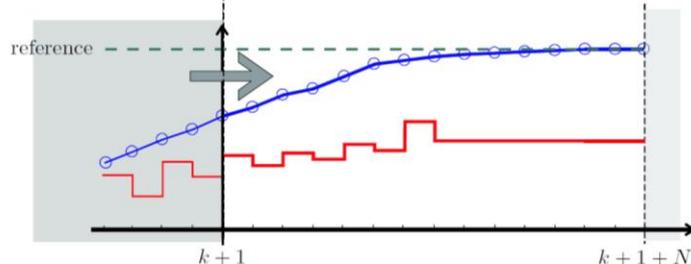
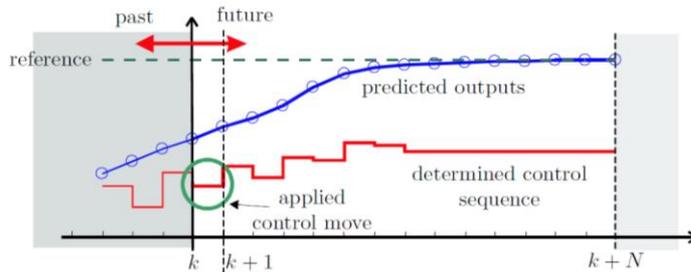
# Szenarien basierter Ansatz

- Stochastisches Model Predictive Control

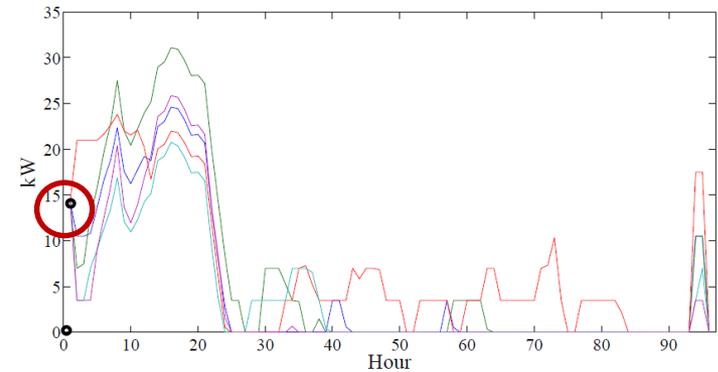
- Szenarien



- Optimierungsproblem



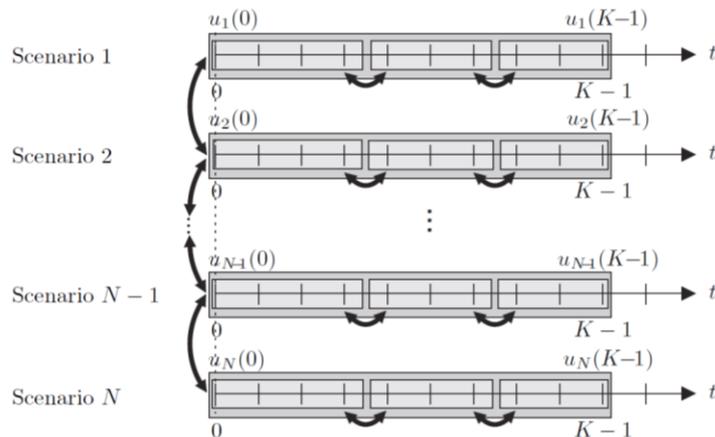
Mehrere Szenarien



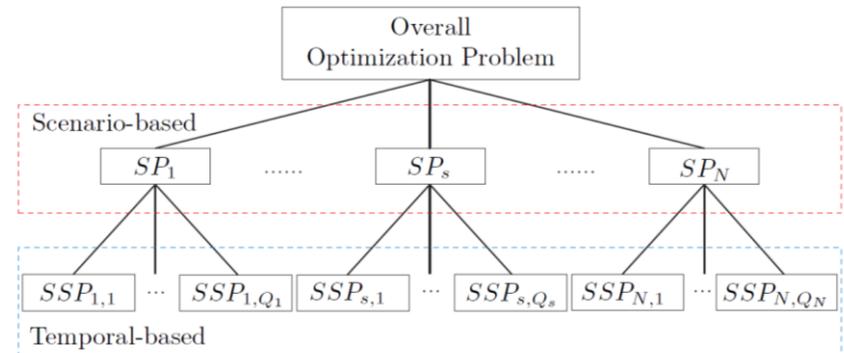
Grosses Optimierungsproblem!

