

---

# NETZSTABILITÄT ALS HERAUSFORDERUNG IN DER ENERGIEWENDE

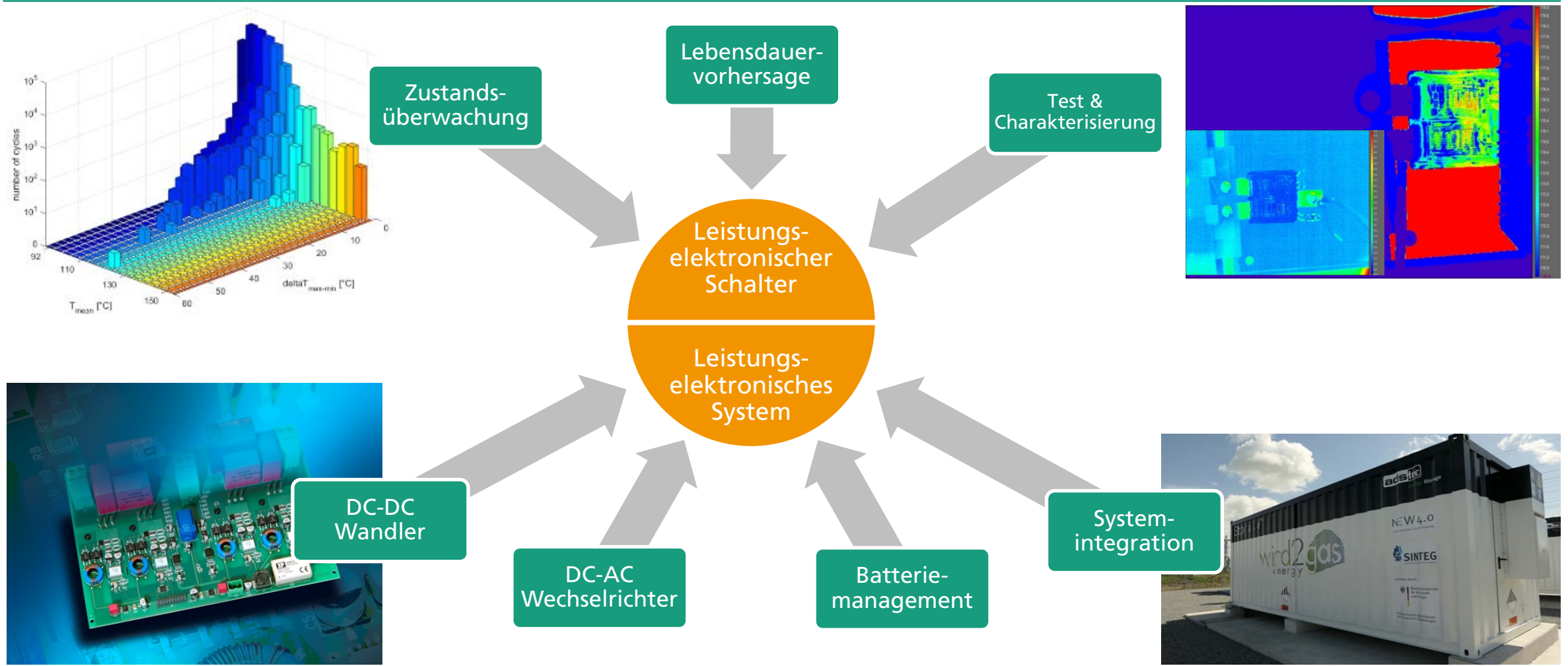
Dr.-Ing. Georg Pangalos

Leistungselektronik für Regenerative Energiesysteme

---



# KOMPETENZEN



# SPANNUNGSQUALITÄT

## IN NETZEN MIT ERNEUERBAREN ENERGIEQUELLEN

### Erneuerbare Energieträger:

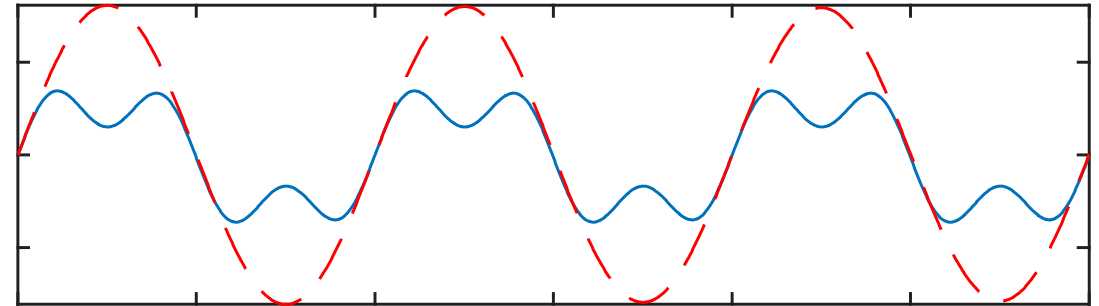
