

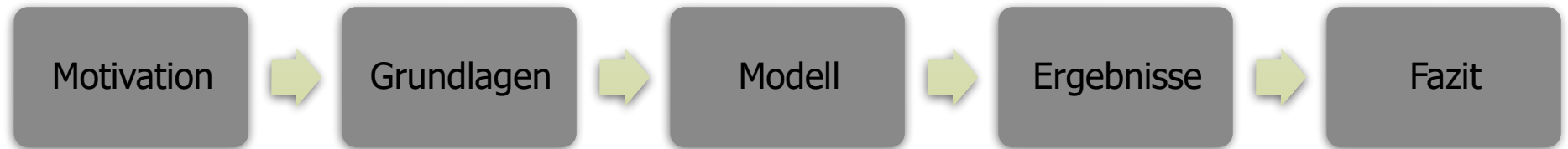
EINFLUSSGRÖßEN AUF DIE DYNAMIK DER NETZBILDENDEN DROOP-REGELUNG

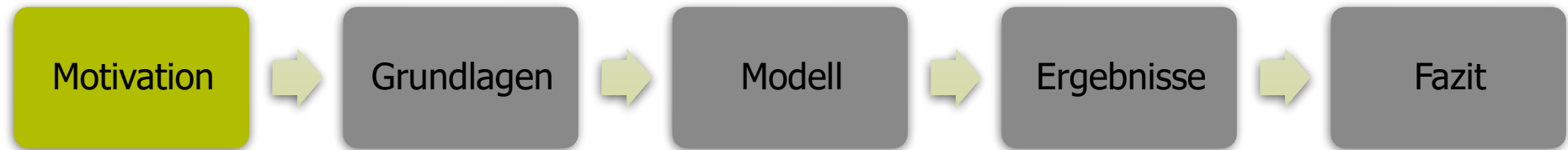


Lukas Jung B.Sc. , Anna Pfendler M.Sc. , Aaron Hebing M.Sc. , Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson

EnInnov2024

18. Symposium Energieinnovation | 14.02.-16.02.2024







Energiewende

Vermehrter Einsatz von DEA und Leistungselektronik



Dezentrale Erzeugungsanlagen

Ersetzen konventionelle Kraftwerke



Systemdienstleistungen

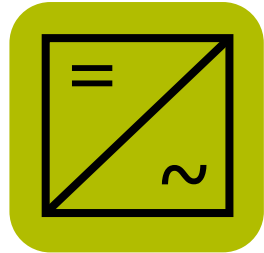
DEA müssen Systemdienstleistungen erbringen und zur Wahrung der Systemstabilität beitragen



Netzbildende Regelung

Vielversprechender Ansatz zum erfüllen der Systemdienstleistungen

Untersuchen einer Netzbildenden Regelung



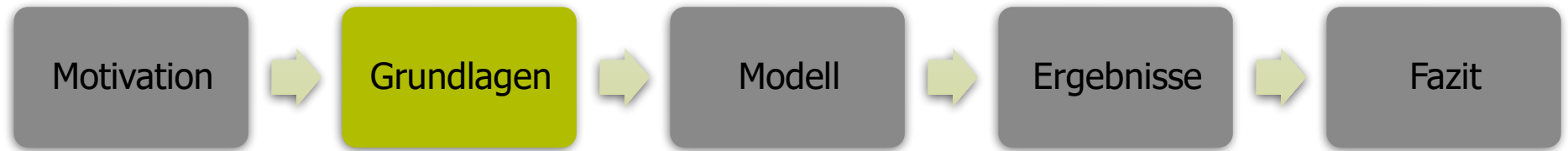
Netzbildende Regelung

Implementieren einer netzbildenden Droop-Regelung in eine Testbench



Sensitivitätsanalyse

Untersuchen der Netz-, und Regel-Parameter sowie Kenngrößen des SG



Herleitung:

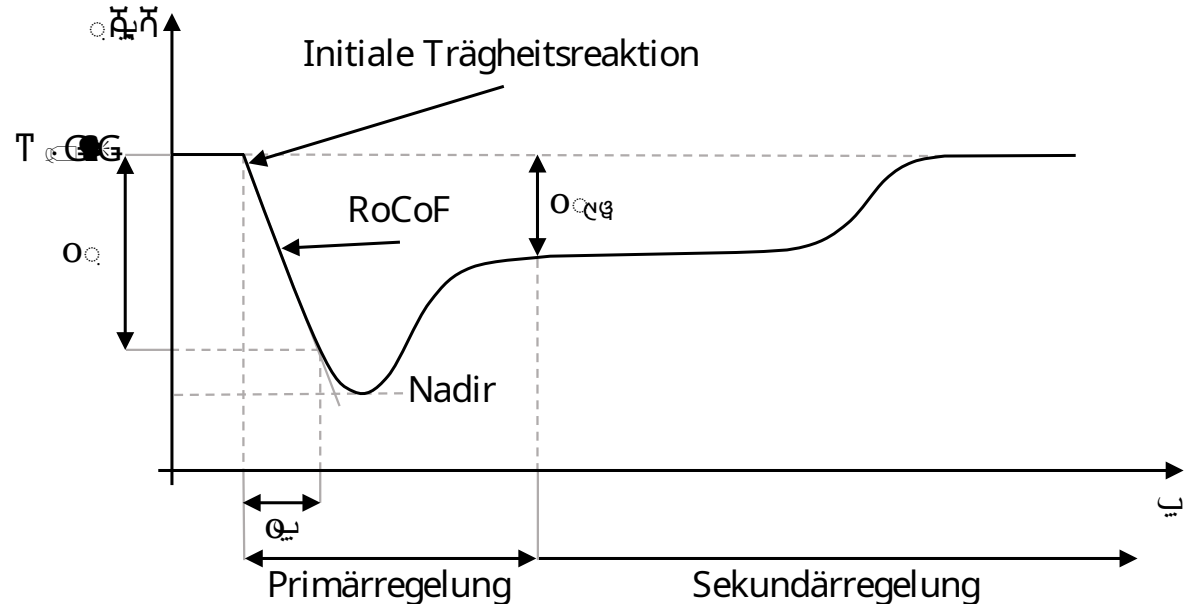
- Leistungsübertragung über eine Leitung

Bereiche:

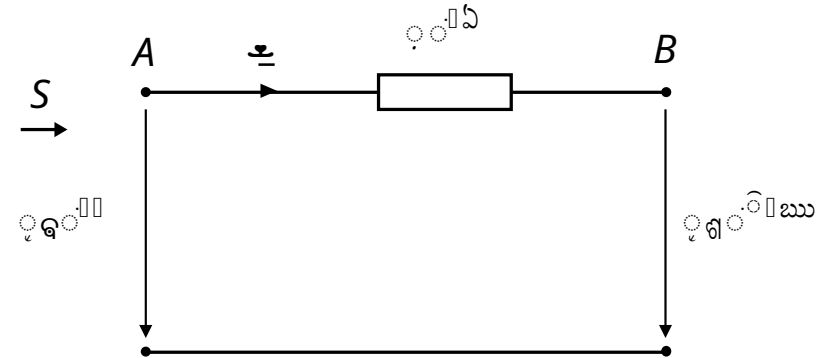
1. Initiale Trägheitsreaktion
2. Primärregelung
3. Sekundärregelung

Beurteilung:

4. Frequenzgradient:
5. Frequenzminimum:
6. Quasistationärer Endwert:



- Bestimmen der Leistungsübertragung über eine Leitung
- Aufteilen in Real- und Imaginärteil
- Einsetzen von Z für die Leitungsimpedanz



- Unter der Annahme einer rein induktiven Leitung erhalten wir:

