

Vergleich transienter Frequenzschätzverfahren zur Auswertung des Frequenzgradienten in aktiven Verteilnetzen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Anna Pfendler, [Rafael Steppan](#), Jutta Hanson

17. Symposium Energieinnovation (EnInnov) 2022
(C) Zukunftsfähige Verteilnetze und Flexibilität

17. Februar 2022



Elektrische
Energieversorgung
unter Einsatz
Erneuerbarer Energien

- 1 Motivation
- 2 Frequenzschätzverfahren
- 3 Modellierung
- 4 Bewertungskriterien
- 5 Ergebnisse Referenzfall
- 6 Sensitivitätsanalyse
- 7 Fazit

1 Motivation

2 Frequenzschätzverfahren

3 Modellierung

4 Bewertungskriterien

5 Ergebnisse Referenzfall

6 Sensitivitätsanalyse

7 Fazit

Konventionelle Kraftwerke

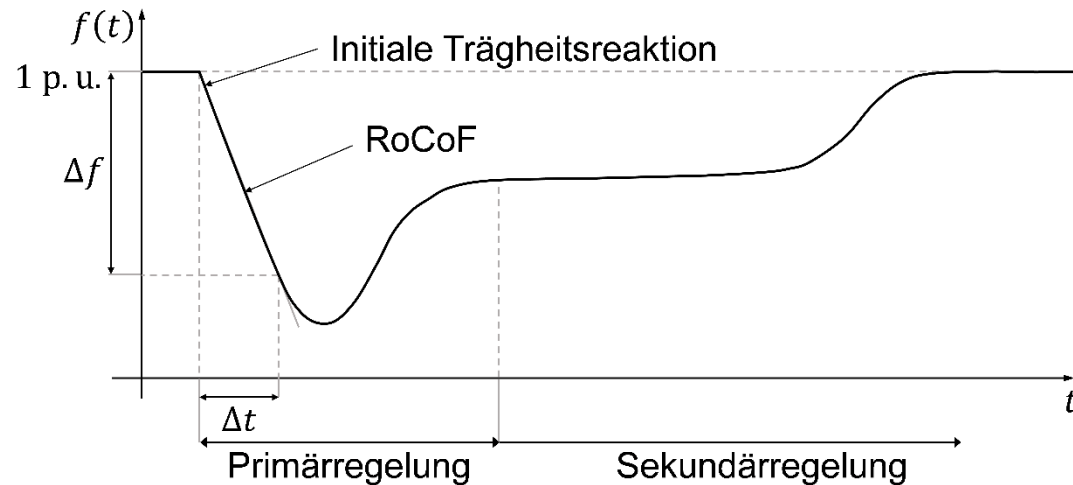
- Netzkopplung über SG
 - Messbare mechanische Frequenz (Rotation)



Erneuerbare Energien Anlagen

- Reduzierte Systemträgheit
- Netzkopplung über Umrichter
 - Frequenz nicht messbar, deshalb Schätzung

- Regelung der Netzfrequenz für Systemstabilität
- Transienter Zeitbereich



1 Motivation

2 Frequenzschätzverfahren

2.1 Phase-Locked Loop

2.2 Zero-Crossing-Verfahren

2.3 Rekursives Gauß-Newton-Verfahren

3 Modellierung

4 Bewertungskriterien

5 Ergebnisse Referenzfall

6 Sensitivitätsanalyse

7 Fazit

- 1 Motivation
- 2 Frequenzschätzverfahren

2.1 Phase-Locked Loop

2.2 Zero-Crossing-Verfahren

2.3 Rekursives Gauß-Newton-Verfahren

- 3 Modellierung
- 4 Bewertungskriterien
- 5 Ergebnisse Referenzfall
- 6 Sensitivitätsanalyse
- 7 Fazit