- Verteilt, nicht planbar und nicht jederzeit verfügbar.
- Leistungselektronische Systeme werden zur Anbindung an das Stromnetz eingesetzt.



[pixabay.com, CC0]

### Spannungsqualität:

- Ungleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch führt zu Frequenzschwankungen.
- Oberwellen werden ins Stromnetz eingespeist.



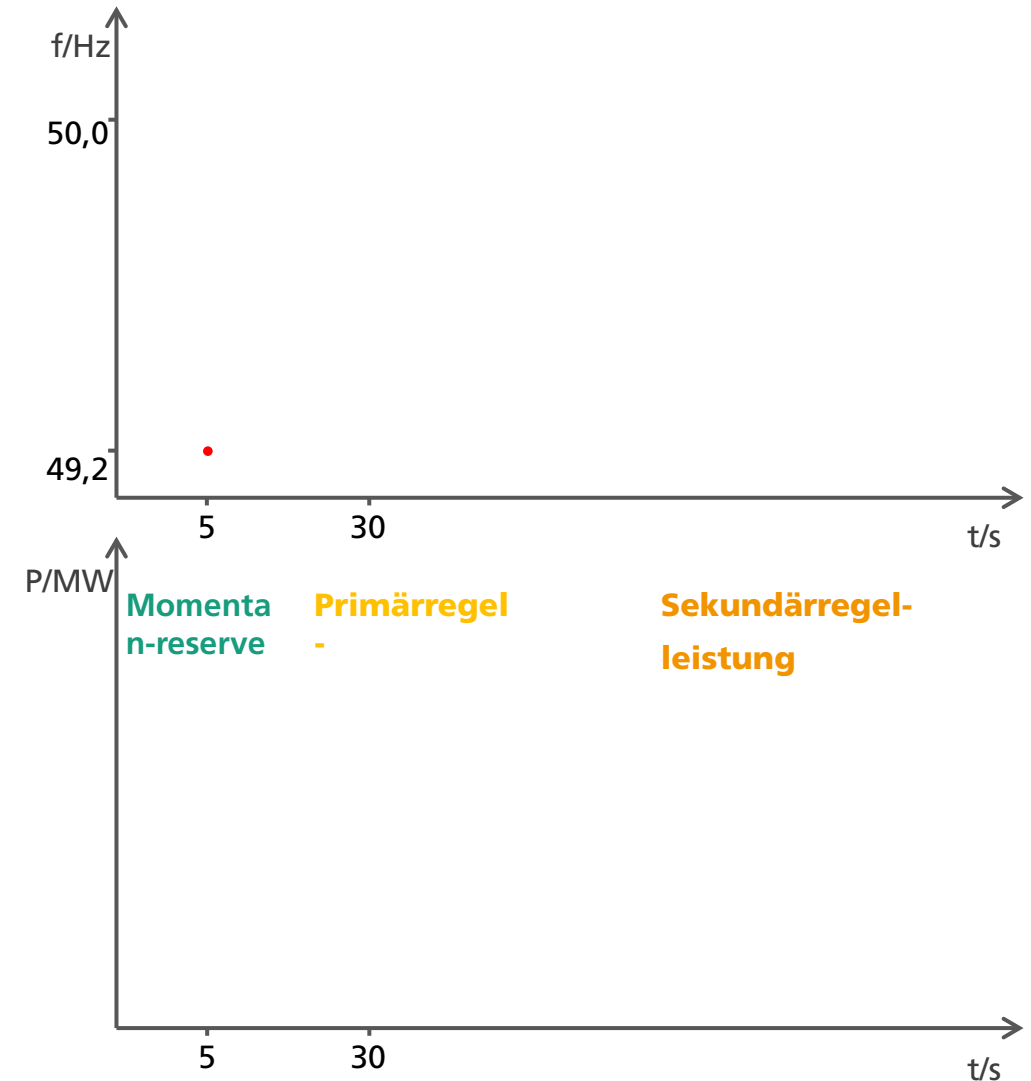
[Liang, 2016]