# Szenarien basierter Ansatz

- Möglichkeiten für parallelisierte Berechnung
  - Szenario basierte Parallelisierung
  - Zeitlich unterteilte Parallelisierung



- Scenario-based Decomposition
- Temporal-based Decomposition
- ↪ Complicating Constraints



# Szenarien basierter Ansatz

- Beispiel
  - Optimierter Betrieb von Speicher
  - Szenarien entsprechen zeitlichen Produktionskurven von Windanlagen (40 Szenarien)
  - 39 Bus System, 4 Stunden Horizont mit 5 minütiger Auflösung
  
- Resultate

Cases	Total # of Major Iter.	Total # of Minor Iter.	Total # of GMRES Iter.	Wall Time in sec.	Est. Time in sec. for Par. Computing
BF	262	-	-	1,864.32	1,864.32
BD	3	12,720	-	2,856.07	57.12
OCD	234	-	1,780	1,901.33	38.03
2OCD	193	-	20,159	8,079.91	53.87
MD	3	14,848	110,802	3,228.37	10.76

Parallelisierung  
Szenarien

Parallelisierung Szenarien  
und Zeitabschnitte

# Stochastische Optimierung

- Schlussfolgerungen
    - Neue Formulierungen und numerische Ansätze ermöglichen den Einbezug von Unsicherheiten in Optimierungsprobleme
    - Wird in einigen Realisierungen der stochastischen Variable schlechter abschneiden, ist aber im Durchschnitt besser gewappnet gegen unsichere Vorhersagen
- ⇒ **Fokus weiterer Forschung: Effiziente Methoden die nicht auf Szenarien beruhen sondern auf sogenannten «noisy gradients»**

# Zentrale Fragestellungen

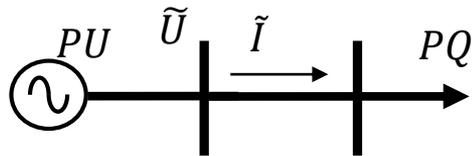
- Wie sieht die Struktur des zukünftigen Energieleitsystems aus (verteilt vs. zentral) so dass das Potenzial aller Ressourcen ausgenutzt wird?
- Wie kann die Infrastruktur eines Systems mit einer solch grossen Anzahl an «beweglichen Teilen» und unsicheren Einspeisung effizient betrieben und geplant werden?
- Welche Möglichkeiten bestehen von der methodischen Seite her Charakteristiken wie die Variabilität im Betrieb zu berücksichtigen?
- Welche neuen Phänomene / Charakteristiken werden wir im Netz sehen und wie können diese simuliert und gehandhabt werden?

# Simulation des Elektrischen Netzes

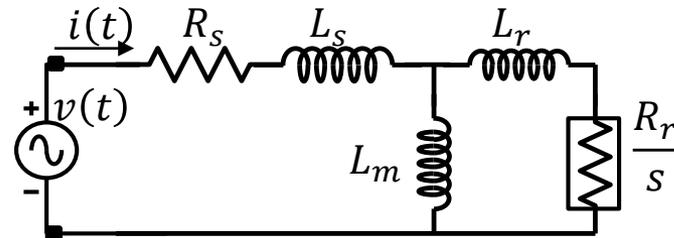
- Motivation

- Lastflussmethoden basieren auf Wirk- und Blindleistungsmodellen ( $P$  und  $Q$ ), transiente Simulationen werden jedoch wie Simulationen von elektrischen Schaltungen in Form von Strömen und Spannungen gemacht ( $I$  und  $U$ )

⇒ Endresultate stimmen nicht überein



vs.