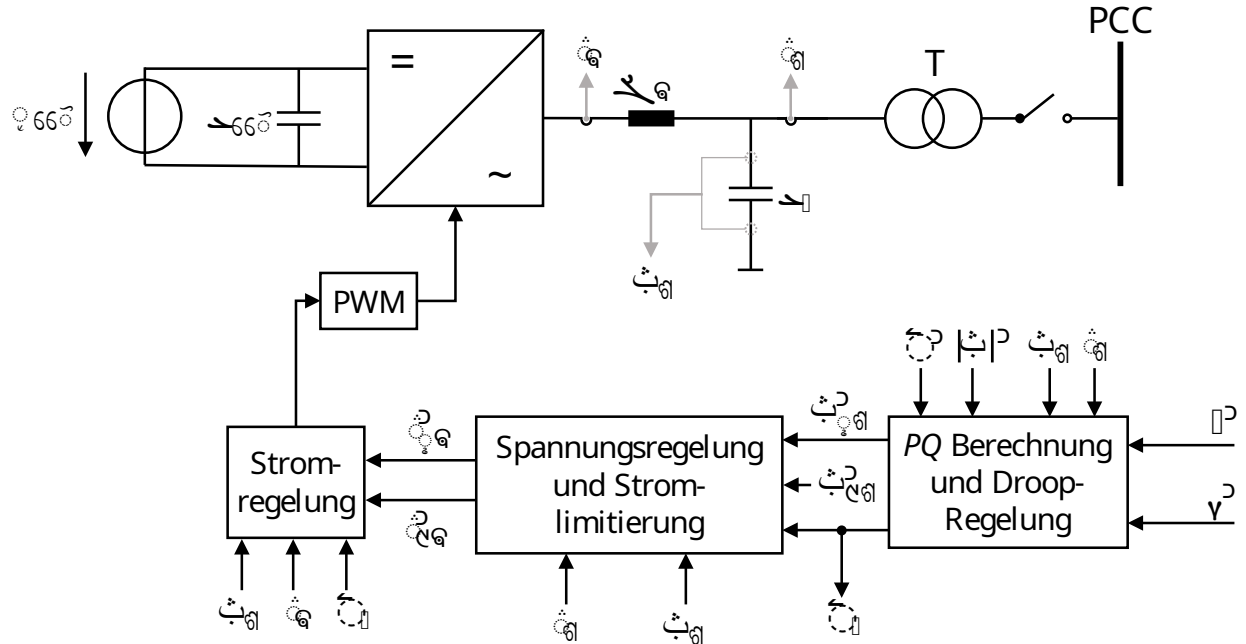
Aufgabe:

- Spannung und Frequenz regeln, sodass die richtige Wirk- und Blindleistung bereitgestellt wird.

Bestandteile

- Geregelte Spannungsquelle
- LC-Filter
- Transformator
- Regelung:
 - Spannungsregelung
 - Stromregelung
 - Droop-Regelung

- **Droop-Regelung für parallelen Betrieb und Load-Sharing notwendig**

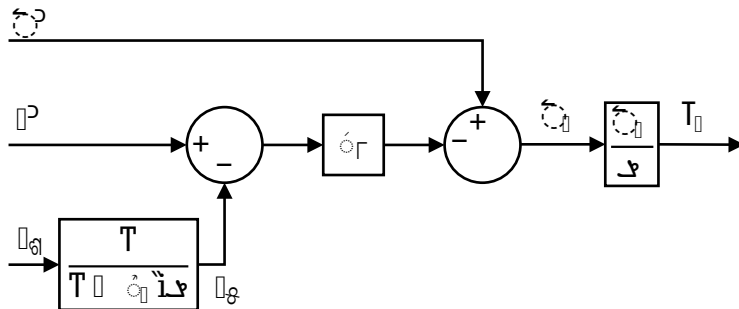


Wirkleistungsdroop:

- Annahme für kleine Winkel:



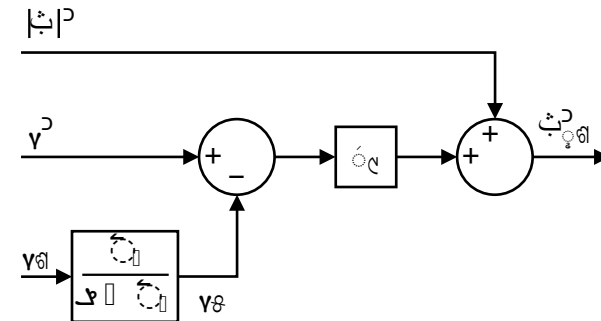
- Droop-Gleichung:



Blindleistungsdroop:

- Annahme für kleine Winkel:

- Droop-Gleichung:

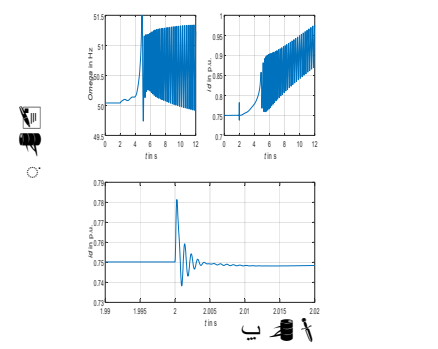
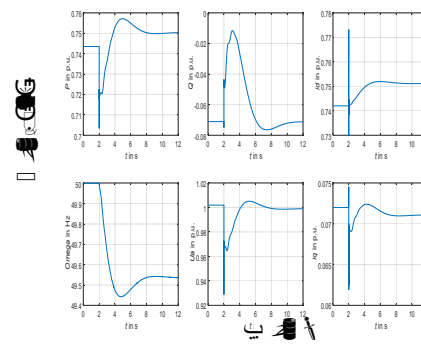
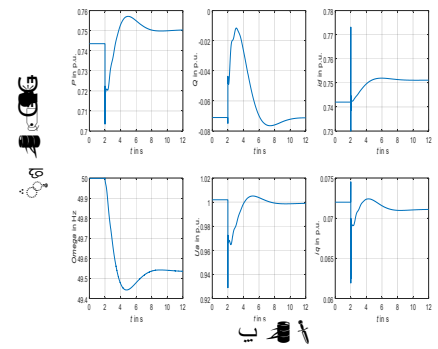
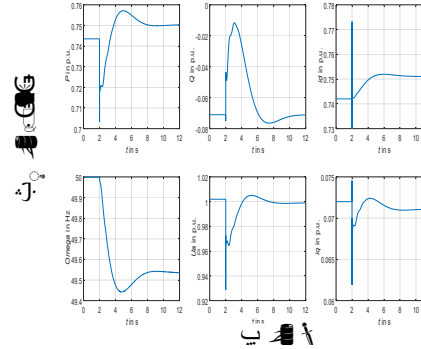
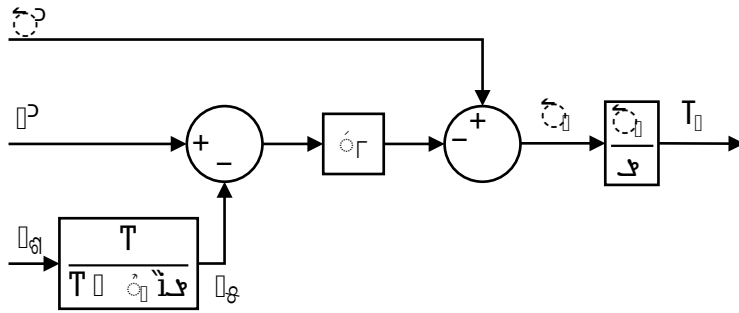


Wirkleistungsdroop:

- Annahme für kleine Winkel:

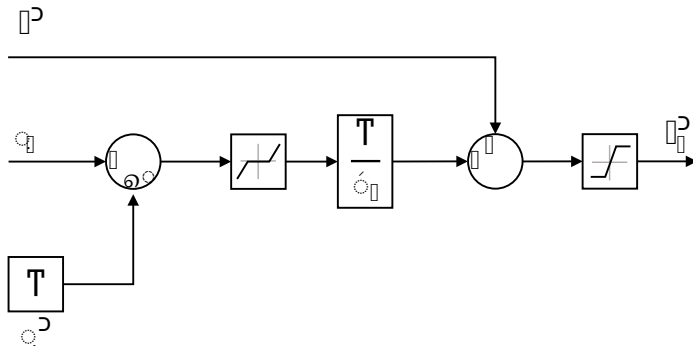


- Droop-Gleichung:



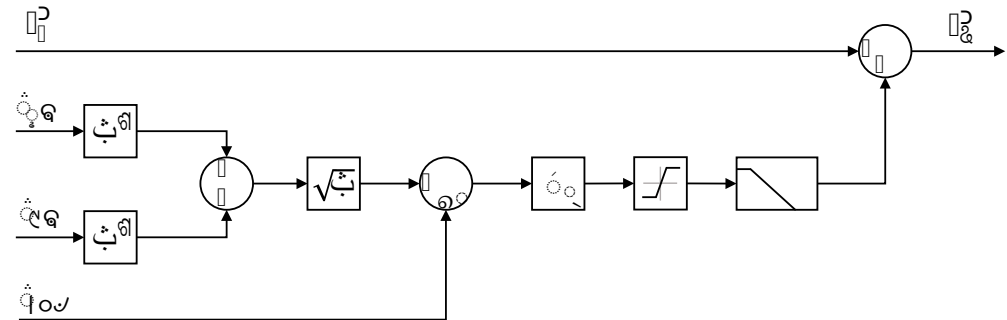
Frequenzregelung:

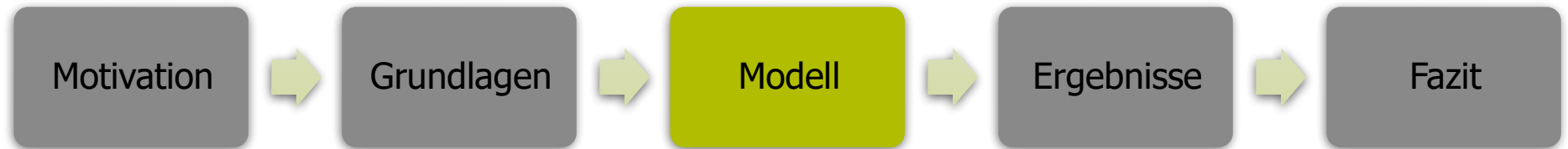
- Passt den Referenzwert der Wirkleistung für die Power-Set-Point Anpassung an
- Basiert auf dem Droop-Prinzip
- Regelt über die gemessene Frequenz



Power-Set-Point Anpassung:

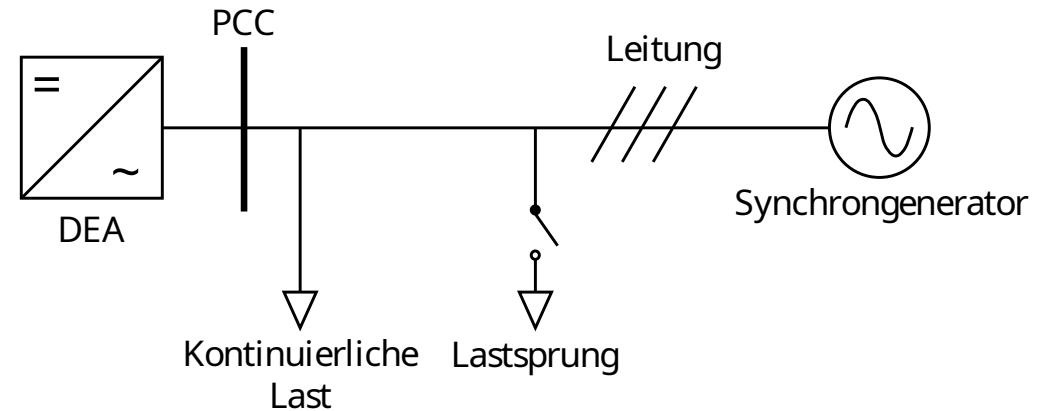
- Passt den Referenzwert aus der Frequenzregelung nochmals an
- Regelt über die Ströme und
- gibt an wie stark die Regelung den Referenzwert über den Strom anpasst





20-kV-Netz

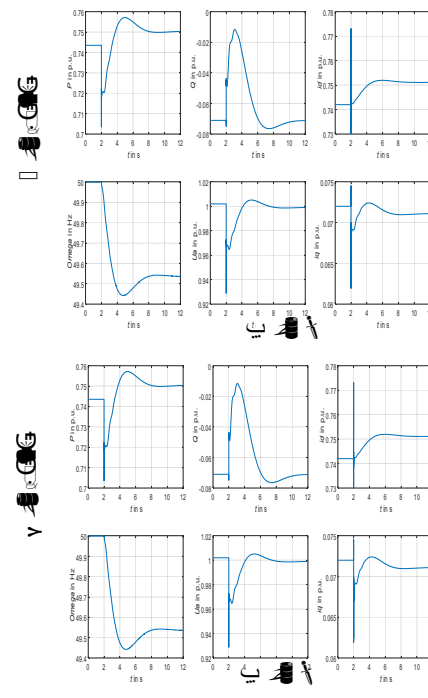
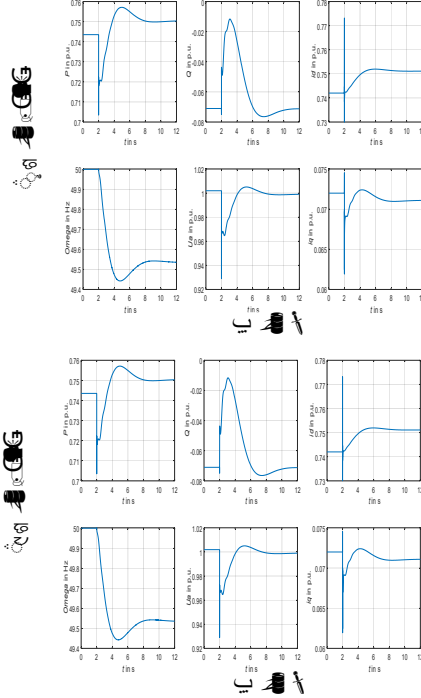
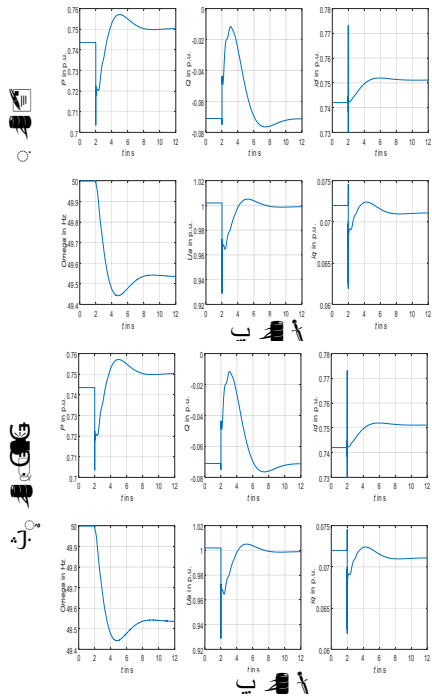
- DEA
 - Wechselrichter mit netzbildender Droop-Regelung
 - LC-Filter
- Kontinuierliche Last
- Lastsprung
- Leitung:
- Synchrongenerator