# TEIL I: FREQUENZSTABILITÄT

# FREQUENZSTABILITÄT

## Was passiert bei einem Kraftwerksausfall?

- Momentanreserve bremst den Abfall der Frequenz
- Primärregelleistung bringt die Frequenz auf eine gleichbleibende Abweichung
- Sekundärregelleistung bringt die Frequenz zurück auf ihren Sollwert
- Momentanreserve wird aktuell vorwiegend durch Schwungmasse thermischer Kraftwerke bereitgestellt
- Je mehr Erneuerbare, desto größer die Netzfrequenzänderungen

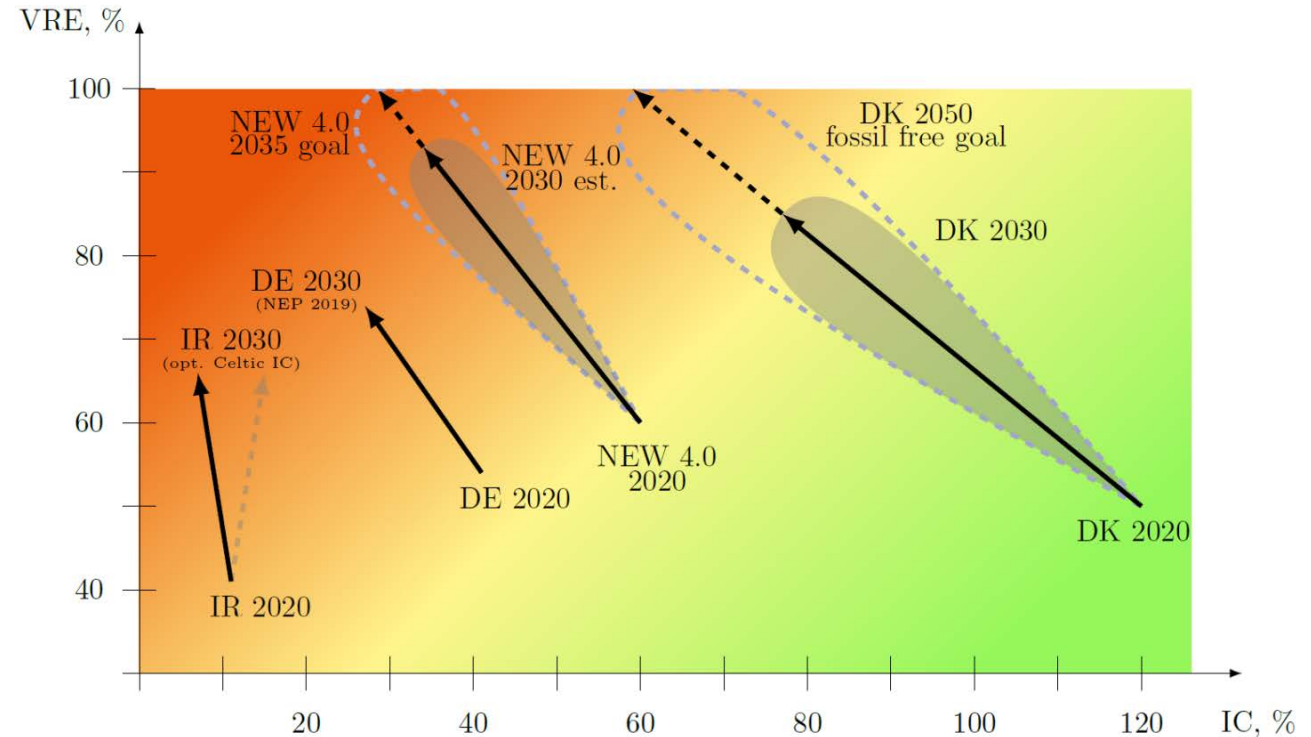


# FREQUENZSTABILITÄT

## DRINGLICHKEIT DER BEREITSTELLUNG VON MOMENTANRESERVE

### Wo und wann wird es benötigt?

- In Regionen mit hohem Anteil an Erneuerbaren (VRE %) und geringer Kuppelkapazität (IC %)
- Bereitstellung von Momentanreserve durch andere Technologien ist erforderlich
- Andere Länder haben bereits angefangen



