

MODELLE ZUR ANALYSE DES FREQUENZVERHALTENS AUSGEDEHNTER ÜBERTRAGUNGSSYSTEME

Denis Mende¹, Holger Becker¹, Walter Schitteck¹, David Sebastian Stock¹, Lutz Hofmann^{1,2}



Session D4:
MODELLE UND METHODEN

15.02.2018
16:30-18:30 Uhr
Raum I11

¹ Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE

Königstor 59
34119 Kassel

www.iee.fraunhofer.de



² Leibniz Universität Hannover
Institut für Elektrische Energiesysteme

Appelstrasse 9A
30167 Hannover

www.ifes.uni-hannover.de



INHALT

1 Einleitung & Motivation

2 Etablierter Ansatz aggregierte Bilanzmodelle

3 Ansätze zur Erweiterung der Modelle

4 Fazit & Ausblick

Inhalt

1 Einleitung & Motivation

2 Etablierter Ansatz aggregierte Bilanzmodelle

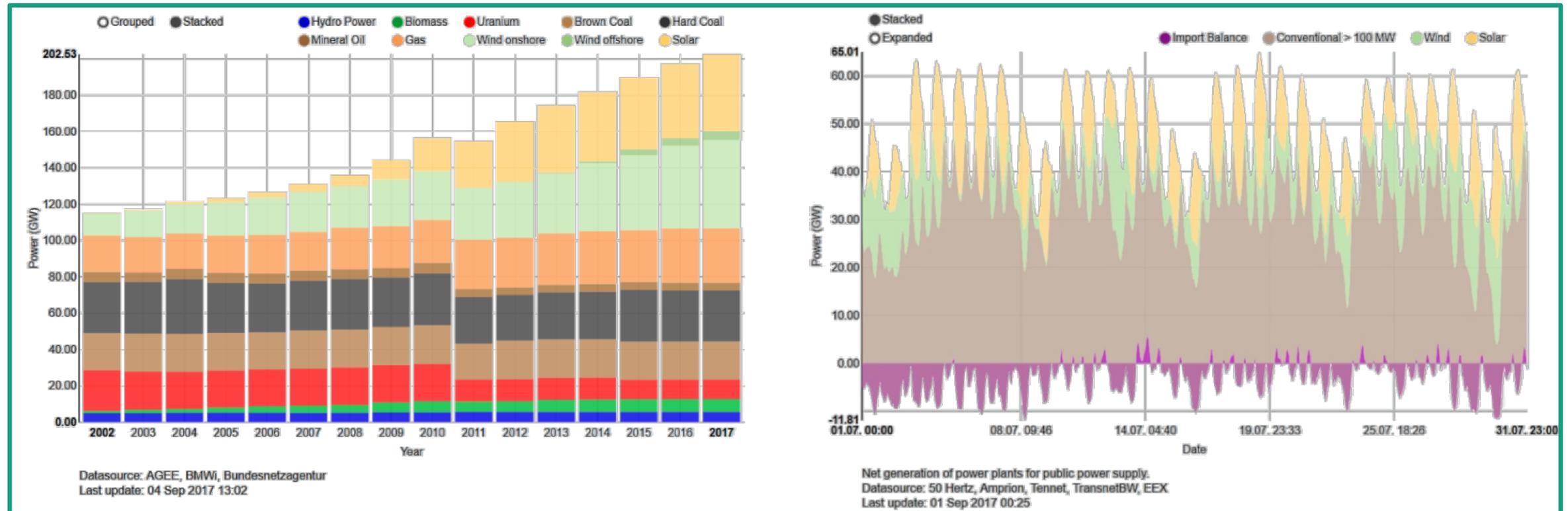
3 Ansätze zur Erweiterung der Modelle

4 Fazit & Ausblick

Einleitung & Motivation

Grundlegende Änderungen in Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur

- Stark variierende Zusammensetzung der Erzeugungskapazitäten (kurz- und langfristig)
- Tendenzielle abnehmender Anteil rotierender Massen im System



► Steigender Einfluss auf Frequenzverhalten sowie die Frequenz-/Wirkleistungsregelung

Quelle: <https://www.energy-charts.de>. Zugriff: 25. September 2017.

Inhalt

1 Einleitung & Motivation

2 Etablierter Ansatz aggregierte Bilanzmodelle

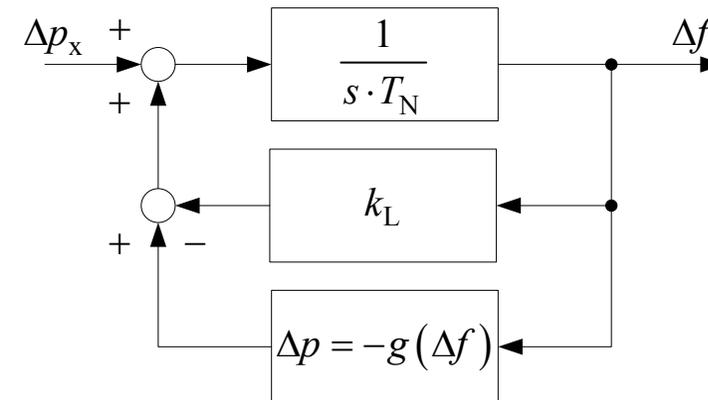
3 Ansätze zur Erweiterung der Modelle

4 Fazit & Ausblick

Etablierter Ansatz aggregierter Bilanzmodelle

Prinzipieller Aufbau

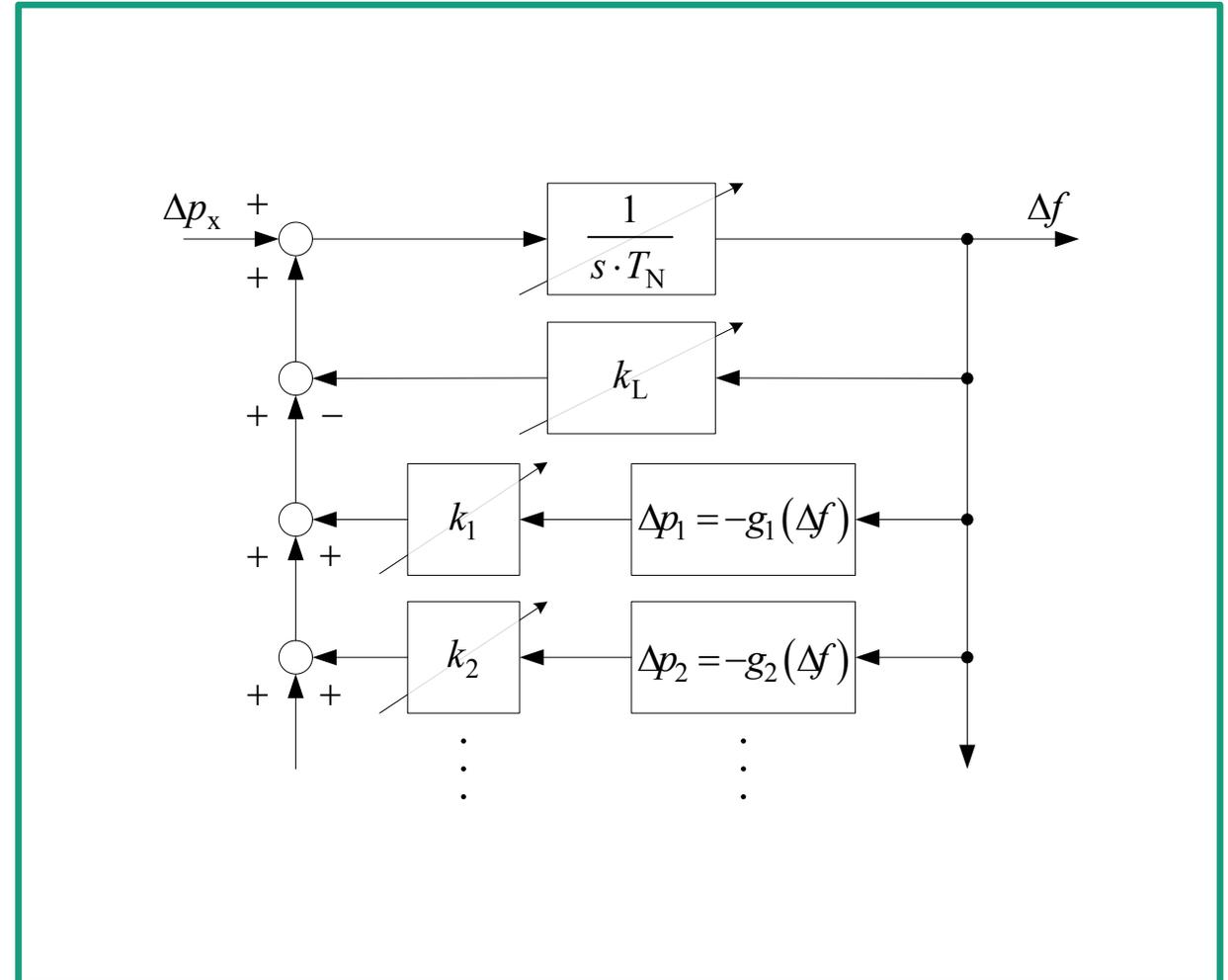
- Etablierter Ansatz:
Verwendung von aggregierten Bilanzmodellen
- Anwendungsgebiet:
Prinzipielle Untersuchungen in Synchron-gebieten
- Idee:
Nachbildung von Frequenzänderungen Δf über Trägheit der rotierenden Massen im System
- Vorgehen/Anwendung:
 - Aggregation aller rotierenden Massen in einer Ersatzmasse → Netzanlaufzeitkonstante T_N
 - Nachbildung Frequenzabhängigkeit der Verbraucher → Last-Leistungszahl k_L
 - Nachbildung Frequenzregelung → hier nur Primärregelleistung (PRL) Δp
 - Systemstörung durch plötzliche Leistungsänderung Δp_x