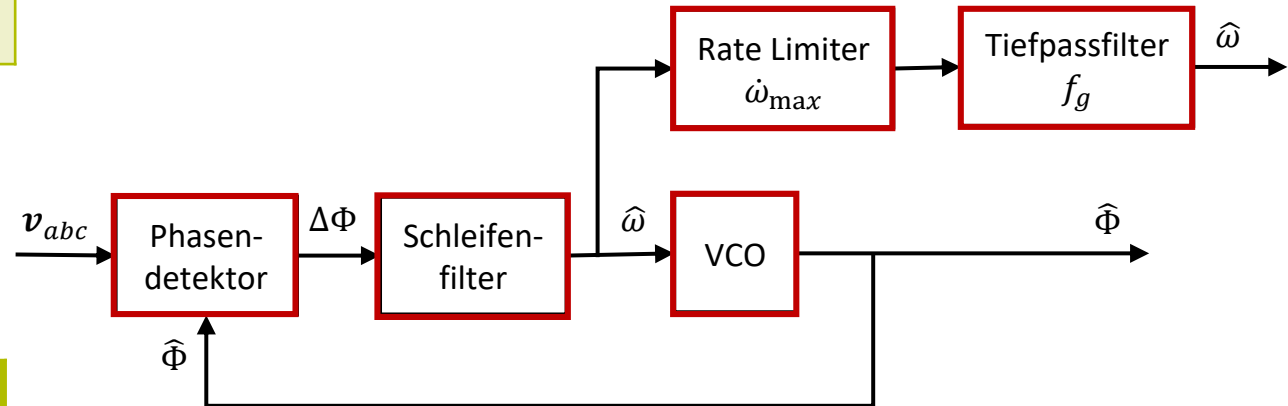
Frequenzschätzverfahren

Phase-Locked Loop

Regelkreis

- Hauptaufgabe: Synchronisierung von Umrichtern mit Netz
- Erweitert durch Steigungsbegrenzung (Rate Limiter) und Tiefpassfilter

v_{abc} : Dreiphasige Netzspannung
 $\hat{\Phi}$: Geschätzter Spannungswinkel
 $\hat{\omega}$: Geschätzte Kreisfrequenz



Einstellbare Parameter

$k_p, k_i, k_d, \dot{\omega}_{max}, f_g$

- 1 Motivation
- 2 Frequenzschätzverfahren
 - 2.1 Phase-Locked Loop
 - 2.2 Zero-Crossing-Verfahren
 - 2.3 Rekursives Gauß-Newton-Verfahren
- 3 Modellierung
- 4 Bewertungskriterien
- 5 Ergebnisse Referenzfall
- 6 Sensitivitätsanalyse
- 7 Fazit

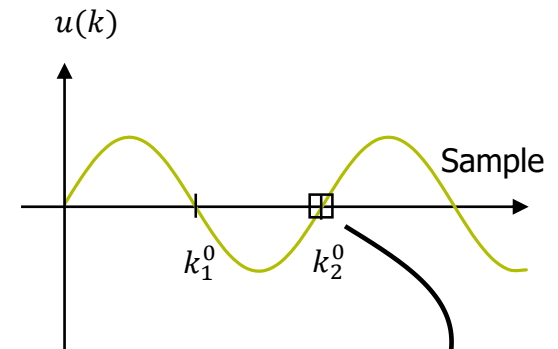
Frequenzschätzverfahren

Zero-Crossing-Verfahren (ZC)

- Anzahl Abtastwerte zwischen Nulldurchgängen zählen
- Daraus wird Frequenz bestimmt:

$$\hat{f} = \frac{f_s}{2(k_2^0 - k_1^0)}$$

Mit f_s : Abtastfrequenz, k_N^0 : Zeitposition des N -ten Nulldurchgangs



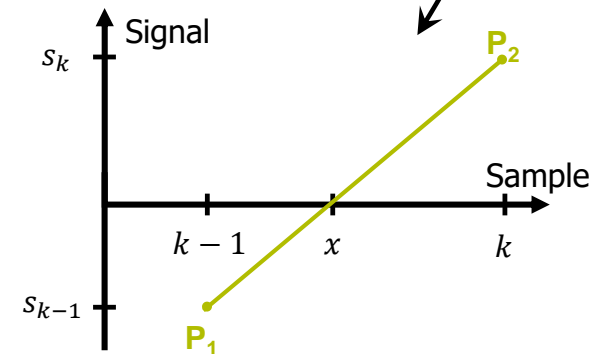
- Quantisierungsfehler reduzieren durch Interpolation

$$x = k - \frac{s_k}{s_k - s_{k-1}}$$

Mit k : Sample, s_n : Signalwert von Sample n , x : verbesserter Nulldurchgang

Einstellbare Parameter

$$\dot{\omega}_{\max}, f_g$$



- 1 Motivation
- 2 Frequenzschätzverfahren
 - 2.1 Phase-Locked Loop
 - 2.2 Zero-Crossing-Verfahren

2.3 Rekursives Gauß-Newton-Verfahren

- 3 Modellierung
- 4 Bewertungskriterien
- 5 Ergebnisse Referenzfall
- 6 Sensitivitätsanalyse
- 7 Fazit

Frequenzschätzverfahren

Rekursives Gauß-Newton-Verfahren (RGN)

Nicht-rekursives Verfahren

- $y_{\text{est}}(\mathbf{x}) = y_{\text{est}}(A(t), \omega(t), \phi(t))$
 $= A(t) \sin(\omega(t) \cdot t + \phi(t))$
 - Methode der kleinsten Fehlerquadrate
 - Parametervektor suchen, der Zielfunktion minimiert
 - Zielfunktion: $F(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (f_i(\mathbf{x}))^2$
- Mit $f(\mathbf{x}) = y_{\text{est}}(\mathbf{x}) - y_{\text{meas}}$
- Iterativ: Abbruchkriterium bei erreichter Genauigkeit $F(\mathbf{x}) < \epsilon$ oder maximale Anzahl Iterationen



Rekursives Verfahren

- Keine Matrixinversion notwendig
 - Gespeicherte Werte nur aus letztem Zeitschritt

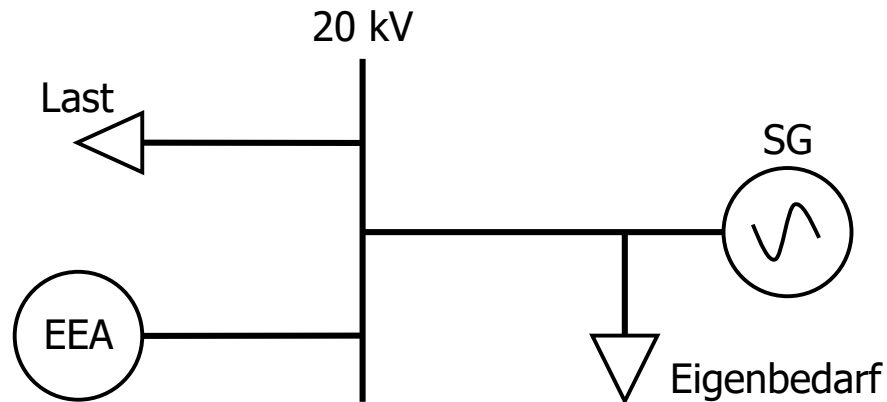
Einstellbare Parameter

RGN	$\mathbf{x}_0, \mathbf{P}_0, \lambda_k, \dot{\omega}_{\text{max}}, f_g$
-----	---

- 1 Motivation
- 2 Frequenzschätzverfahren
- 3 Modellierung
- 4 Bewertungskriterien
- 5 Ergebnisse Referenzfall
- 6 Sensitivitätsanalyse
- 7 Fazit

Simulink-Modell

- Testbench in Matlab/Simulink
 - Synchrongenerator (SG)
 - Erneuerbare Energien Anlage (EEA)
 - Last
- Lastsprung bei $t = 0s$ für Untersuchung des transienten Zeitbereichs