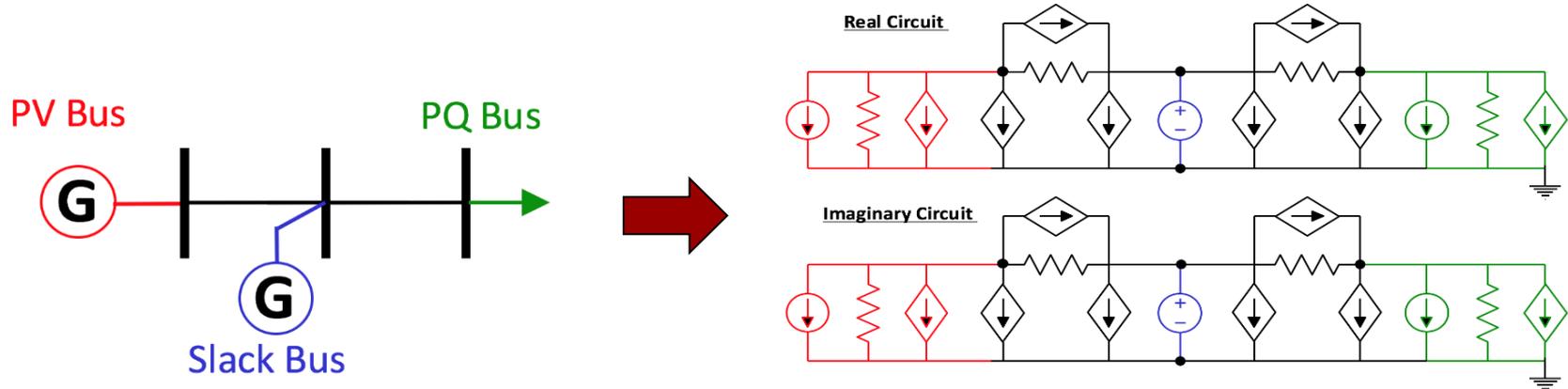
- Vermehrt Leistungselektronische Komponenten im elektrischen Energienetz => entsprechen elektrischen Schaltungen
  - Messungen im elektrischen Netz werden basierend auf Strömen und Spannungen gemacht

# Simulation des Elektrischen Netzes

- Was können wir erreichen, wenn wir die gesamte Modellierung in Funktion von Strom und Spannung machen?
    - Anwendung von Jahrzehnte langer Forschung in Simulation von elektrischen Netzen (SPICE)
    - Lastmodellierung näher an tatsächlicher Lastcharakteristik
    - Effiziente und genaue Simulation von neuen Technologien die auf Leistungselektronik beruhen
- ⇒ Hindernis das eine solche Formulierung bisher schwierig machte, waren die PU Knoten

# Simulation des Elektrischen Netzes

- Split-Circuit Ansatz
  - Modellierung der Lastflussgleichungen als gekoppelte elektrische Schaltungen
  - Beliebige Physik basierte Modelle können integriert werden
  - Sehr robust insbesondere in Bezug auf Startwerte