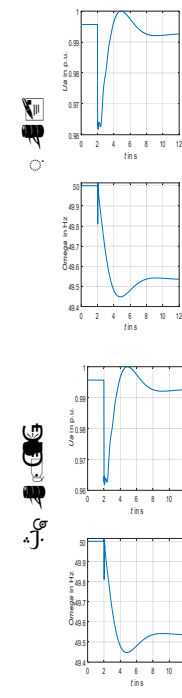
Modell

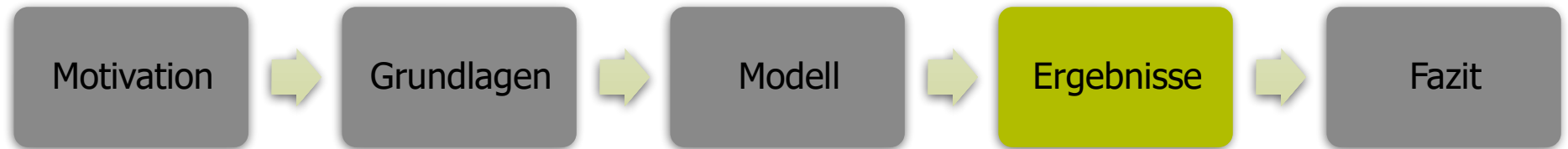
Referenzplots

DEA



PCC

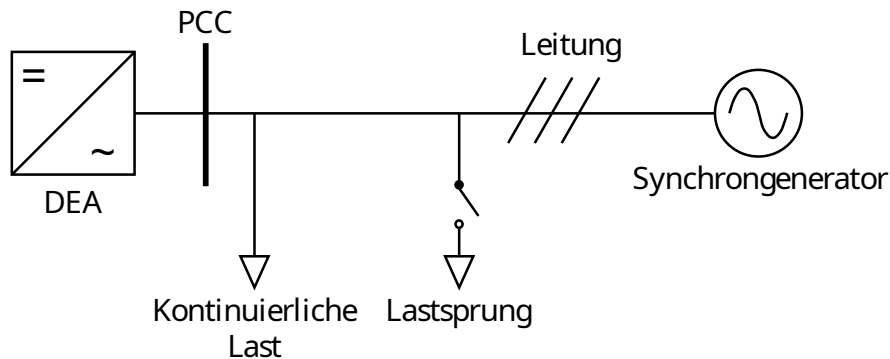




Ergebnisse

Testscenario: Netz

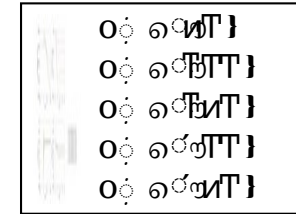
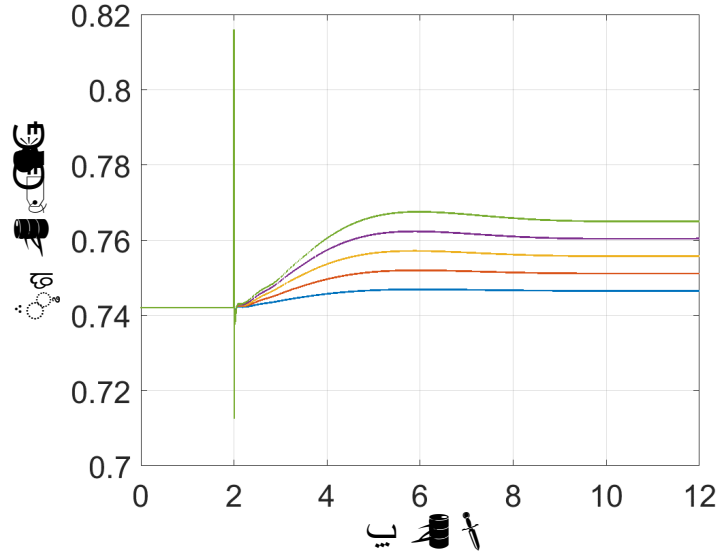
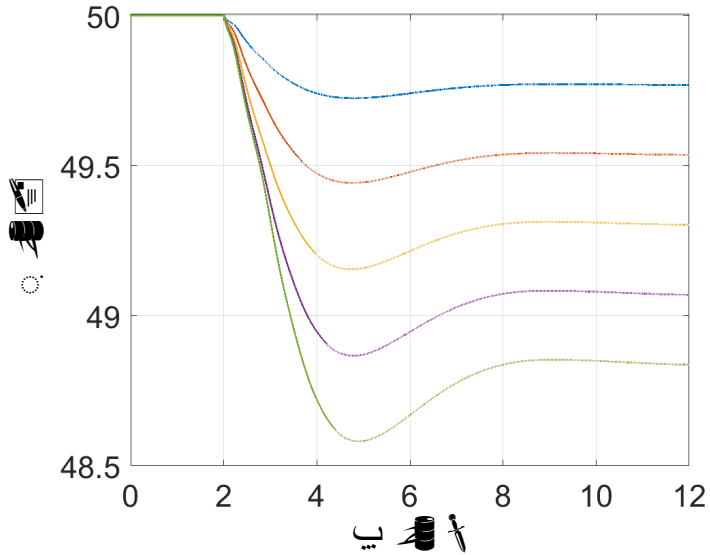
	Bezeichnung	Symbol	Standardwert	Variation	Einheit
Netz	Lastsprung		100	50-250	
SG	Trägheit		4	1-20	
	Turbinenzeitkonstante		0,3	0,05-0,5	
Leitung	Leitungslänge		50	1-100	
	R/X-Verhältnis		0,4	0,1-5	-
				16	-
DEA	P(f)-Droop Konstante		0,05	0,005-5	-
	Verstärkung Power-Setpoint Anpassung		40	20-80	-



Größe des Wirkleistungsungleichgewichts:

Ergebnisse

Variation Lastsprung



- RoCoF sowie quasistationärer Endwert sind proportional zum Lastsprung
- Nadir sinkt bei größerer Last

- Steigung nach dem Lastsprung sowie quasistationärer Endwert steigen mit der Last

$$RoCoF = \frac{\Delta P_L}{P_L} \frac{f_n}{2H}$$

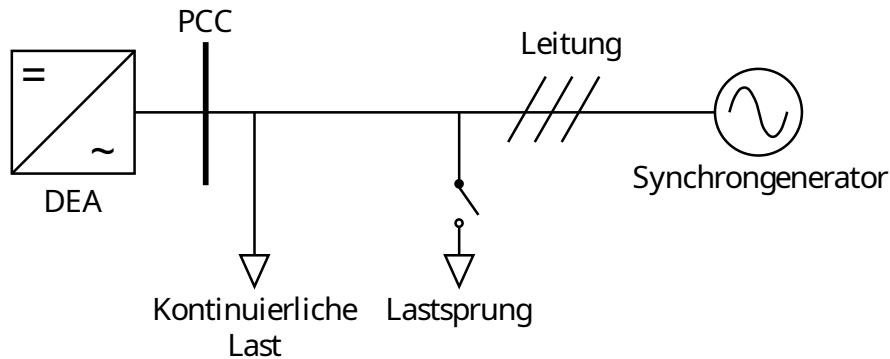
$$\Delta f_{qs} = \Delta P_L \cdot \frac{d_{pr}}{100\%}$$

➤ Auch bei sehr großen Ereignissen (großen Frequenzänderungen) bleibt die Regelung stabil