Etablierter Ansatz aggregierter Bilanzmodelle

Variationen im Erzeugungsmix

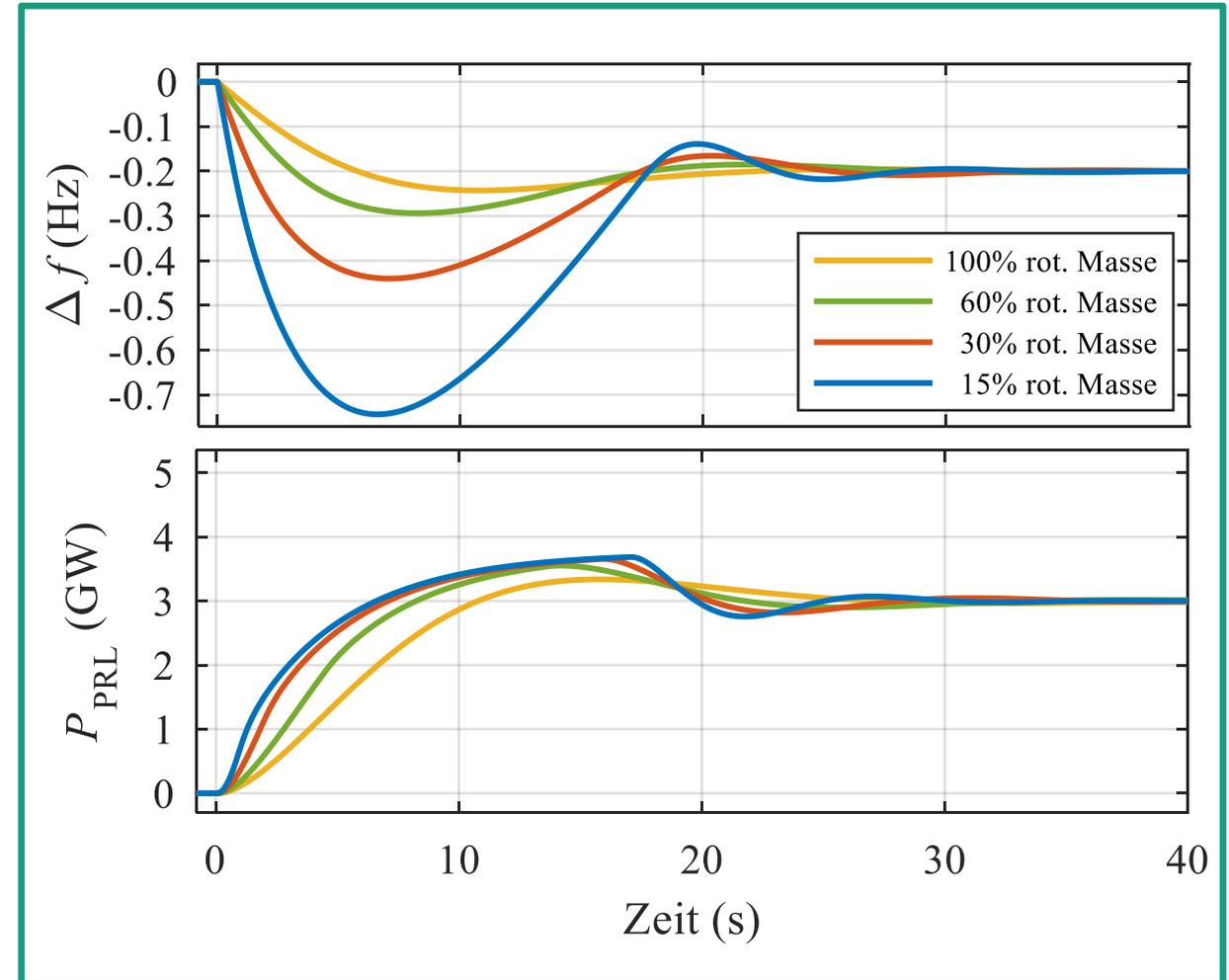
- Nachbildung variierender Anteile der Modellgrößen zur Abbildung
- Variationsmöglichkeiten
 - der rotierenden Masse im System
 - der Frequenzabhängigkeit der Verbraucher
 - durch unterschiedliche PRL-Erbringer
 - durch verschiedene Anteile der PRL-Erbringer
- Randbedingungen der folgenden Simulationen
 - Lasthöhe in Anlehnung an ENTSO-E-System (220 GW als Minimallast-Annahme)
 - Leistungssprung in Höhe Referenzfall (3 GW)
 - PRL-Auslegung auf 0,2 Hz stationäre Frequenzabweichung im Referenzfall
 - Netzanlaufzeitkonstante in Höhe von 12 s als Referenzwert (100 % rotierende Masse)



Etablierter Ansatz aggregierter Bilanzmodelle

Simulation: Variation Anteil rotierende Masse

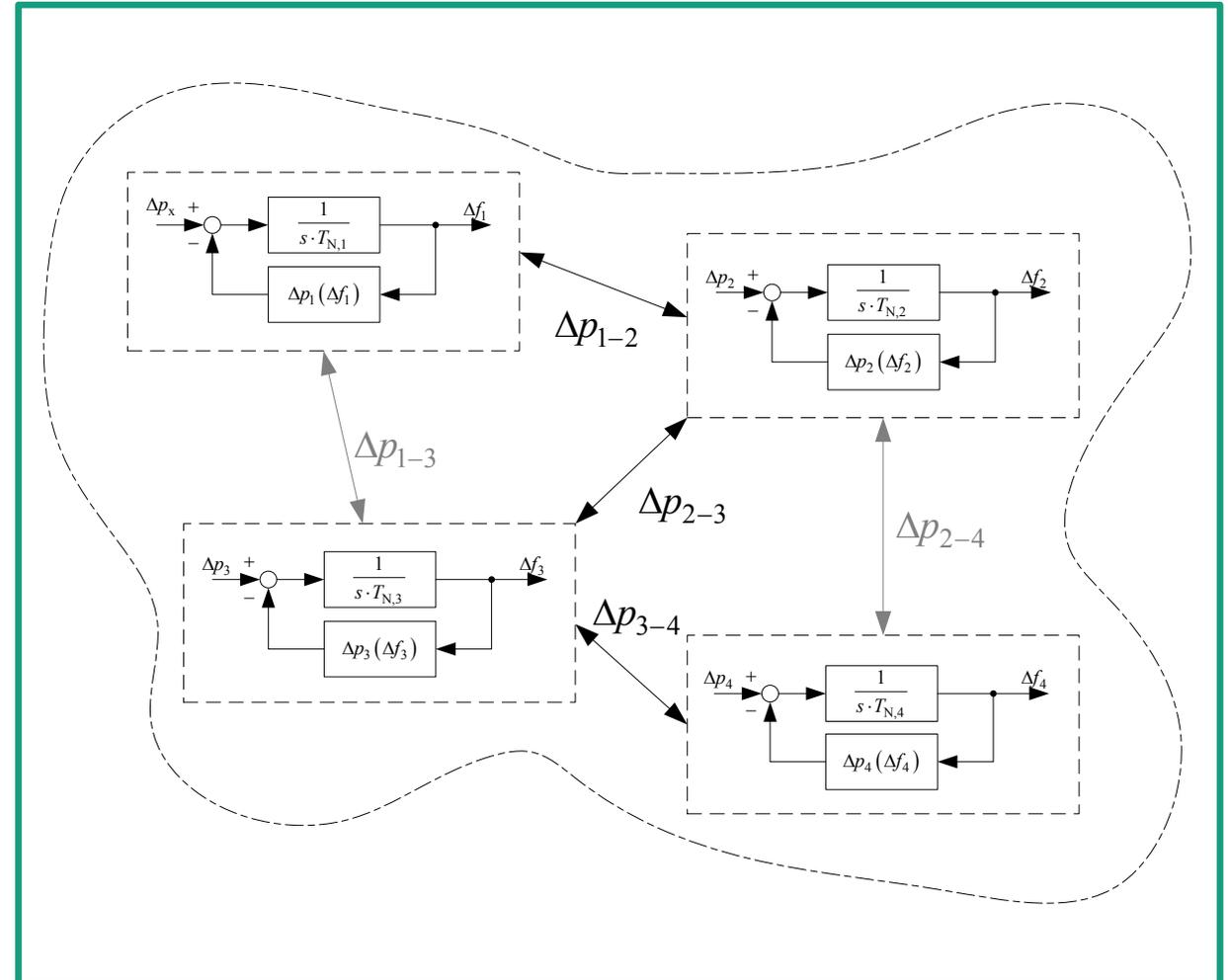
- Simulation bei Variation des Anteil der rotierenden Masse bei PRL-Erbringung durch thermische Erzeugungsanlagen
- Variation in Erzeugungs-Szenario durch Anpassung der Netzanlaufzeitkonstante
- Veränderungen im System
 - Anstieg der maximalen Frequenzabweichung
 - Anstieg der Frequenzänderungsgeschwindigkeit
 - PRL auslegungsgemäß an ihren Grenzen
- Gegenmaßnahmen
 - Künstliche Erhöhung der Trägheit (VI)
 - schnellerer/stärkerer PRL- und/oder FFR-Einsatz
- ▶ Schnellere Reaktion nötig
- ▶ Aggregationsansatz nur bedingt geeignet für Zeitbereich < 3-5 s