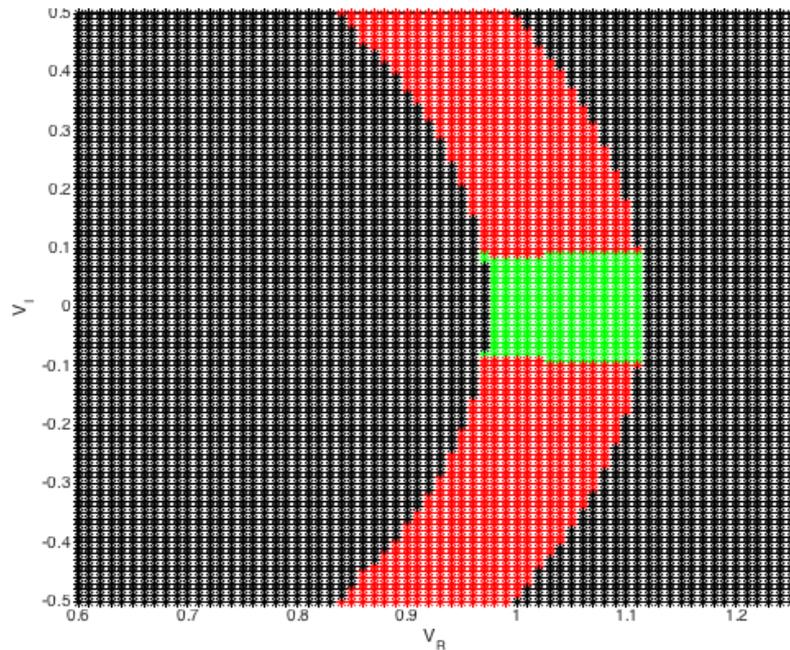


PCT/US2015/049700 – Systems, Methods and Software for Planning, Simulating and Operating Electrical Power Systems, Pileggi, Bromberg, Li, Hug and Jereminov. **Patent Pending.**