---

# FREQUENZSTABILITÄT

BEDARF AN MOMENTANRESERVE IN HH & SH 2030

---

## Wie entwickelt sich die Modellregion?

- Abschaltung von 9 Großkraftwerken
- 2 GW weniger Nennleistung
- >30% weniger Energie in rotierenden Massen
- >30% geringere Anlaufzeitkonstante
- 25% erhöhte Frequenzabweichungen

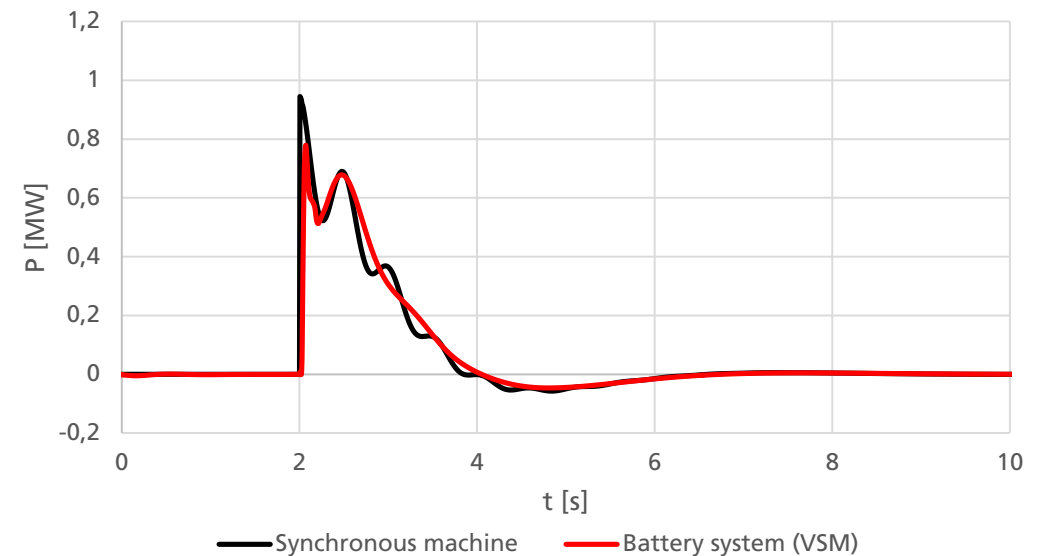
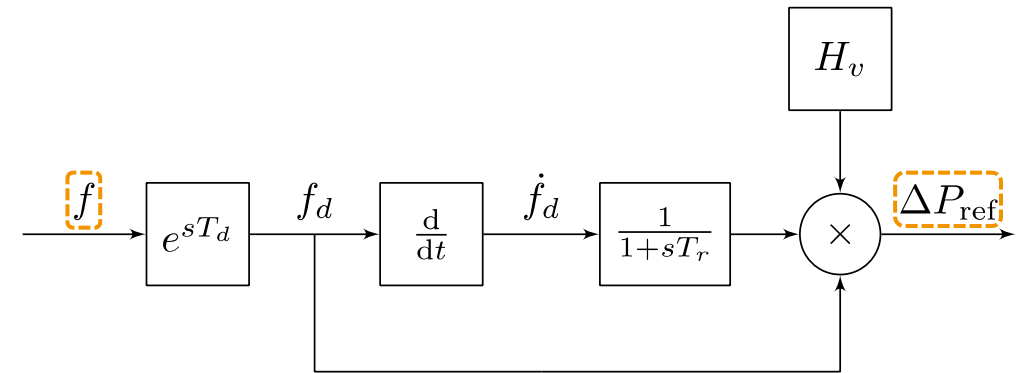
# FREQUENZSTABILITÄT