Etablierter Ansatz aggregierter Bilanzmodelle

Ausgedehnte Übertragungssysteme

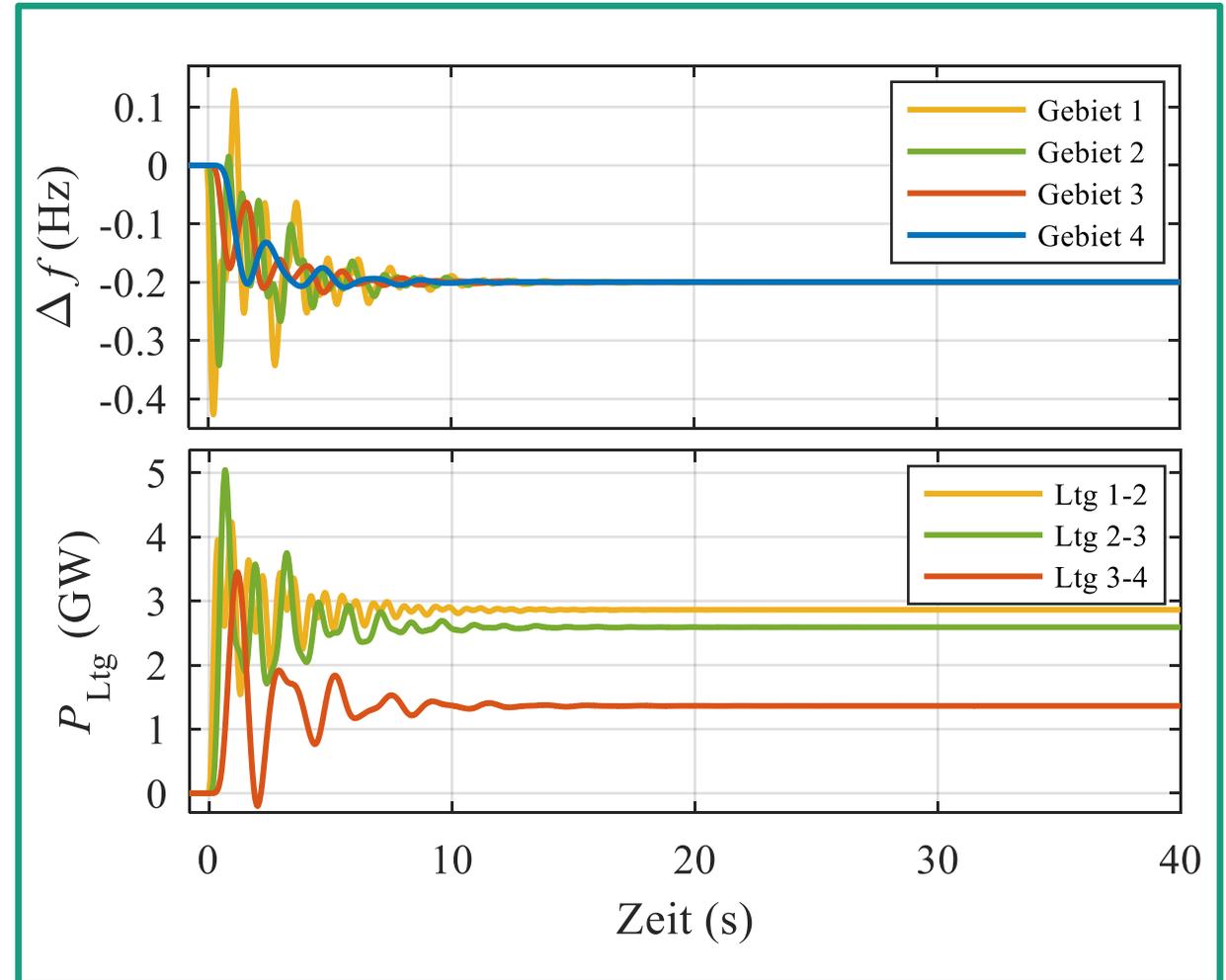
- Etablierter Ansatz liefert Möglichkeit zur Betrachtung mehrerer Gebiete/Regelzonen und ihrer Verbundleitungen
- Aggregation z. B. anhand gut vermaschter bzw. schwach angebundener Gebiete möglich
- Frequenzänderungen Δf_i in Abhängigkeit der Randbedingungen (vgl. vorherige Aussagen)
- Leistungsflüsse Δp_{i-j} aufgrund kurzzeitiger Frequenzunterschiede und resultierenden Winkeldifferenzen der Spannungsvektoren
- Randbedingungen des Gesamtsystems wie vorherige Simulationen
 - 4 serielle Gebiete (10, 20, 90, 100 GW Last)
 - 3 GW Leistungssprung in Gebiet 1
 - 30 % rotierende Masse
 - idealisierte Primärregelung



Etablierter Ansatz aggregierter Bilanzmodelle

Simulation: Frequenzverhalten in ausgedehnten Übertragungssystemen

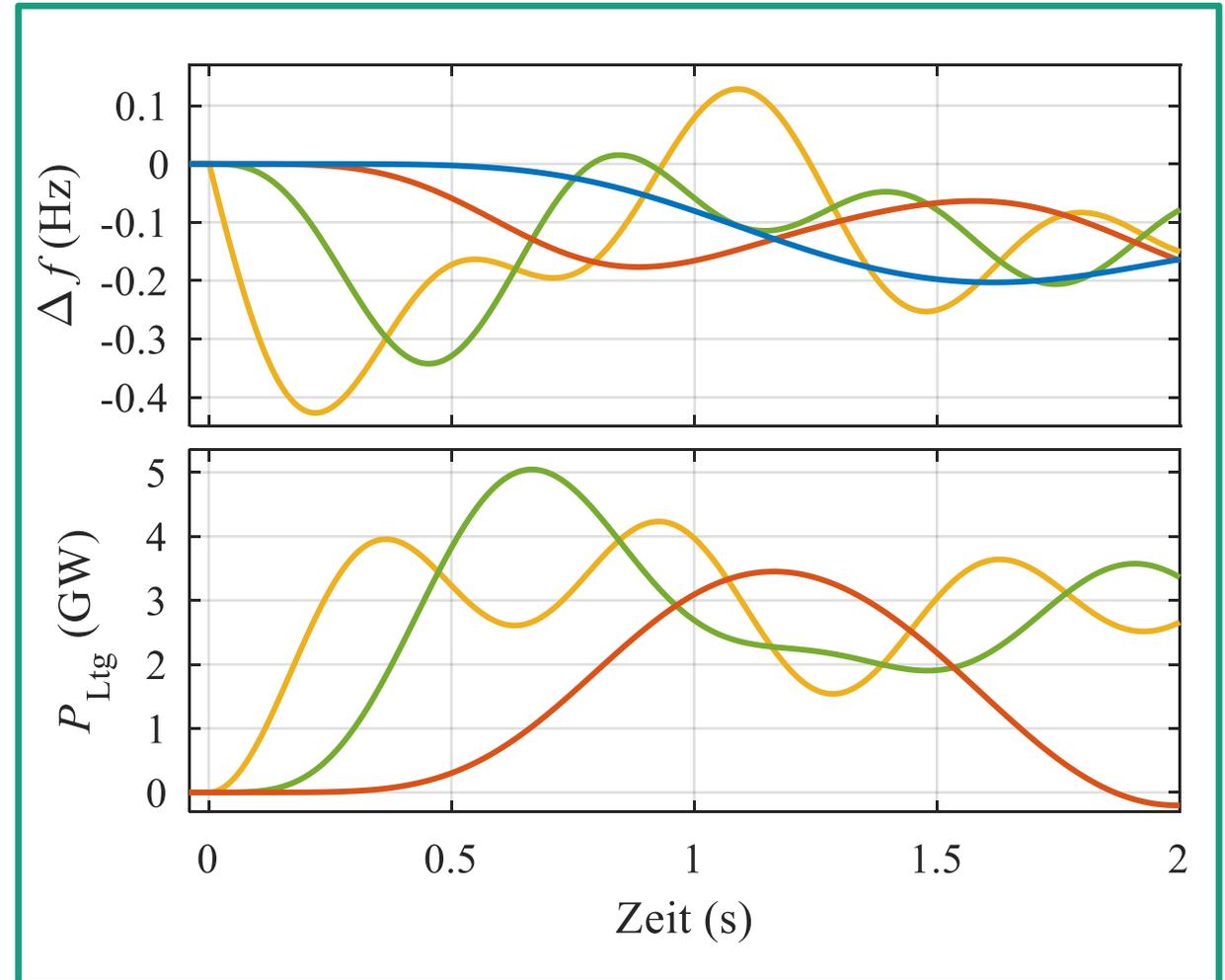
- Simulation des Frequenzverhaltens und der Austauschleistungen in System mit 4 Gebieten
- Ausgleichseffekte in Frequenz und Leistung über Verbundleitungen



Etablierter Ansatz aggregierter Bilanzmodelle

Simulation: Frequenzverhalten in ausgedehnten Übertragungssystemen

- Simulation des Frequenzverhaltens und der Austauschleistungen in System mit 4 Gebieten
- Ausgleichseffekte in Frequenz und Leistung über Verbundleitungen
- Betrachtung der ersten Sekunden
 - Entstehende Frequenzunterschiede im Bilanzmodell sorgen für Leistungsfluss
 - Frequenzänderungen resultieren aus geänderter Leistungsbilanz durch Leistungsflüsse
 - Frequenzänderungen in Gebieten „verzögert“
- ▶ Eingeschränkte Aussagekraft in ersten Sekunden
- ▶ Leistungsflüsse resultieren (auch) instantan aus geänderten Impedanzverhältnissen
- ▶ Etablierter Ansatz nicht für künftige Rahmenbedingungen gedacht/gemacht