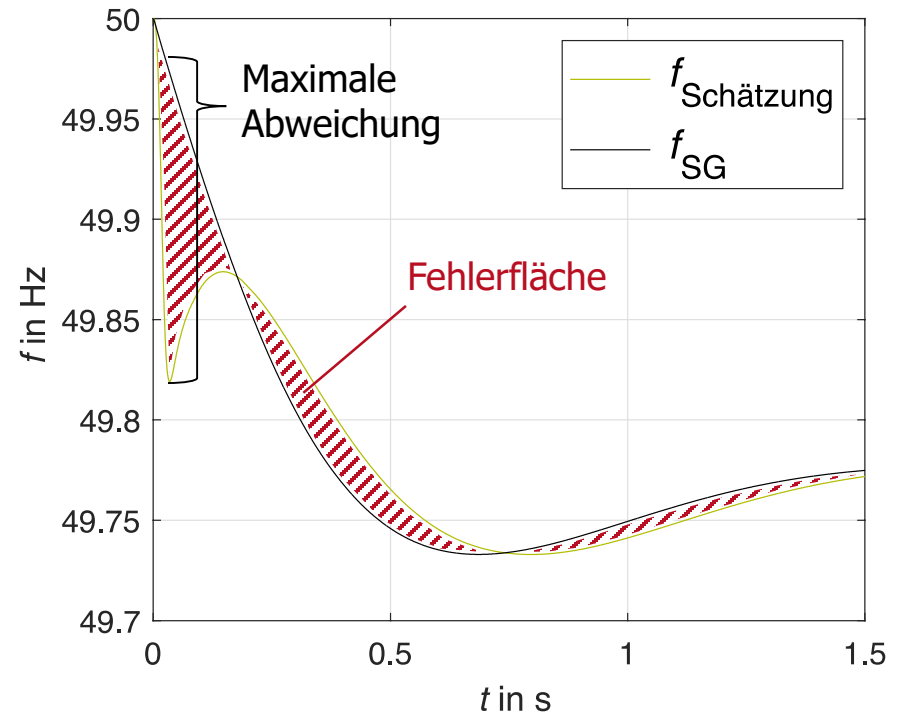
Dimensionierung

SG	10 MVA
EEA	1 MVA
Grundlast	5 MVA
Lastsprung	3 MVA

- 1 Motivation
- 2 Frequenzschätzverfahren
- 3 Modellierung
- 4 **Bewertungskriterien**
- 5 Ergebnisse Referenzfall
- 6 Sensitivitätsanalyse
- 7 Fazit

Vorgaben

- Technische Anwendungsregel fordert Genauigkeit
 - Stationärer Betrieb ± 10 mHz
 - Transienter Bereich ± 50 mHz
- Hauptkriterium
 - Geringe maximale Abweichung im Vergleich zur Generatorfrequenz
- Nebenkriterien
 - Geringe Fehlerfläche
 - Glattheit des Frequenzverlaufs



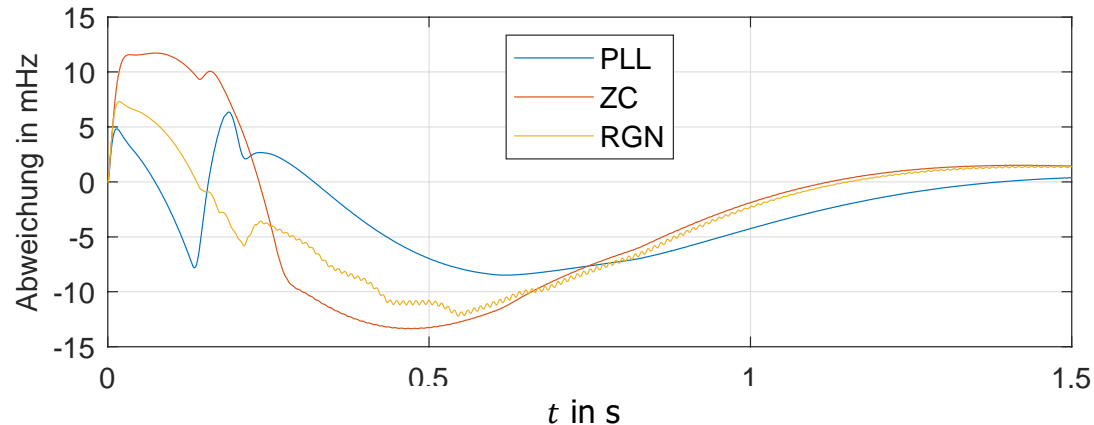
- 1 Motivation
- 2 Frequenzschätzverfahren
- 3 Modellierung
- 4 Bewertungskriterien