Ergebnisse

Testscenario: SG

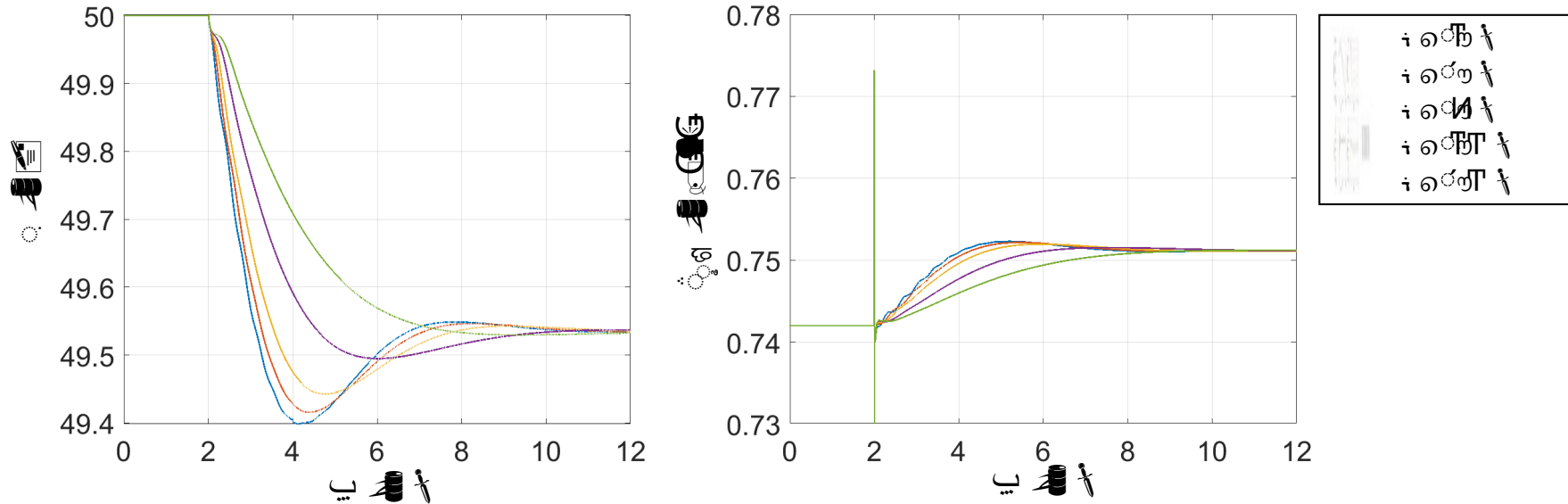
	Bezeichnung	Symbol	Standardwert	Variation	Einheit
Netz	Lastsprung		100	50-250	
SG	Trägheit		4	1-20	
	Turbinenzeitkonstante		0,3	0,05-0,5	
Leitung	Leitungslänge		50	1-100	
	R/X-Verhältnis		0,4	0,1-5	-
			16	-	
DEA	P(f)-Droop Konstante		0,05	0,005-5	-
	Verstärkung Power-Setpoint Anpassung		40	20-80	-



Größe der Trägheit des SG:

Ergebnisse

Variation Trägheit

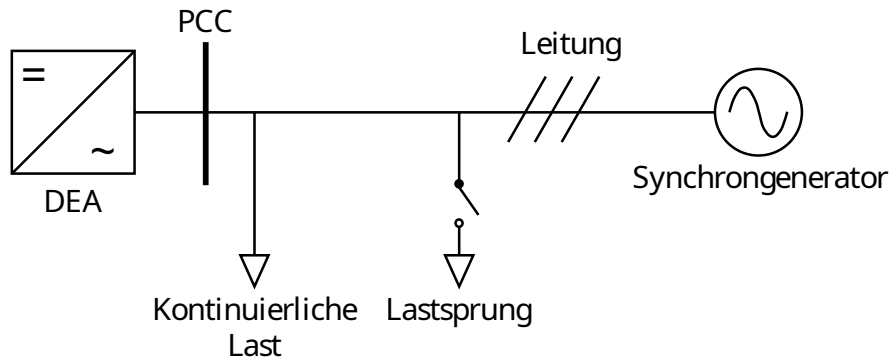


- Je geringer die Trägheit des SG desto schneller und stärker die Frequenzänderung
- Starke Beeinflussung des transienten Bereichs
- Bei großer Trägheit übernimmt der SG großen Teil der Frequenzregelung
- Netzbildende Regelung führt bei starken Netzen zu keinen Instabilitäten

Ergebnisse

Testscenario: Leitung

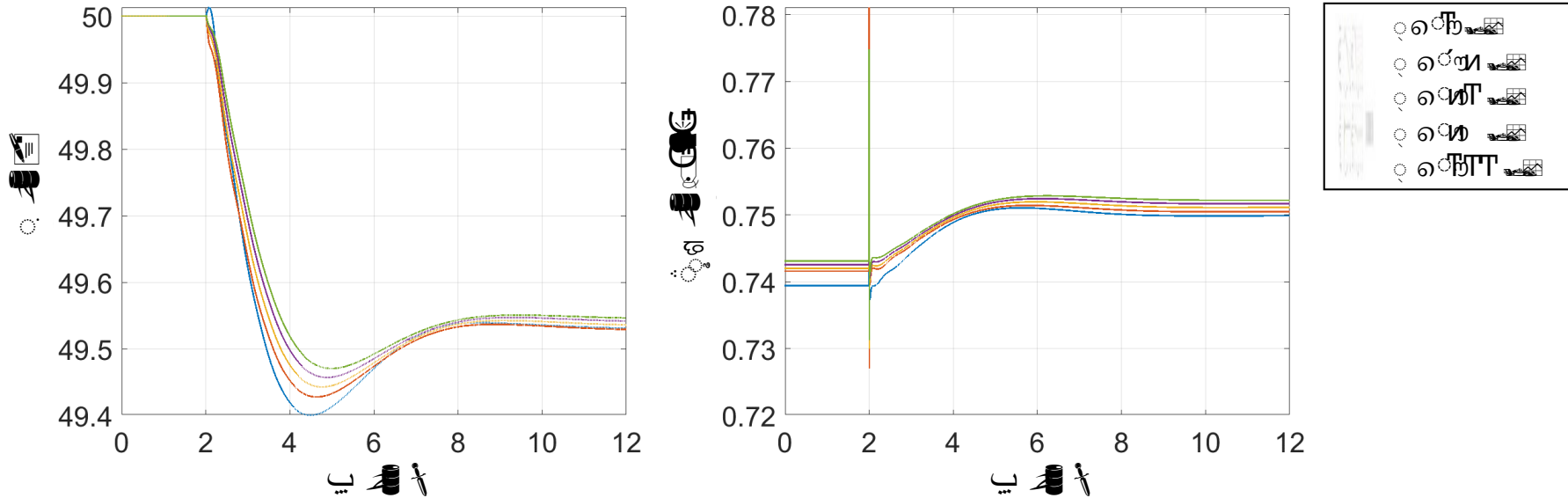
	Bezeichnung	Symbol	Standardwert	Variation	Einheit
Netz	Lastsprung		100	50-250	
SG	Trägheit		4	1-20	
	Turbinenzeitkonstante		0,3	0,05-0,5	
Leitung	Leitungslänge		50	1-100	
	R/X-Verhältnis		0,4	0,1-5	-
				16	-
DEA	P(f)-Droop Konstante		0,05	0,005-5	-
	Verstärkung Power-Setpoint Anpassung		40	20-80	-



Länge der Leitung:

Ergebnisse

Variation Leitungslänge

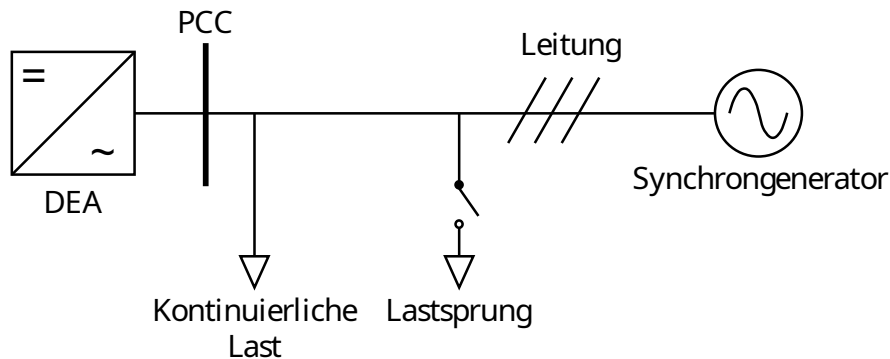


- Frequenz wird unkritischer mit steigender elektrischer Distanz des SG
- Interaktion zwischen Regelung des SG und der DEA verringert sich mit steigender Impedanz zwischen den beiden Komponenten