Inhalt

1 Einleitung & Motivation

2 Etablierter Ansatz aggregierte Bilanzmodelle

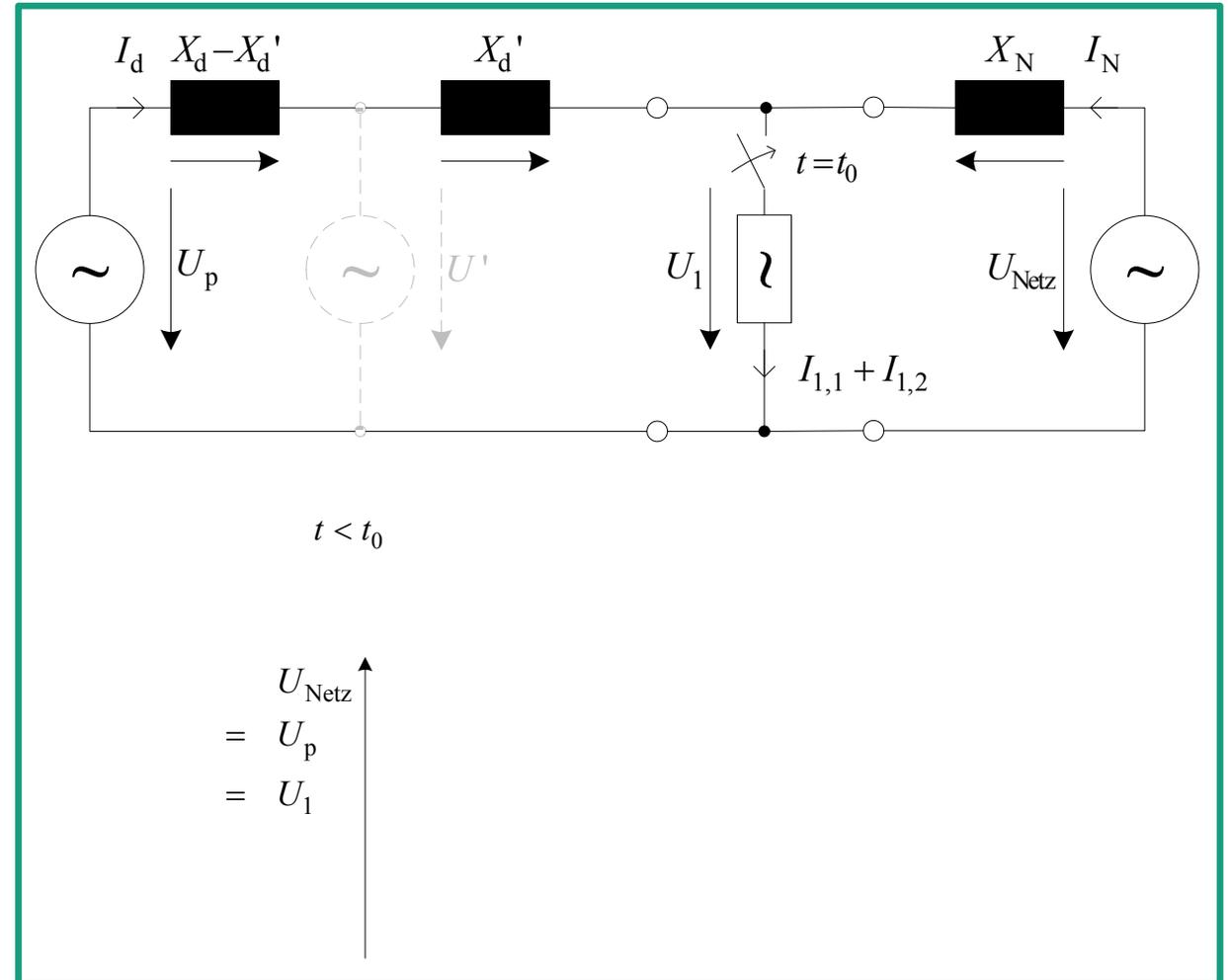
3 Ansätze zur Erweiterung der Modelle

4 Fazit & Ausblick

Ansätze zur Erweiterung der Modelle

Nachbildung des transienten Generatorverhaltens

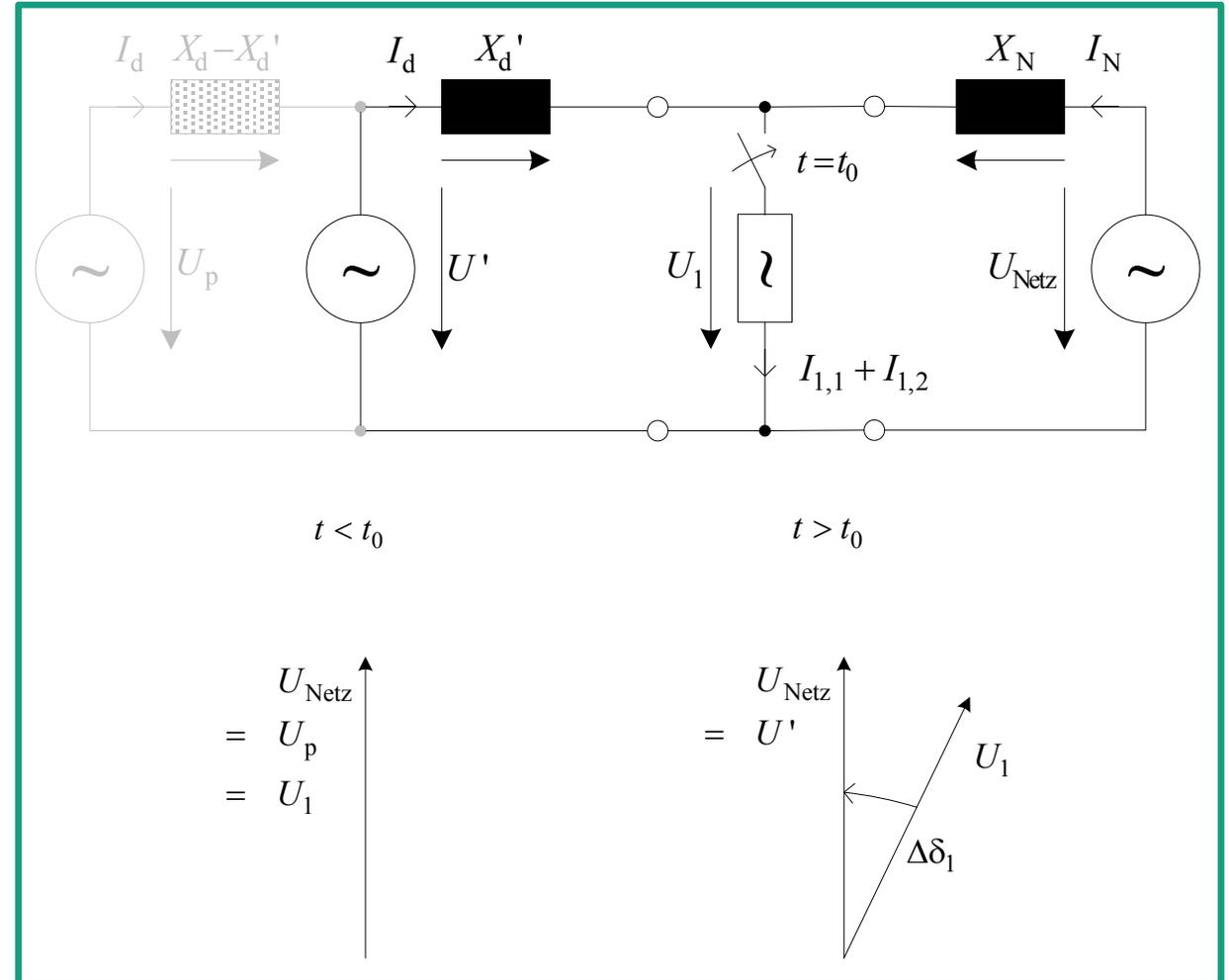
- Klassisches Ersatzschaltbild zur Analyse des transienten Generatorverhaltens
- Unbelasteter Fall
 - $t < t_0$: keine Spannungs- und Winkeldifferenzen
 - Zuschalten der Impedanz ändert Spannungs-winkel an dieser ggü. den zunächst konstanten Winkeln der anderen Spannungen
 - Instantaner Leistungsfluss aus Generator und Leitung/Netz (gemäß X_d' / X_N)