## SWING-EQUATION-REGELUNG

### Wie schließen wir die Lücke?

$$\Delta P = P_{\text{gen}} - P_{\text{load}} = 2Hf \frac{P_{\text{nom}}}{f_{\text{nom}}^2} \frac{df}{dt}$$

- Mit der Swing-Equation-Regelung ist die Bereitstellung von Momentanreserve mit Batteriespeichersystemen möglich.
- Das Batteriespeichersystem emuliert rotierende Massen





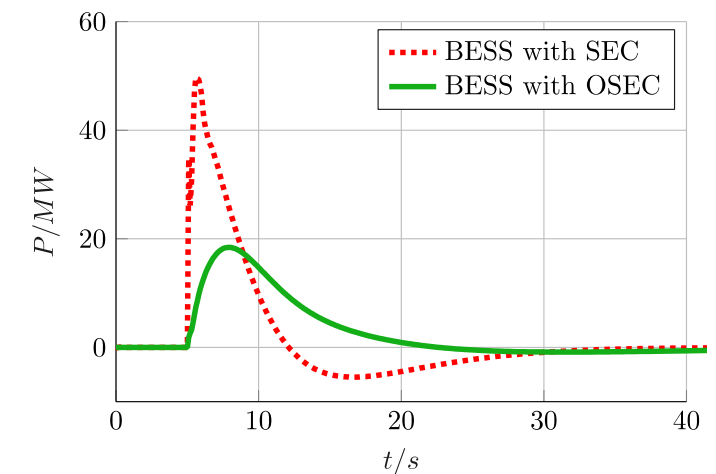
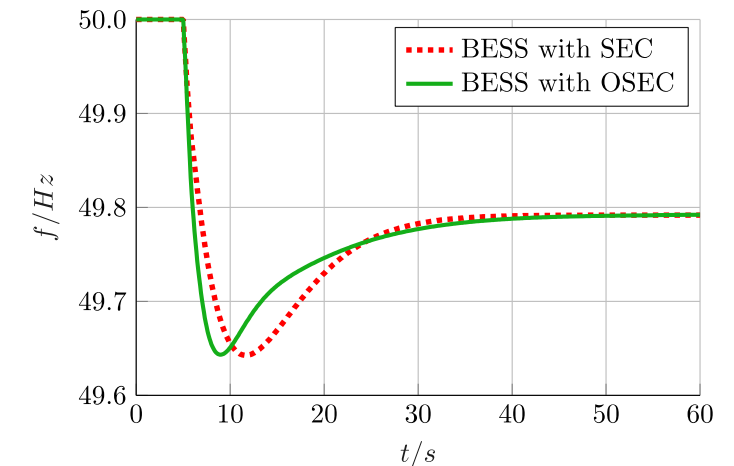
# FREQUENZSTABILITÄT

## OPTIMIERTE SWING-EQUATION-REGELUNG

### Wie können die Parameter optimiert werden?

- Gleiche statische Frequenzabweichung bei deutlich geringerer Nennleistung
- Höhere Frequenzänderung (RoCoF)

Kriterium	SEC	OSEC	Verhältnis
Aktive Leistung	50 MW	18 MW	37%
Energie	30 kWh	30 kWh	100%



# FREQUENZSTABILITÄT

## ANFORDERUNGEN AN DIE LEISTUNGSELEKTRONIK

### Was wird benötigt?

- Zurzeit gibt es keine Standardprodukte, existierende Produkte hängen von den lokalen Netzsituationen und Märkten ab
- Das Nachbilden der bestehenden rotierenden Masse ist nicht zwangsläufig der beste Weg
- Swing-Equation-Regelung: einfach zu implementieren, Frequenzmessung wird benötigt
- Virtuelle Synchronmaschine: Komplexe Modellierung, keine Frequenzmessung nötig

Anforderungen	von	bis
Reaktionszeit	~	0,1 s
Erbringungsdauer	15 s	1 min
Nennleistung	500 kW	~