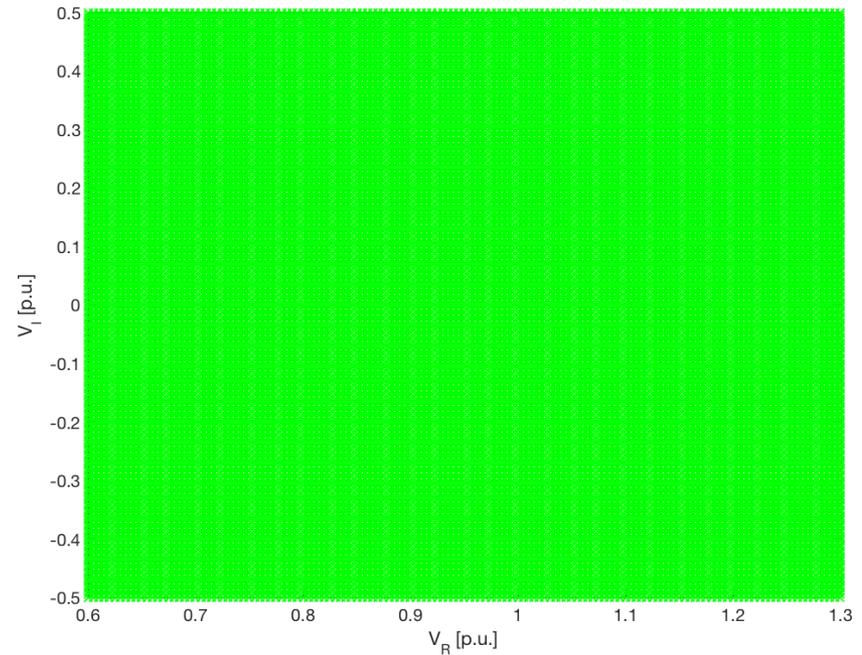
# Simulation des Elektrischen Netzes

- Robust in Bezug auf Startpunkt

Konvergenz für 9241 Bus System mit  
weit verbreiteter Software

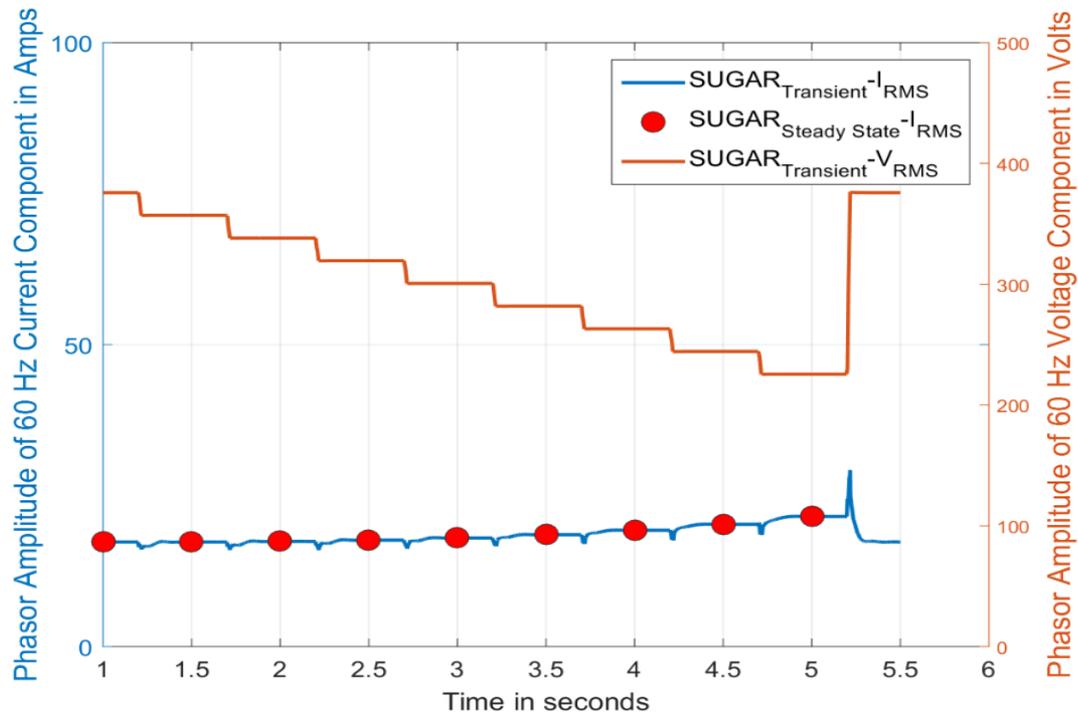


Konvergenz für 9241 Bus System mit  
SUGAR



# Simulation des Elektrischen Netzes

- Einheitliche Resultate
  - Transiente und Stationäre Simulationen zeigen einheitliche Resultate



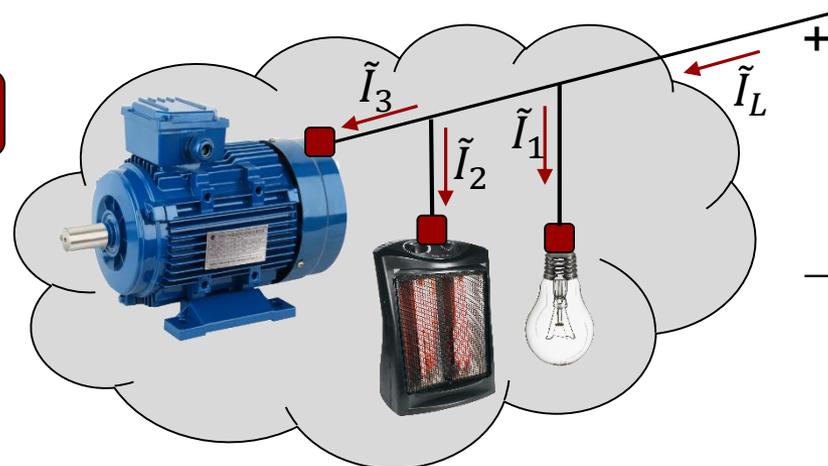
# Simulation des Elektrischen Netzes

- Formulierung erlaubt direkte Integration sowohl von Top-Down wie auch von Bottom-Up Modellen
  - Top-Down: basierend auf Messungen und historischer Information
  - Bottom-Up: basierend auf physikalischen Gleichungen

TOP-DOWN



BOTTOM-UP



# Simulation des Elektrischen Netzes

- Schlussfolgerungen
  - Neue Technologien benötigen neue Modellierungs- und Simulationsansätze um deren Charakteristiken akkurat abzubilden
  - Simulationssoftware wie SUGAR erlauben effiziente und akkurate Simulation der zukünftigen Netze

⇒ **Fokus weiterer Forschung: Erweiterung auf andere Anwendungen inklusive Optimierung**

# Fazit

- **Prämisse**
  - Kernkraft und fossile Energieträger im elektrischen Netz werden durch erneuerbare Energieträger (Wind, Solar) ersetzt
- **Schlussfolgerungen**
  - Neue mathematische Ansätze und Methoden werden benötigt, um steigende Anzahl von variablen erneuerbaren Energieerzeugern zuverlässig ins Netz einbinden zu können
  - Effiziente Koordination von allen «Teilnehmern» im Netz in Betrieb und Planung notwendig, um alle technischen Möglichkeiten voll auszunutzen
  - Betrachtung des elektrischen Netzes als ganzheitliches System äusserst wichtig

**Danke für die Aufmerksamkeit!**