Ansätze zur Erweiterung der Modelle

Nachbildung des transienten Generatorverhaltens

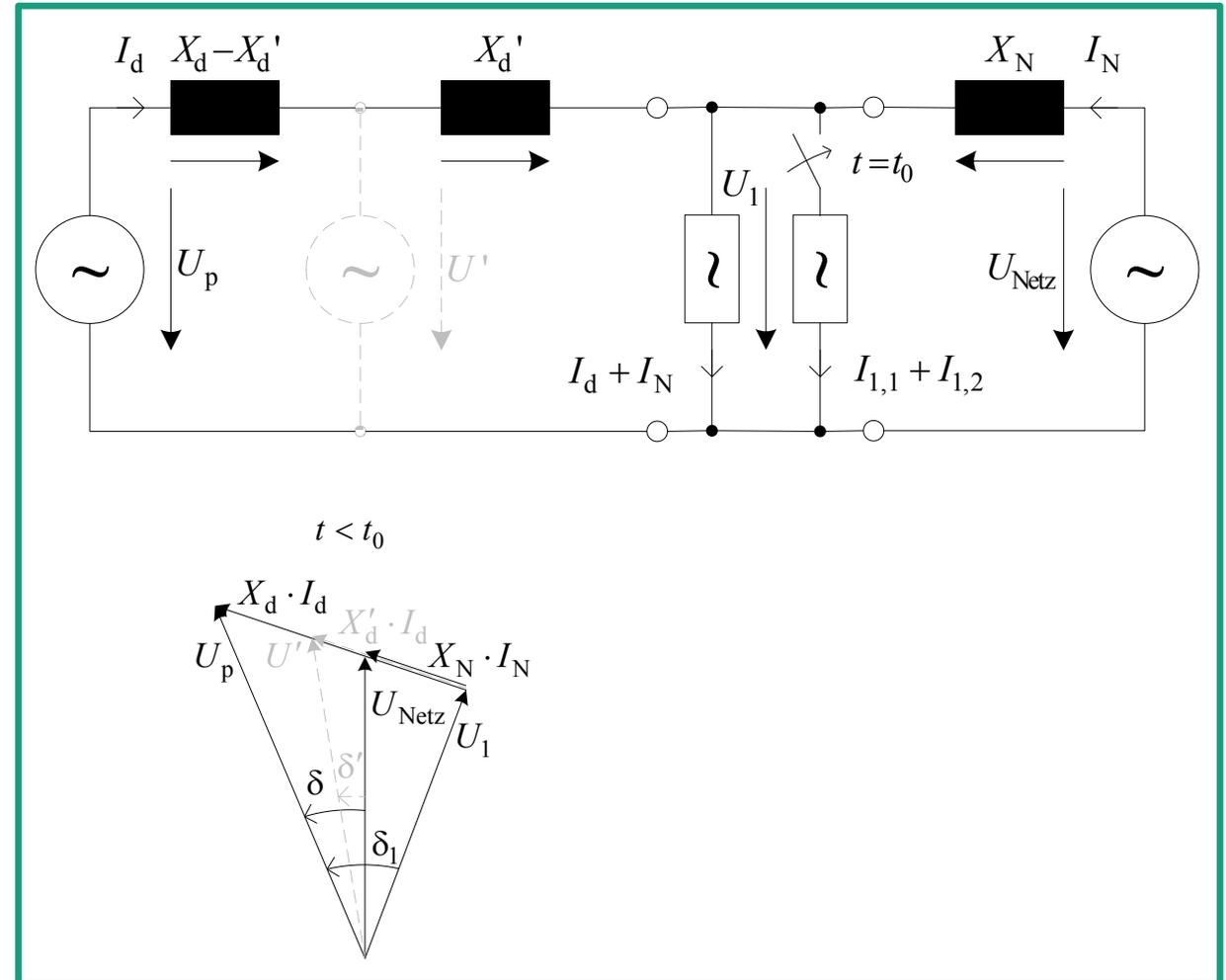
- Klassisches Ersatzschaltbild zur Analyse des transienten Generatorverhaltens
- Unbelasteter Fall
 - $t < t_0$: keine Spannungs- und Winkeldifferenzen
 - Zuschalten der Impedanz ändert Spannungs-winkel an dieser ggü. den zunächst konstanten Winkeln der anderen Spannungen
 - Instantaner Leistungsfluss aus Generator und Leitung/Netz (gemäß X_d' / X_N)



Ansätze zur Erweiterung der Modelle

Nachbildung des transienten Generatorverhaltens

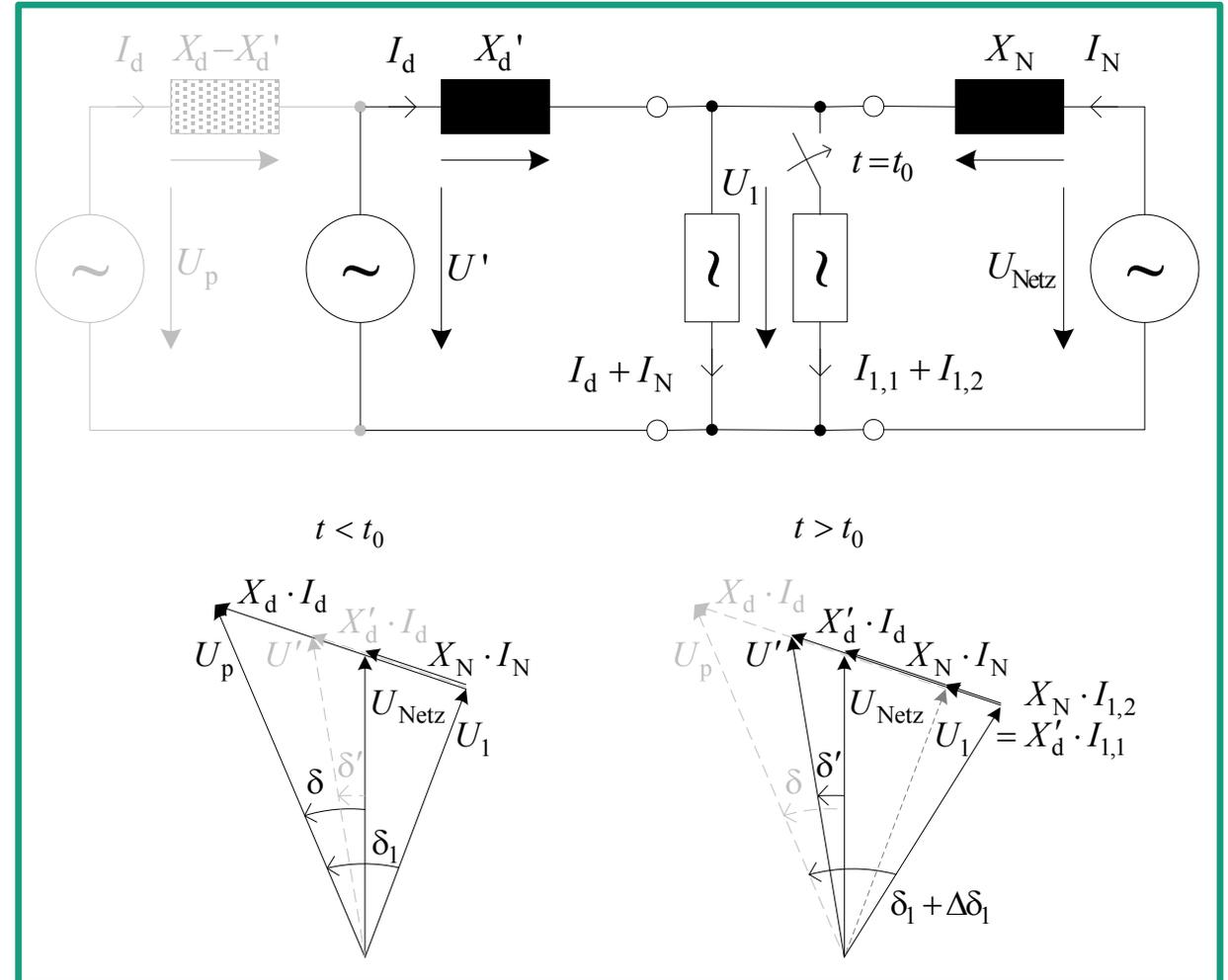
- Klassisches Ersatzschaltbild zur Analyse des transienten Generatorverhaltens
- Unbelasteter Fall
 - $t < t_0$: keine Spannungs- und Winkeldifferenzen
 - Zuschalten der Impedanz ändert Spannungs-winkel an dieser ggü. den zunächst konstanten Winkeln der anderen Spannungen
 - Instantaner Leistungsfluss aus Generator und Leitung/Netz (gemäß X_d' / X_N)
- Belasteter Fall
 - Klassisches Zeigerdiagramm mit Speisung der Last aus Generator und Netz
 - Zuschalten der Impedanz verschiebt durch geänderten Leistungsfluss Spannungswinkel der Last ggü. den anderen Spannungen
 - Instantan geänderte Leistungsflüsse aus Generator und Leitung/Netz (gemäß X_d' / X_N)



Ansätze zur Erweiterung der Modelle

Nachbildung des transienten Generatorverhaltens

- Klassisches Ersatzschaltbild zur Analyse des transienten Generatorverhaltens
- Unbelasteter Fall
 - $t < t_0$: keine Spannungs- und Winkeldifferenzen
 - Zuschalten der Impedanz ändert Spannungs-winkel an dieser ggü. den zunächst konstanten Winkeln der anderen Spannungen
 - Instantaner Leistungsfluss aus Generator und Leitung/Netz (gemäß X_d' / X_N)
- Belasteter Fall
 - Klassisches Zeigerdiagramm mit Speisung der Last aus Generator und Netz
 - Zuschalten der Impedanz verschiebt durch geänderten Leistungsfluss Spannungswinkel der Last ggü. den anderen Spannungen
 - Instantan geänderte Leistungsflüsse aus Generator und Leitung/Netz (gemäß X_d' / X_N)