- 5 **Ergebnisse Referenzfall**

- 6 Sensitivitätsanalyse
- 7 Fazit

- Referenzfall: Lastsprung 3 MVA bei $t = 0s$
- Bestmögliche Ergebnisse
 - Optimierung der Verfahrens-Parameter hinsichtlich geringster max. Abweichung

- Genaueste Schätzung: **PLL** mit maximaler Abweichung von 8,384 mHz



Zwischenfazit

- Sehr gute Ergebnisse für optimal eingestellte Verfahren
- Maximale Abweichung < 50 mHz
 - Beste Ergebnisse mit PLL



Robustheit der Verfahren:
Ergebnisse bei Änderung einer Eingangsgröße?

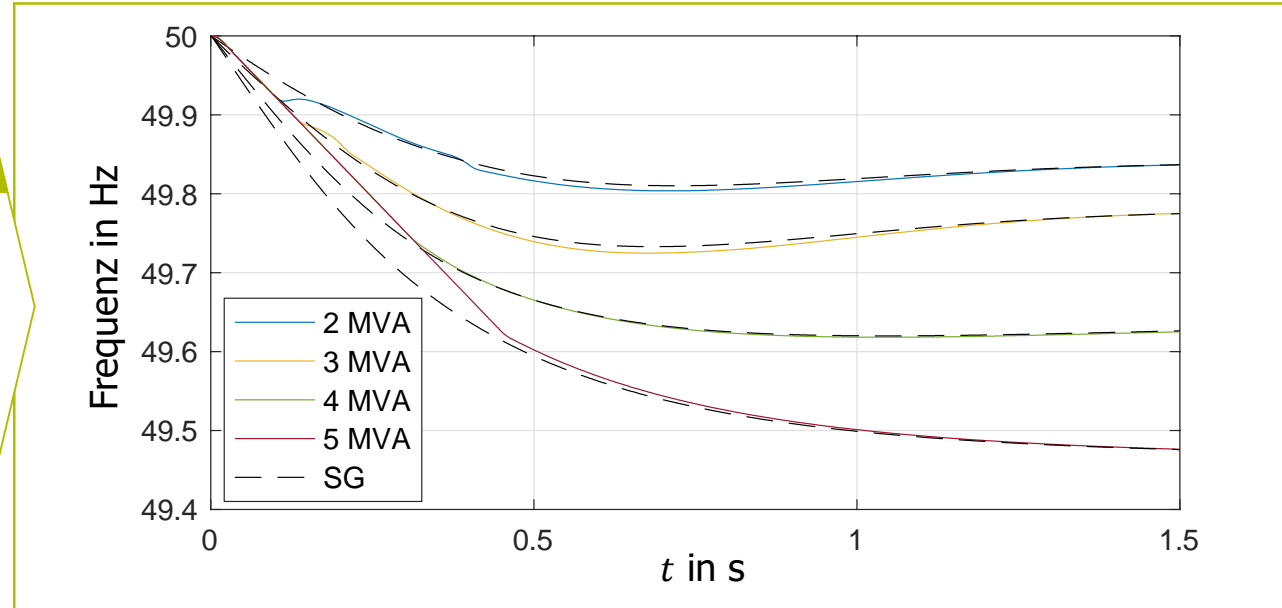
- 1 Motivation
 - 2 Frequenzschätzverfahren
 - 3 Modellierung
 - 4 Bewertungskriterien
 - 5 Ergebnisse Referenzfall