Ergebnisse

Testscenario: Leitung

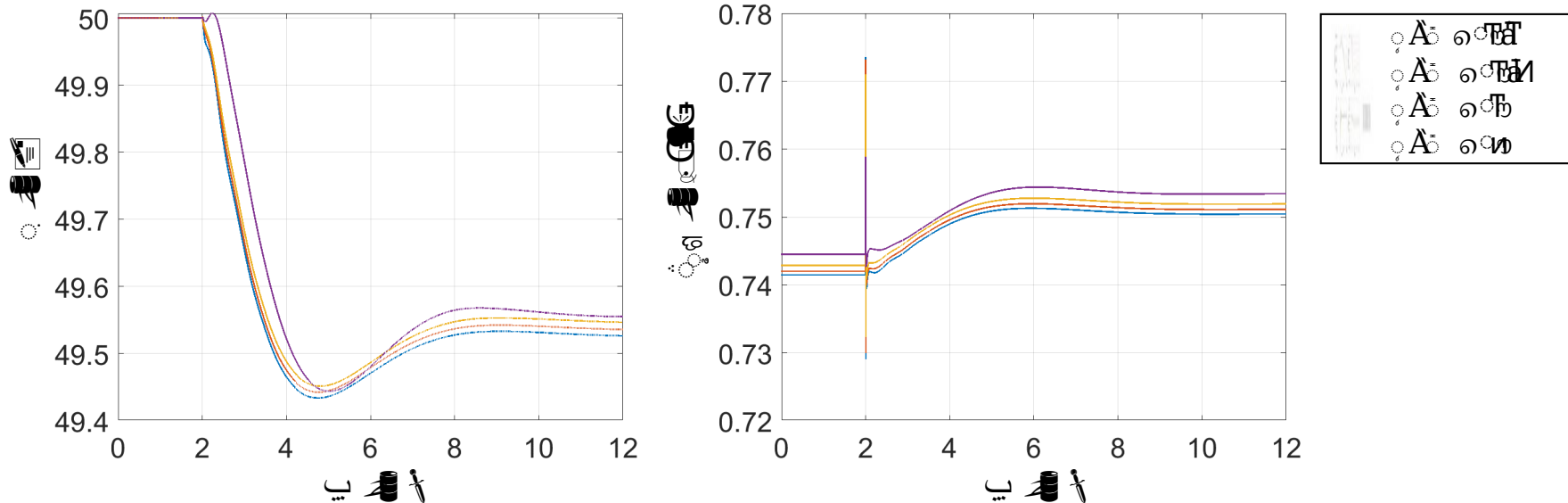
	Bezeichnung	Symbol	Standardwert	Variation	Einheit
Netz	Lastsprung		100	50-250	
SG	Trägheit		4	1-20	
	Turbinenzeitkonstante		0,3	0,05-0,5	
Leitung	Leitungslänge		50	1-100	
	R/X-Verhältnis		0,4	0,1-5	-
				16	-
DEA	P(f)-Droop Konstante		0,05	0,005-5	-
	Verstärkung Power-Setpoint Anpassung		40	20-80	-



R/X-Verhältnis der Leitung:

Ergebnisse

Variation R/X-Verhältnis

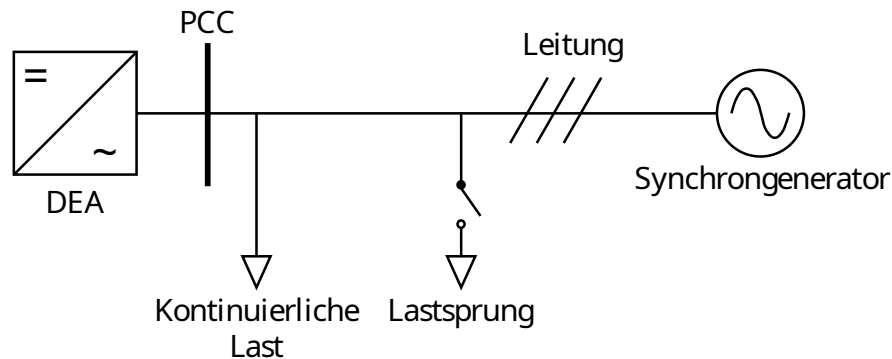


- Die Regelung funktioniert bei unterschiedlichen R/X-Verhältnissen obwohl sie auf der Entkopplung von P und Q basiert
- Instantane Reaktion bei induktiven Netzen geringer

Ergebnisse

Testscenario: DEA

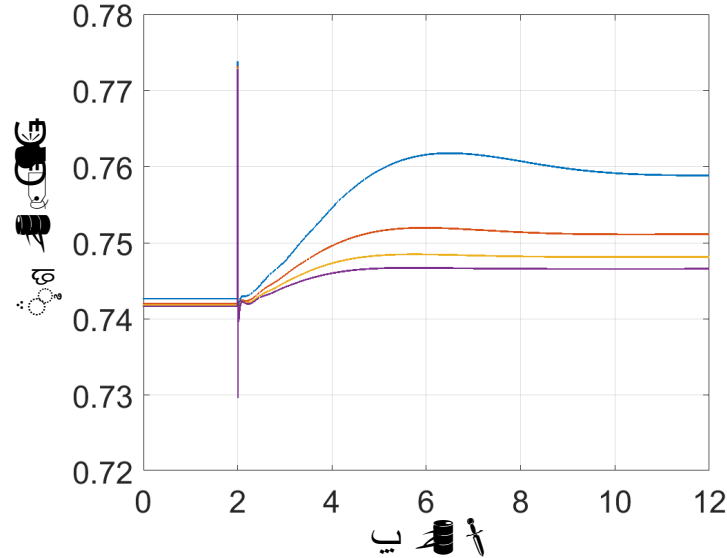
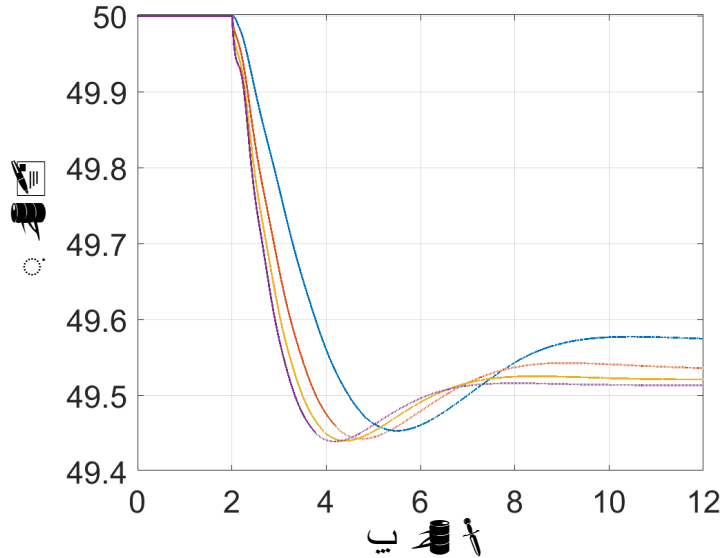
	Bezeichnung	Symbol	Standardwert	Variation	Einheit
Netz	Lastsprung		100	50-250	
	Trägheit		4	1-20	
SG	Turbinenzeitkonstante		0,3	0,05-0,5	
	Leitungslänge		50	1-100	
Leitung	R/X-Verhältnis		0,4	0,1-5	-
			16	-	
DEA	P(f)-Droop Konstante		0,05	0,005-5	-
	Verstärkung Power-Setpoint Anpassung		40	20-80	-



Größe der Verstärkung der Power-Setpoint Anpassung:

Ergebnisse

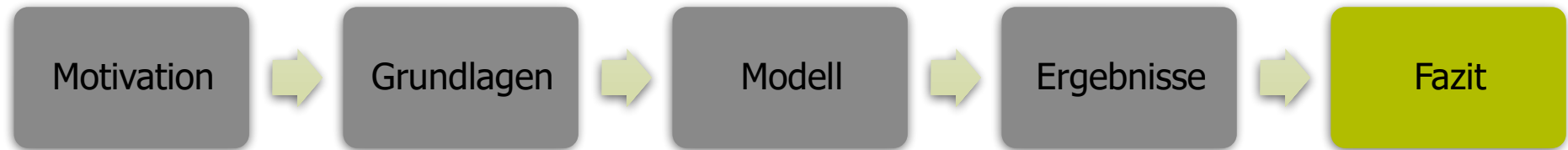
Variation Verstärkung



- RoCoF Steigt mit der Verstärkung
- Nadir nur minimal beeinflusst
- Quasistationärer Endwert sinkt