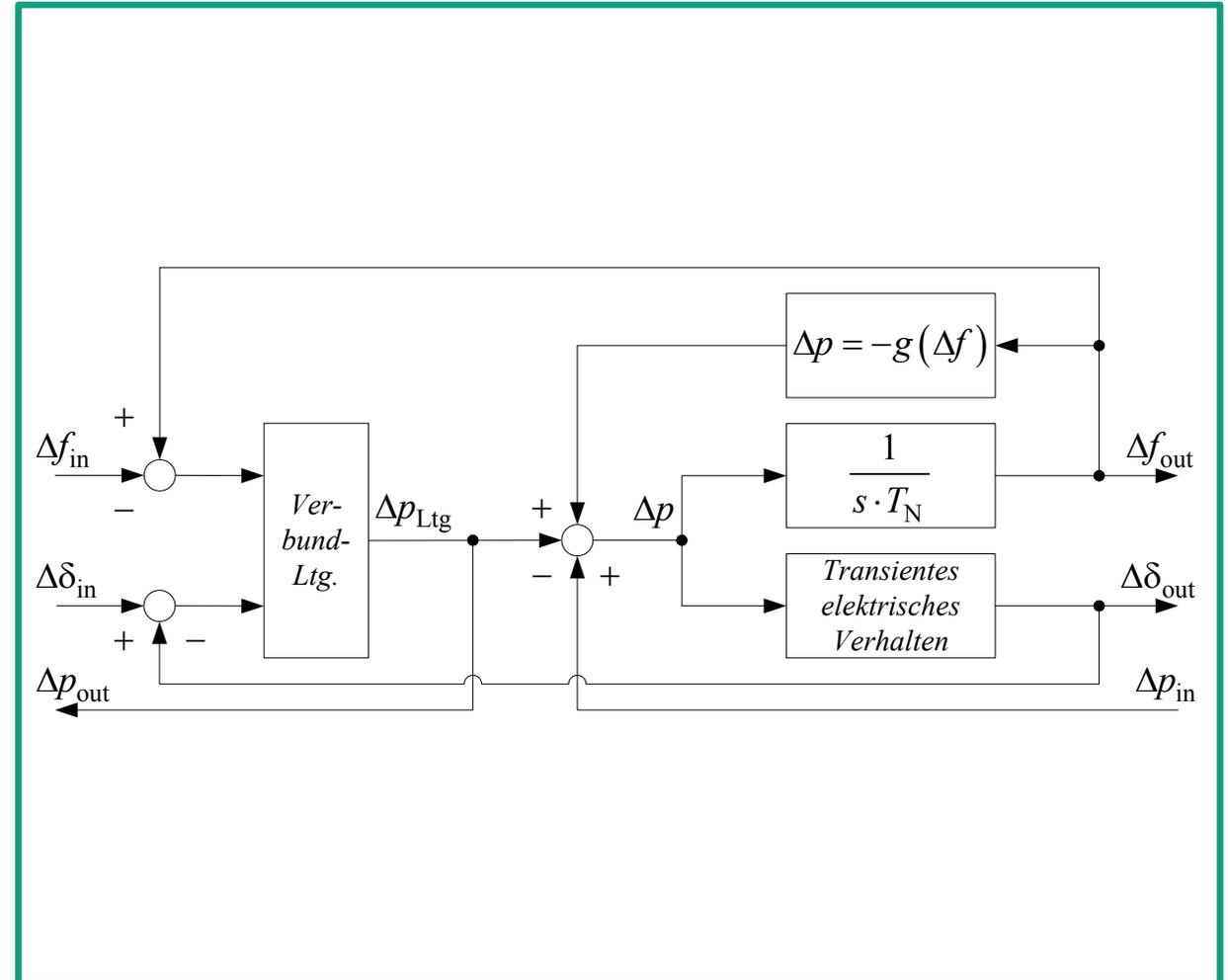


Ansätze zur Erweiterung der Modelle

Nachbildung des transienten Generatorverhaltens: Umsetzung in Blockschaltbild

- Auswirkungen der erweiterten Modellierung
 - Instantane Leistungsflüsse über Verbundleitungen
 - Leistungsungleichgewicht in allen Netzgebieten
 - Auswirkung größer bei geringer rotierender Masse und schwacher Anbindung von Netzgebieten

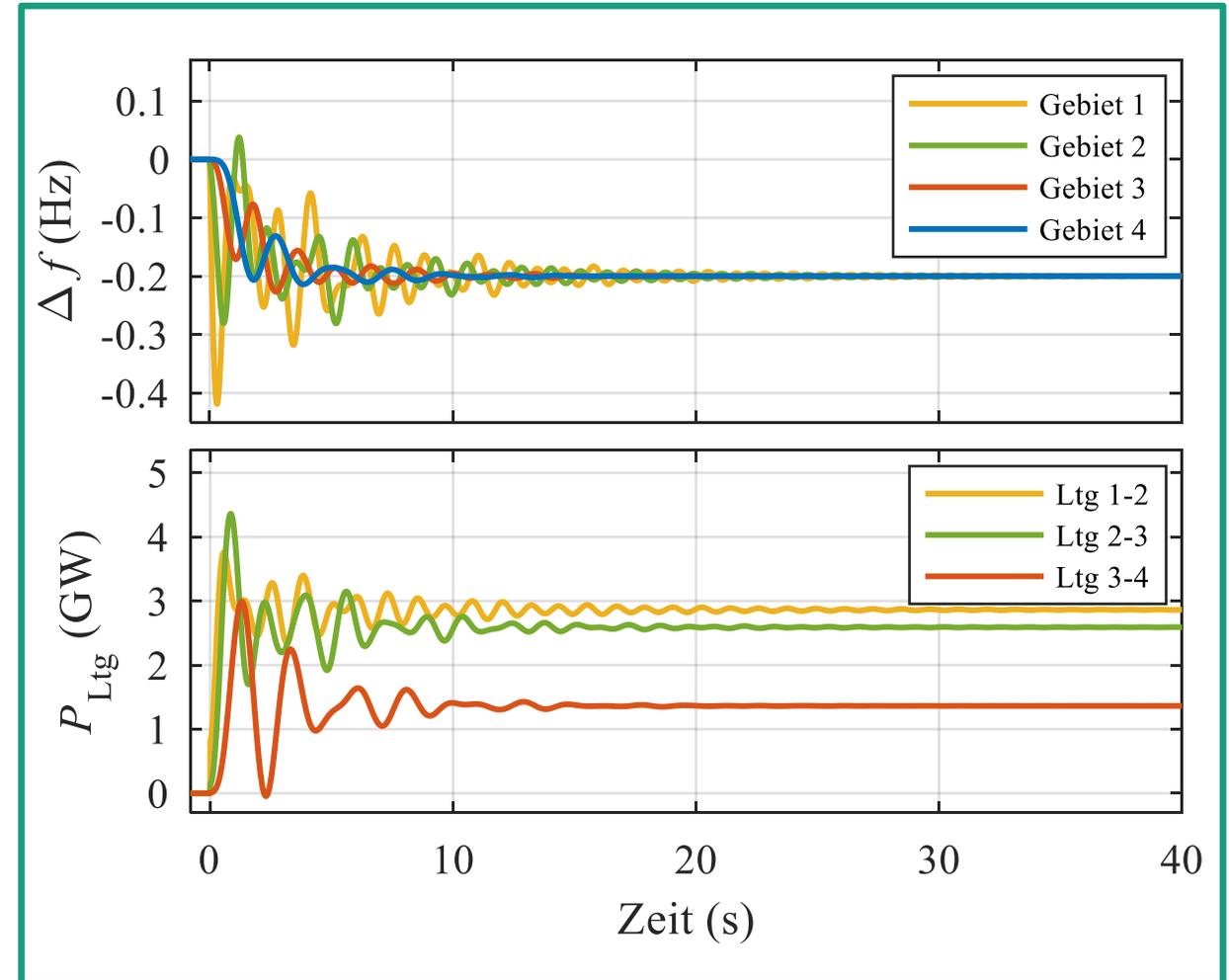
- Umsetzung im Modell
 - Auswirkungen werden insbesondere in Systemen mit mehreren Gebieten deutlich
 - Ermittlung des Spannungswinkels an den Generatorklemmen („Sammelschiene des Gebiets“)
 - Modellierung inkl. Abklingverhalten der transienten Effekte über Zeitkonstante T_d
 - Erweiterung des Gültigkeitsbereich in die ersten Sekunden (sowie im Mittelzeit-Bereich)



Ansätze zur Erweiterung der Modelle

Simulation: Frequenzverhalten in ausgedehnten Übertragungssystemen

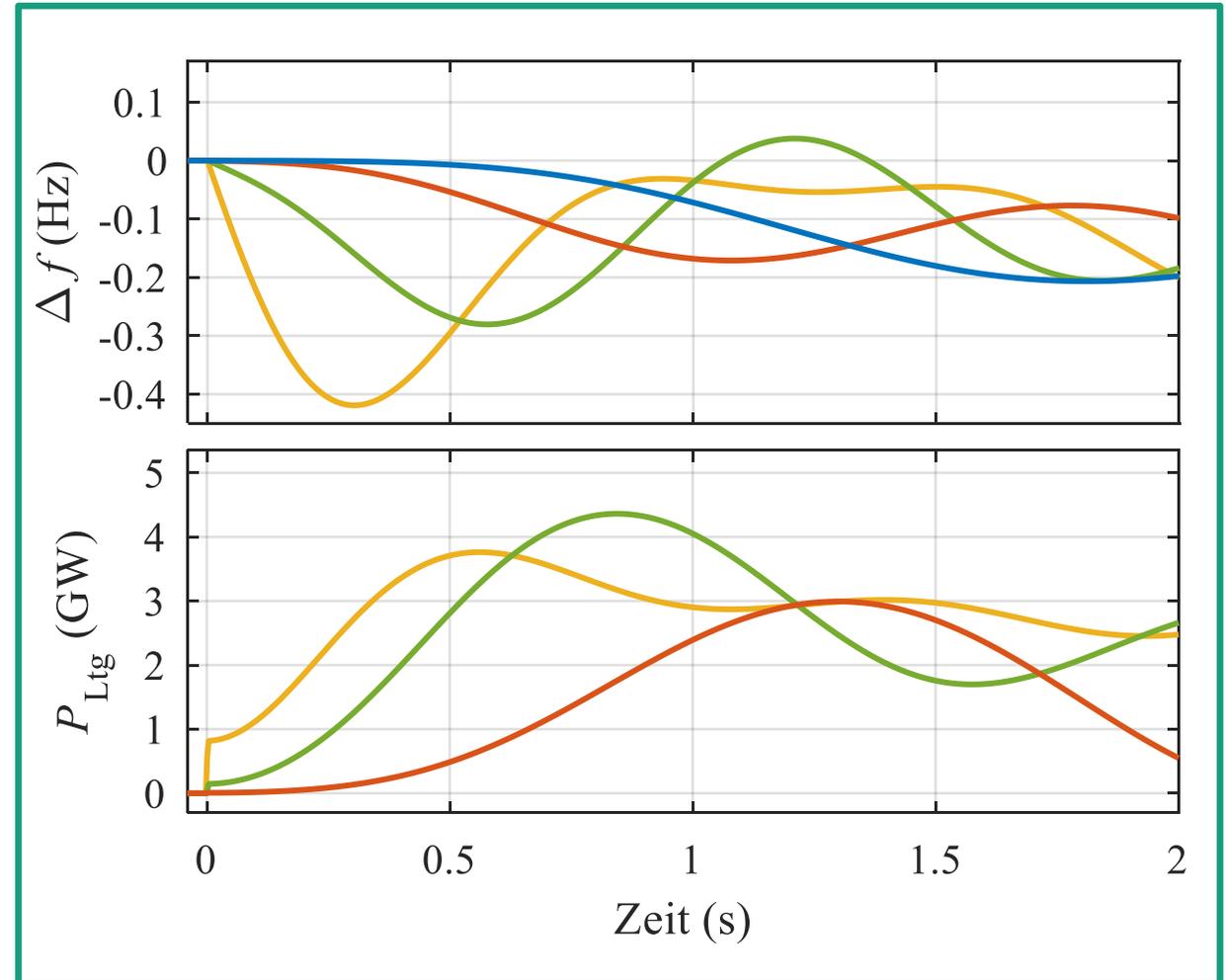
- Simulation des Frequenzverhaltens und der Austauschleistungen in System mit 4 Gebieten
- Randparameter gemäß vorangegangener Simulation
 - 4 serielle Gebiete (10, 20, 90, 100 GW Last)
 - 3 GW Leistungssprung in Gebiet 1
 - 30 % rotierende Masse
 - idealisierte Primärregelung