 - 6 Sensitivitätsanalyse

- 7 Fazit

Sensitivitätsanalyse

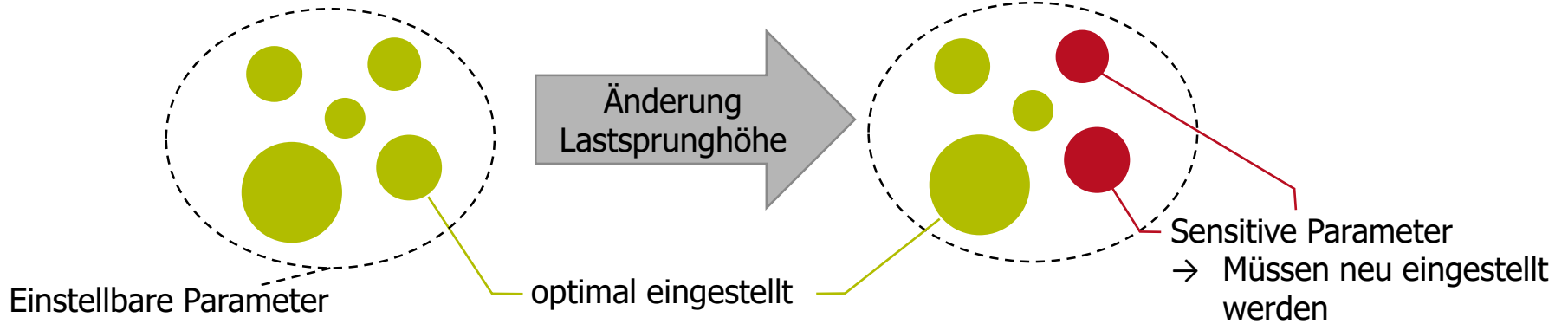
- Verfahren optimal eingestellt für 3 MVA
- Ergebnisse bei gleicher Einstellung und verschiedenen Lastsprüngen



Wie viele Parameter müssen für optimale Schätzergebnisse angepasst werden?

Sensitivitätsanalyse

Sensitive Parameter



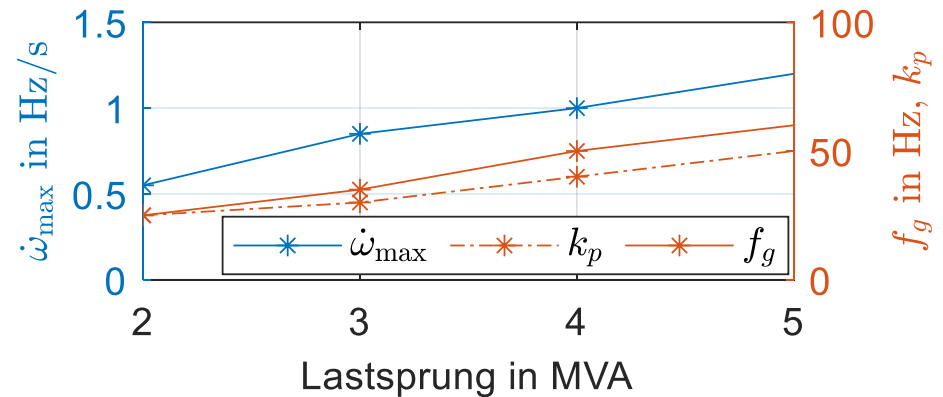
Verfahren	Einstellbare Parameter	Sensitive Parameter
PLL	$\dot{\omega}_{\max}, f_g, k_p, k_i, k_d$	$\dot{\omega}_{\max}, f_g, k_p$
ZC	$\dot{\omega}_{\max}, f_g$	$\dot{\omega}_{\max}, f_g$
RGN	$\dot{\omega}_{\max}, f_g, \mathbf{x}_0, \mathbf{P}_0, \lambda_k$	