- Steigung sowie Endwert sinkt mit steigender Verstärkung

➤ Kein Proportionaler Zusammenhang zwischen Frequenzverlauf und Verstärkung der Power-Setpoint Anpassung



Untersuchen der netzbildenden Droop-Regelung



Funktionsfähiges Modell einer netzbildenden Droop-Regelung



Verschiedene Variationen getestet



Untersuchung weiterer Sensitivitäten

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

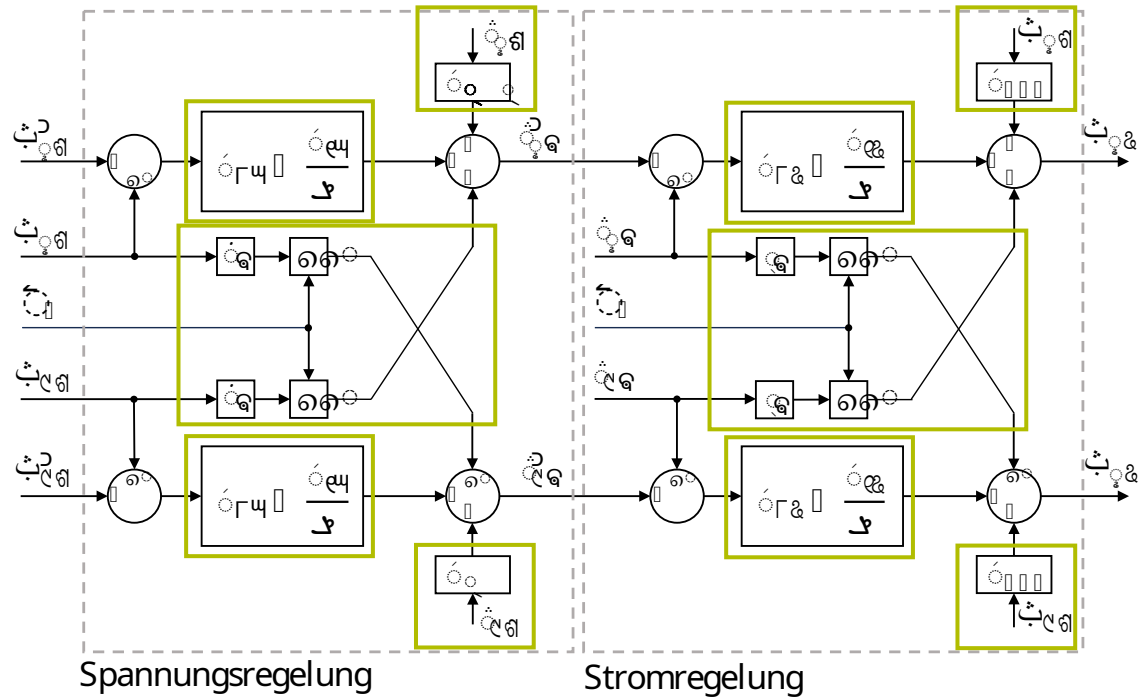


Spannungsregelung:

- PI-Regler
- crosscoupling
- Stromvorverstärkungsfaktor

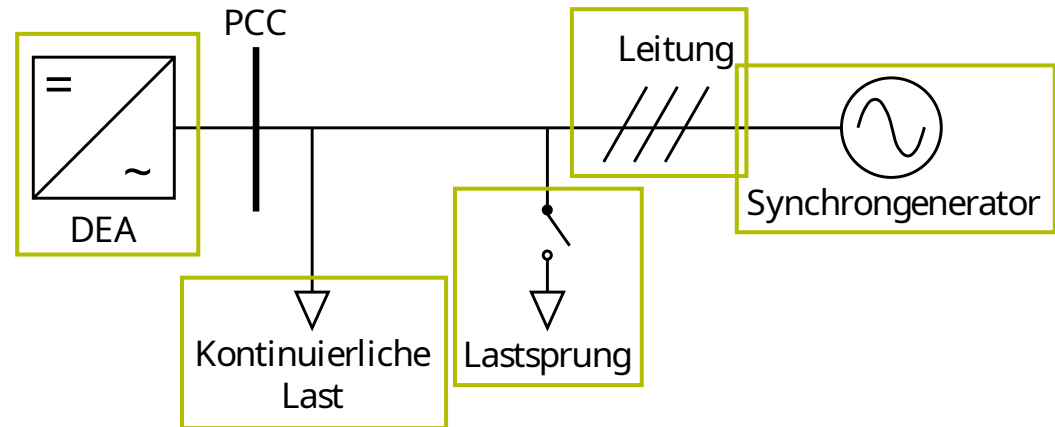
Stromregelung:

- PI-Regler
- crosscoupling
- Spannungsvorverstärkungsfaktor

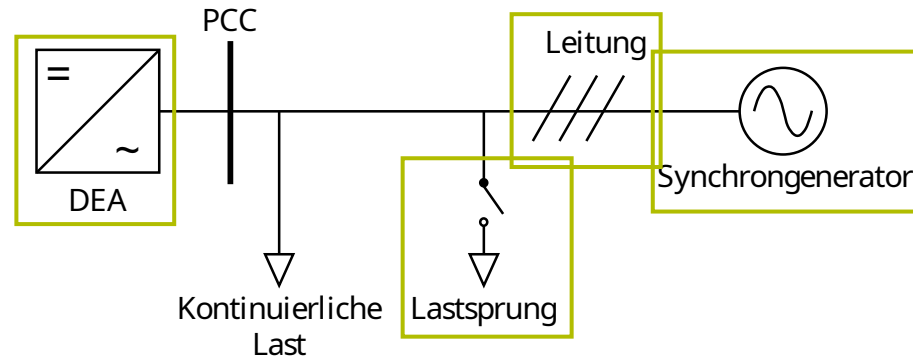


20-kV-Netz

- DEA
 - Wechselrichter mit netzbildender Droop-Regelung
 - LC-Filter
- Kontinuierliche Last
- Lastsprung
- Leitung:
- Synchrongenerator



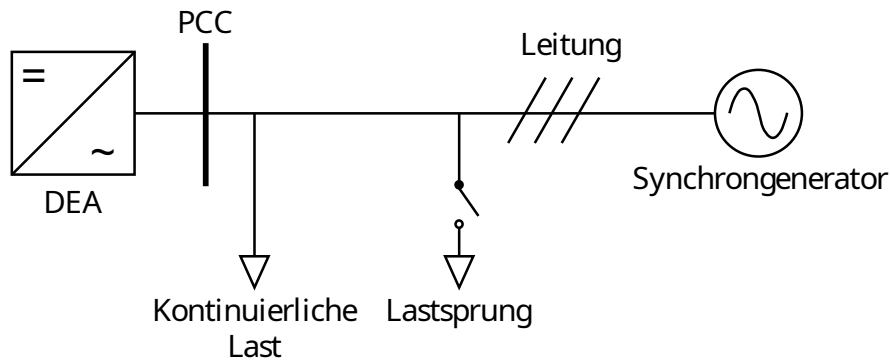
	Bezeichnung	Symbol	Standardwert	Variation	Einheit
Netz	Lastsprung		100	50; 100; 150; 200; 250	
SG	Trägheit		4	1; 2; 4; 10; 20	
	Turbinenzeitkonstante		0,3	0,05; 0,1; 0,3; 0,5	
Leitung	Leitungslänge		50	1; 25; 50; 75; 100	
	R/X-Verhältnis		0,4	0,1; 0,4; 1; 5	-
			16	-	
DEA	P(f)-Droop Konstante		0,05	0,005; 0,05; 0,5; 5	-
	Verstärkung Power-Set-Point Anpassung		40	20; 40; 60; 80	-