Ansätze zur Erweiterung der Modelle

Simulation: Frequenzverhalten in ausgedehnten Übertragungssystemen

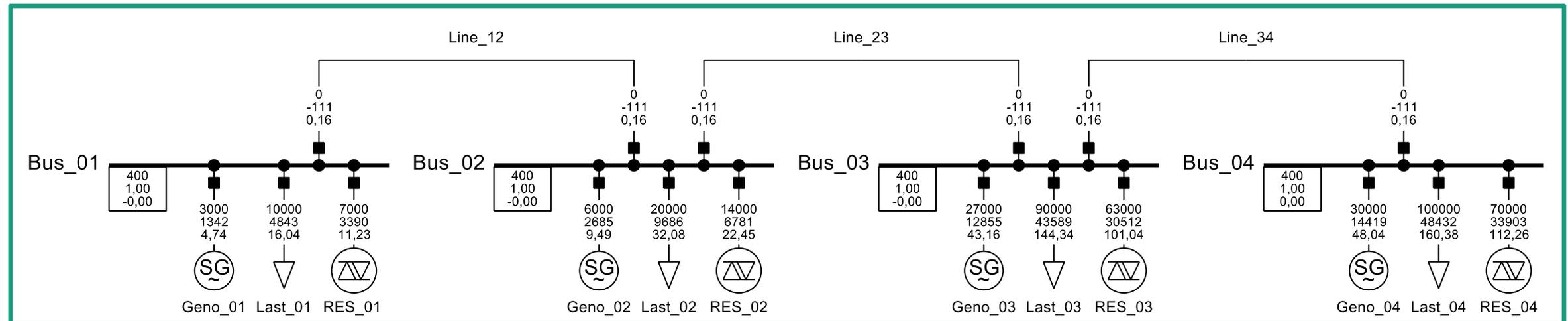
- Simulation des Frequenzverhaltens und der Austauschleistungen in System mit 4 Gebieten
- Randparameter gemäß vorangegangener Simulation
 - 4 serielle Gebiete (10, 20, 90, 100 GW Last)
 - 3 GW Leistungssprung in Gebiet 1
 - 30 % rotierende Masse
 - idealisierte Primärregelung
- Betrachtung der ersten Sekunden
 - Instantaner Leistungsfluss über die Verbundleitungen
 - Instantane Frequenzänderung („Knick“) in den weiteren Gebieten
- Frequenz- und Leistungsfluss-Verhalten wird realistischer abgebildet (vgl. Frequenz-messungen in ausgedehnten Systemen)



Ansätze zur Erweiterung der Modelle

Referenzmodell zur Verifikation

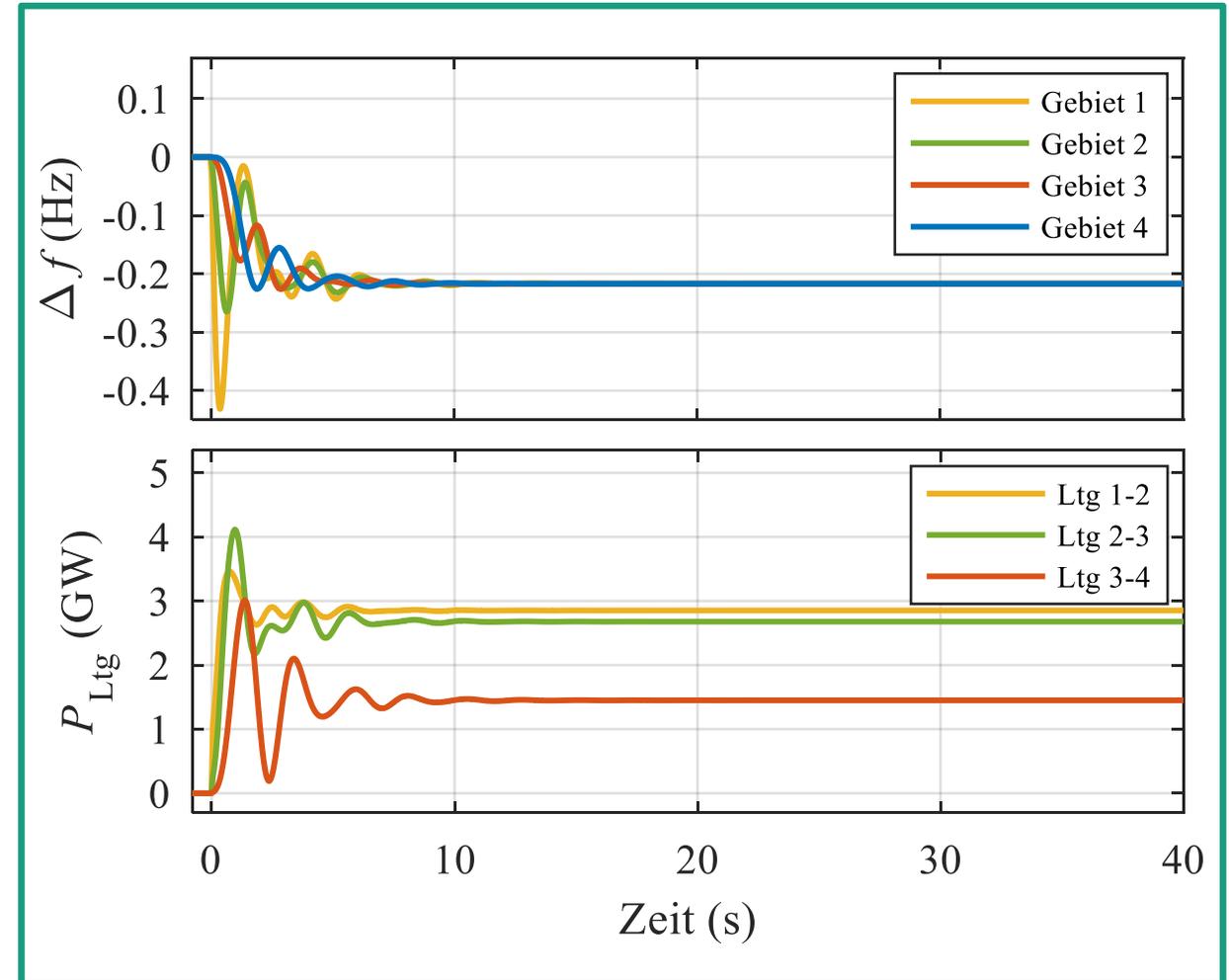
- Erstellung eines Referenzmodells mit vollständigem transienten Generator-Modell in DigSILENT PowerFactory
- Randbedingungen der Simulation wie vorhergehend
 - Abbildung der reduzierten rotierenden Masse über Leistungsbereitstellung aus statischen Generatoren
 - Einfache Nachbildung der Spannungsregelung (AVR) durch Proportional-Glied
 - Idealisierte Primärregelung ohne Zeitkonstanten
 - Betrieb mit $\cos(\phi) = 0,9$
- Modellaufbau mit initialem Leistungsfluss:



Ansätze zur Erweiterung der Modelle

Simulation: Referenzmodell zur Verifikation

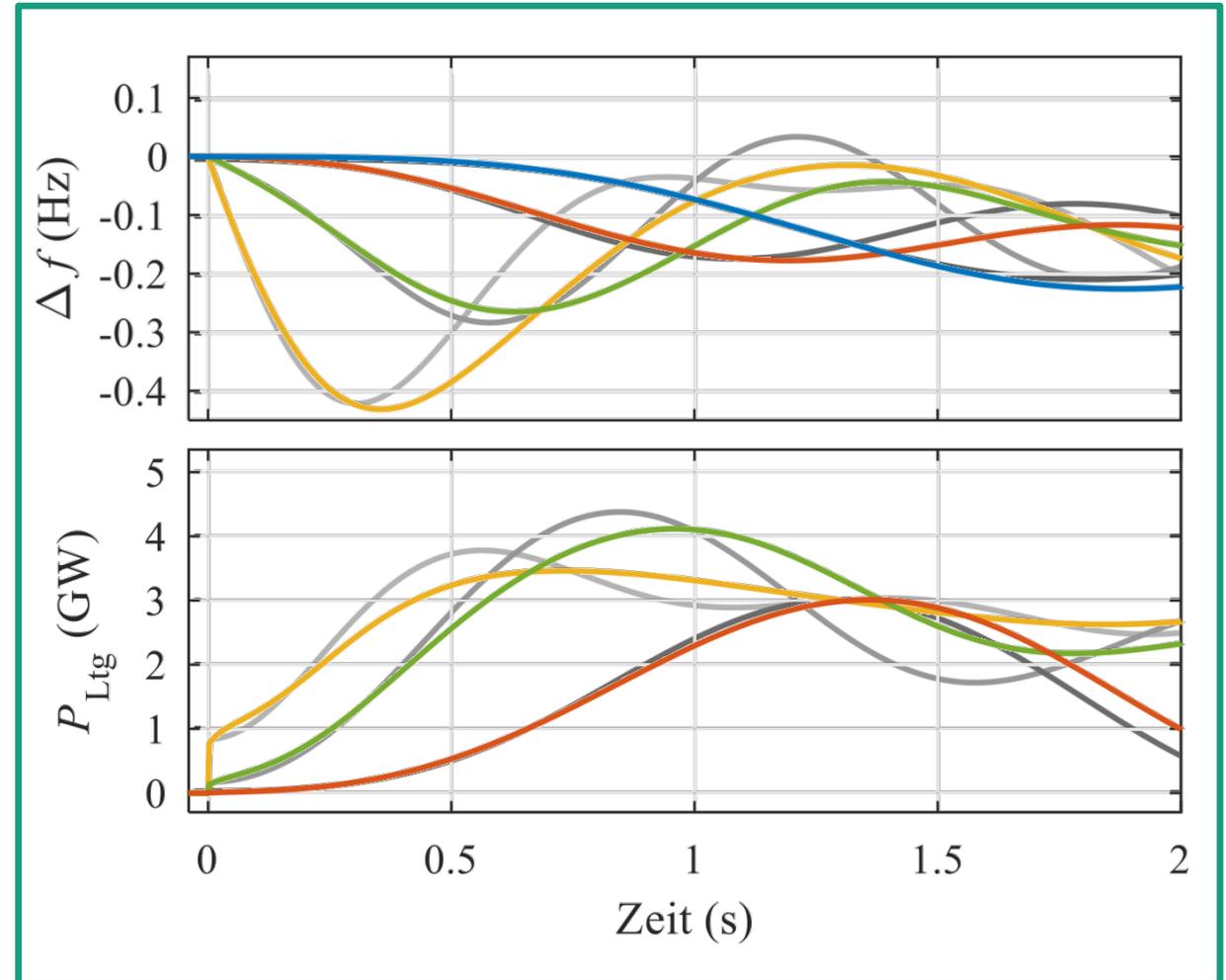
- Simulation mit Referenzmodell bestätigt Ergebnisse der erweiterten Modellierung
- Gute Übereinstimmung von
 - Maximaler Frequenzabweichung
 - Initiale Leistungsbereitstellung über erste Verbundleitung
 - Frequenzentwicklung in den weiteren Gebieten
- Abweichungen insbesondere in Stärke und Frequenz der Ausgleichsvorgänge durch Berücksichtigung dämpfender Effekte in komplettem Modell



Ansätze zur Erweiterung der Modelle

Simulation: Referenzmodell zur Verifikation

- Simulation mit Referenzmodell bestätigt Ergebnisse der erweiterten Modellierung
- Gute Übereinstimmung von
 - Maximaler Frequenzabweichung
 - Initiale Leistungsbereitstellung über erste Verbundleitung
 - Frequenzentwicklung in den weiteren Gebieten
- Abweichungen insbesondere in Stärke und Frequenz der Ausgleichsvorgänge durch Berücksichtigung dämpfender Effekte in komplettem Modell
- ▶ Gute Übereinstimmung mit vollständiger Modellierung
- ▶ Gültigkeit des Bilanzmodells kann in erste Sekunden erweitert werden



Inhalt

1 Einleitung & Motivation

2 Etablierter Ansatz aggregierte Bilanzmodelle

3 Ansätze zur Erweiterung der Modelle

4 Fazit & Ausblick

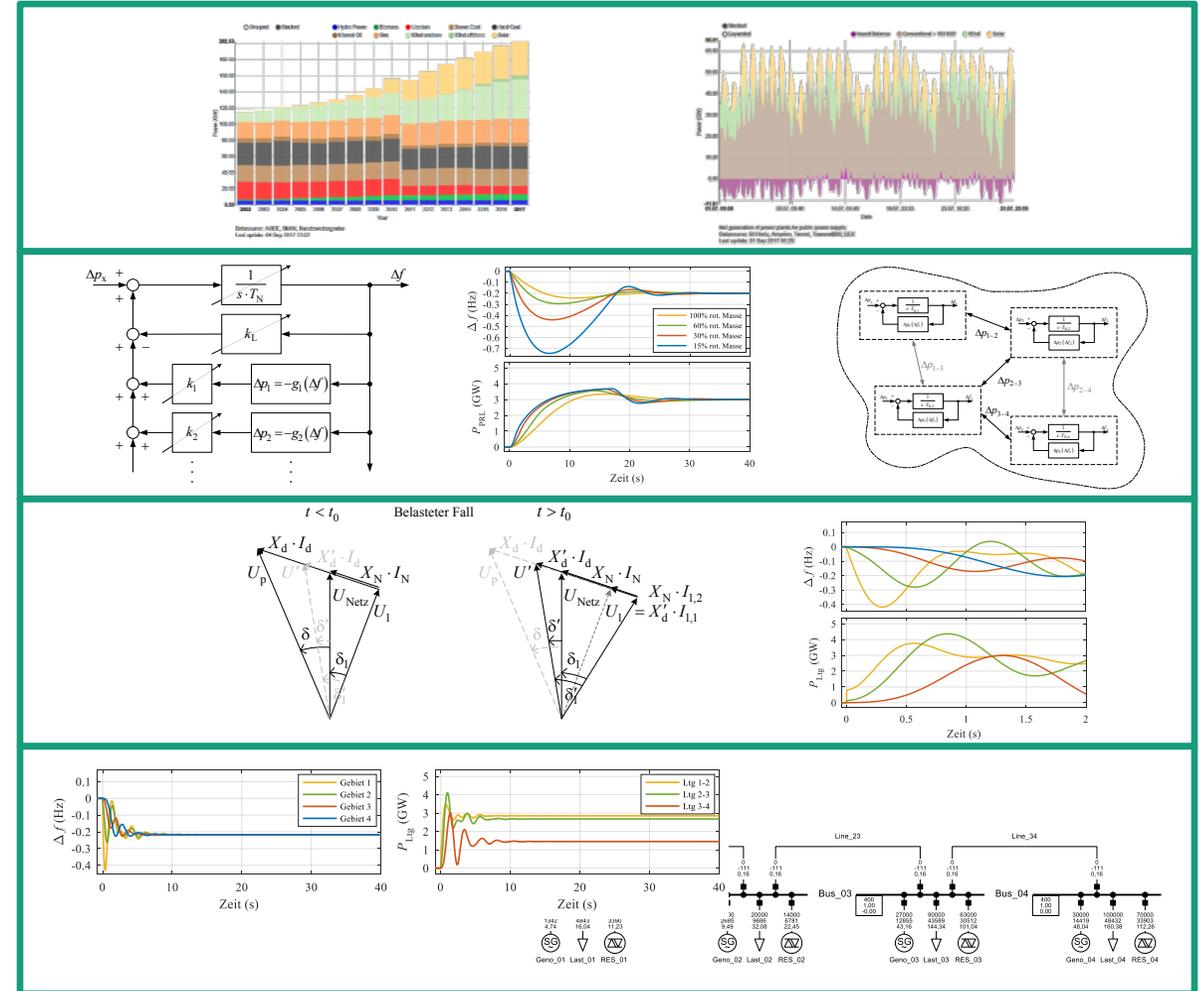
Fazit & Ausblick

Zusammenfassung & Fazit

- Veränderungen in der Erzeugungs- und Verbraucher-Landschaft führt zu neuen Herausforderungen im Systembetrieb
- Aggregationsansatz erlaubt prinzipielle Untersuchung variierender Erzeugungsstrukturen
- Relevanter werdender Zeitbereich ursprünglich nicht in Modellierung vorgesehen
- Erweiterung erlaubt Betrachtung der Effekte auch in den ersten Sekunden
- Anwendungsmöglichkeiten bei der Sensitivitätsanalyse des zukünftigen Frequenz- und Anlagenverhaltens

Offene Fragen & Anschlussarbeiten

- Vorgehen bei der Aggregation & Parametrierung ausgehend von realen Netzen und bei stark inhomogener Erzeugungsstruktur
- Abgleich & Verifikation an vollständig abgebildetem dynamischen Netzmodell



MODELLE ZUR ANALYSE DES FREQUENZVERHALTENS AUSGEDEHNTER ÜBERTRAGUNGSSYSTEME

Denis Mende, Holger Becker, Walter Schitteck, David Sebastian Stock, Lutz Hofmann



TU
Graz

INSTITUT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT UND ENERGIESYSTEMTECHNIK
IEE

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen & Anmerkungen?

EnInnov2018
15. Symposium Energieinnovation

Neue Energie für unser
bewegtes Europa

14.-16. Februar 2018 TU Graz, Österreich

Session D4:
MODELLE UND METHODEN

15.02.2018
16:30-18:30 Uhr
Raum I11

 **Fraunhofer**
IEE

Dipl.-Ing. Denis Mende

Bereich Energiewirtschaft und Netzbetrieb
Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft
und Energiesystemtechnik IEE

Königstor 59 | 34119 Kassel / Deutschland
Telefon +49 561 7294-425
denis.mende@iee.fraunhofer.de