- Optimale Einstellung der Verfahren für Lastsprünge 2 ... 5 MVA
 - Zusammenhang zwischen Parameterwert und Höhe des Lastsprungs

Zusammenhänge

- Bei allen Verfahren Linearer Zusammenhang
 - Rate Limit $\dot{\omega}_{\max}$
 - Grenzfrequenz des Tiefpassfilters f_g
 - Reglerparameter k_p

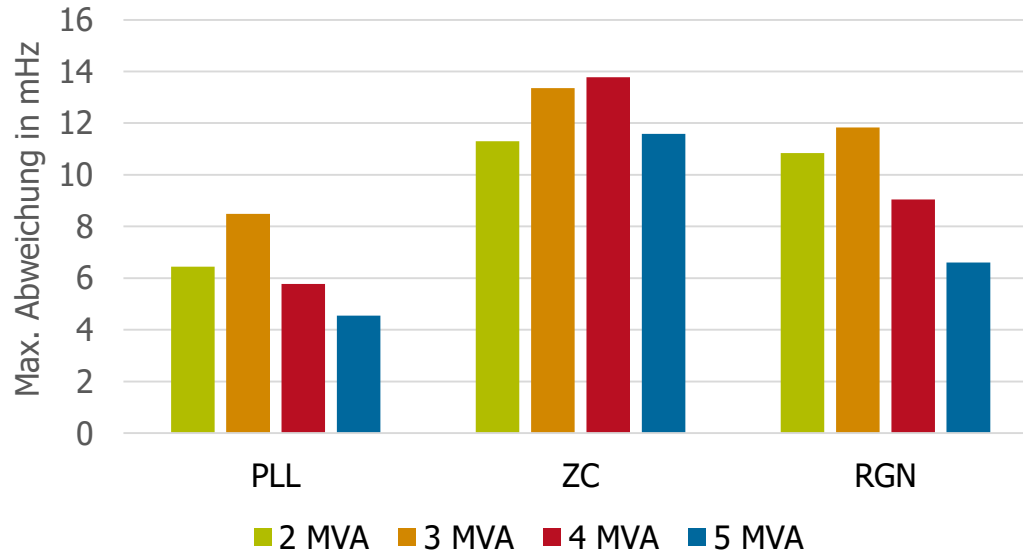
Beispiel: PLL



Sensitivitätsanalyse

Vergleich der Verfahren

Sensitivitätsanalyse



- Genaueste Ergebnisse mit PLL
- Robusteste Schätzung mit ZC

Agenda

- 1 Motivation
 - 2 Frequenzschätzverfahren
 - 3 Modellierung
 - 4 Bewertungskriterien
 - 5 Ergebnisse Referenzfall
 - 6 Sensitivitätsanalyse
-
- 7 Fazit
-

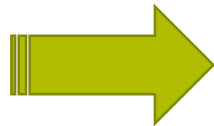
Fazit

- Mit allen Verfahren geforderte Genauigkeit erreicht
 - Genaueste Schätzung: PLL
 - Robusteste Schätzung: ZC
 - Optimale Einstellung der Parameter notwendig



- Linearer Zusammenhang der Parameter zur Lastsprunghöhe
 - Im realen System nicht anwendbar

Ausblick



- Test in komplexerem Modell notwendig
- Weitere Einflussgrößen identifizieren

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Für Fragen stehe ich gerne zur Verfügung!



Rafael Steppan, M.Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Technische Universität Darmstadt
Institut Elektrische Energiesystem
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter
Einsatz Erneuerbarer Energien (E5)

rafael.steppan@e5.tu-darmstadt.de
www.e5.tu-darmstadt.de