Ergebnisse

Testscenario: SG

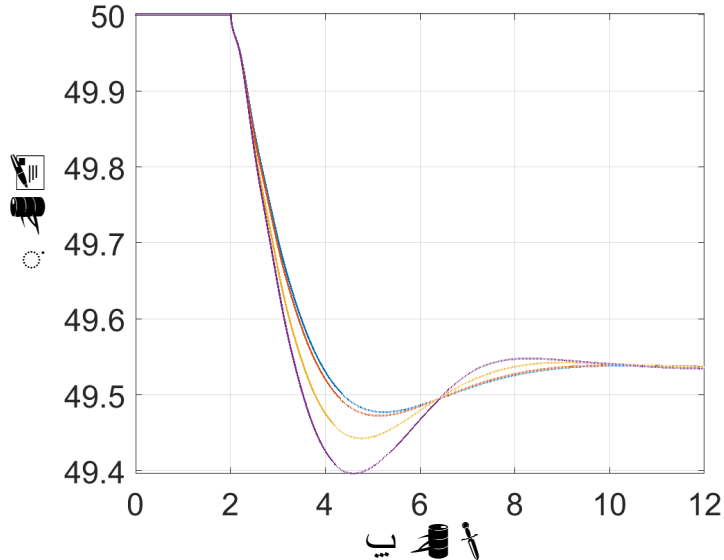
	Bezeichnung	Symbol	Standardwert	Variation	Einheit
Netz	Lastsprung		100	50-250	
SG	Trägheit		4	1-20	
	Turbinenzeitkonstante		0,3	0,05-0,5	



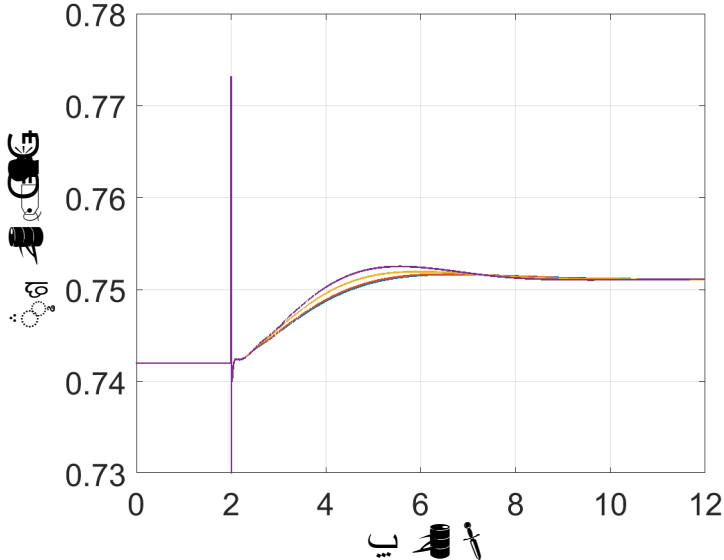
Größe der turbinenzeitkonstante des SG:

Ergebnisse

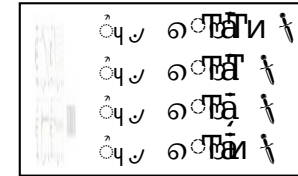
Variation Turbinenzeitkonstante



- Beeinflusst transienten Bereich mäßig
- Quasistationärer Endwert konstant
- Nadir sinkt mit größerer Trägheit



- Geringer Einfluss auf den Bereich nach dem Lastsprung
- Konstanter Endwert

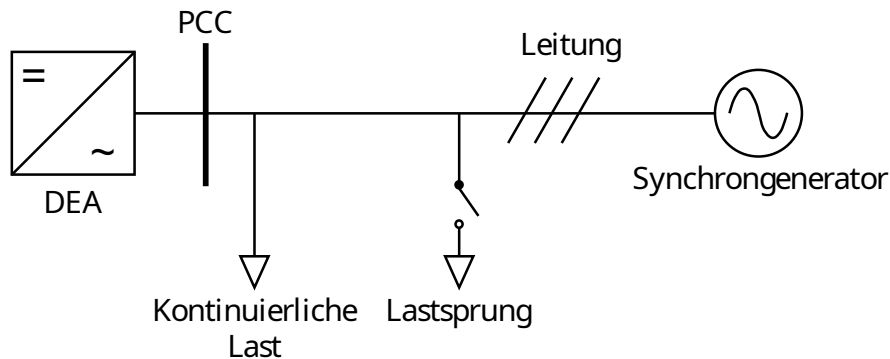


➤ Beeinflussung betrifft hauptsächlich den Nadir durch Verzögern der Primärregelung des SG

Ergebnisse

Testszenario: DEA

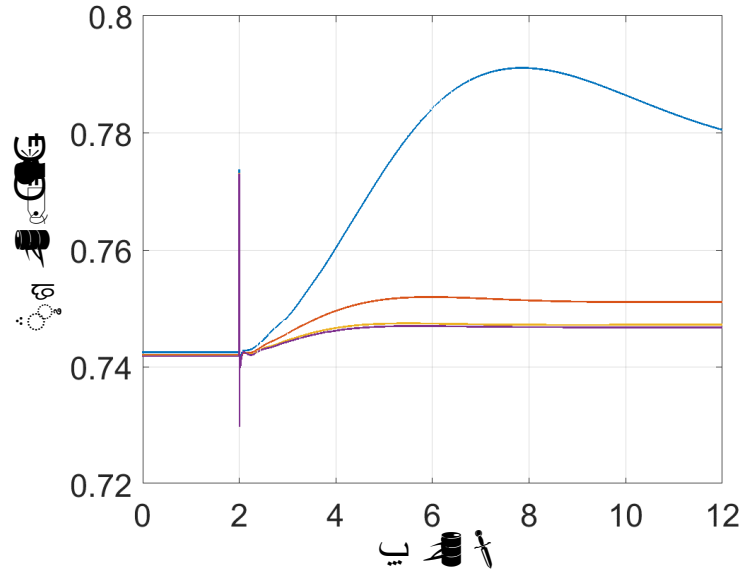
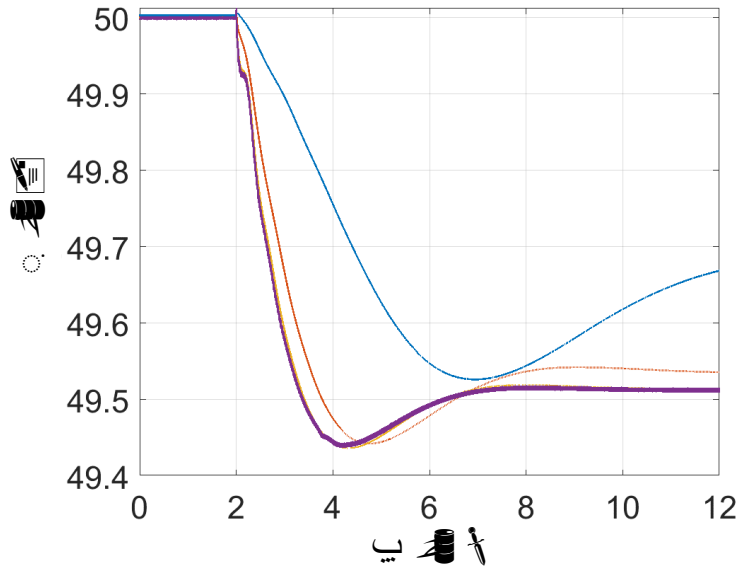
	Bezeichnung	Symbol	Standardwert	Variation	Einheit
Netz	Lastsprung		100	50-250	
SG	Trägheit		4	1-20	
	Turbinenzeitkonstante		0,3	0,05-0,5	
Leitung	Leitungslänge		50	1-100	
	R/X-Verhältnis		0,4	0,1-5	-
				16	-
DEA	P(f)-Droop Konstante		0,05	0,005-5	-



Größe der P(f)-Droop Konstante:

Ergebnisse

Variation Droop-Konstante



- RoCoF steigt mit größerem Droop
- Nadir und quasistationärer Endwert sinken mit steigender Droop-Konstante

- Steigung und Endwert sinken mit steigender Droop-Konstante

- Großer Einfluss der Regelung bei kleiner Droop-Konstante
- Kleine Stromanpassung bei großen Droop-Konstanten