# FREQUENZSTABILITÄT

## FREQUENZSCHÄTZUNG

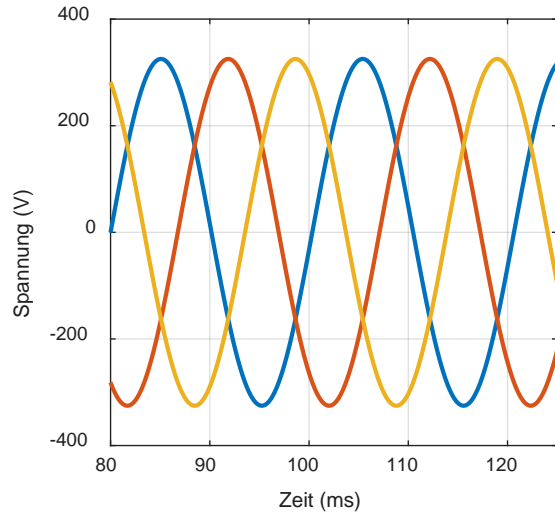
### Wie schnell muss die Frequenz geschätzt werden?

- Momentanreserve mit einem Batteriespeicher bereitstellen in 100 ms

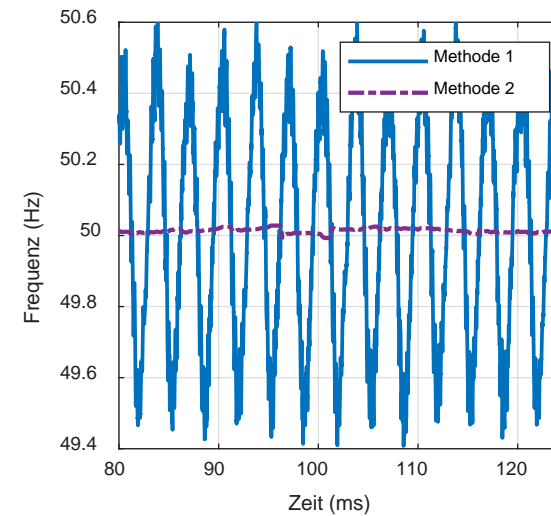
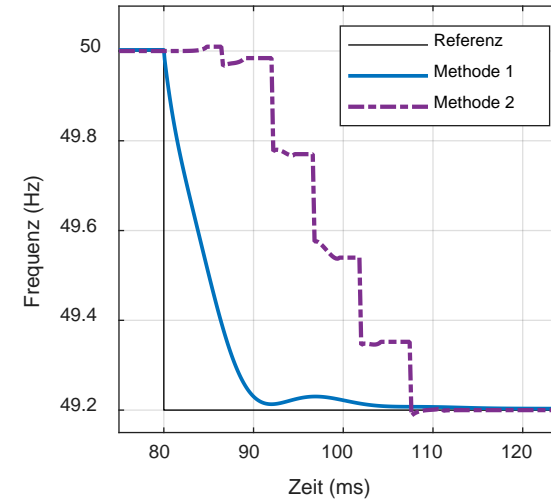
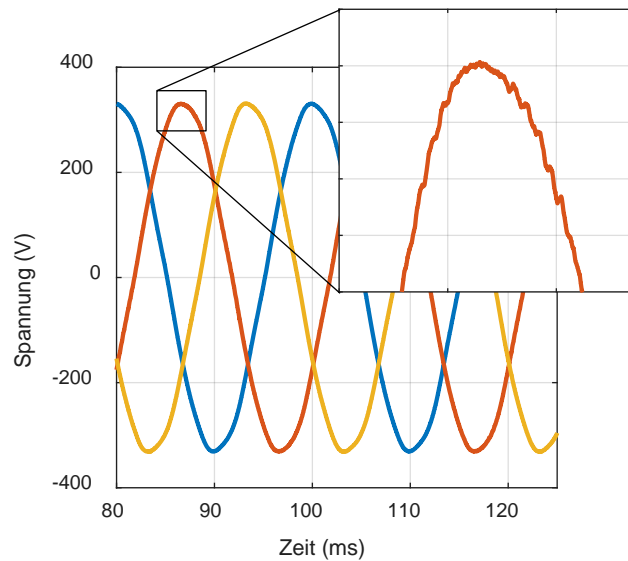


# FREQUENZSTABILITÄT

Ideale Spannung



Gemessene Spannung



# Teil II: OBERWELLENKOMPENSATION

# OBERWELLENKOMPENSATION

## HARMONISCHE SHAPE CLASS

$$x(t) = \sin t$$

$$\dot{x}(t) = \cos t$$

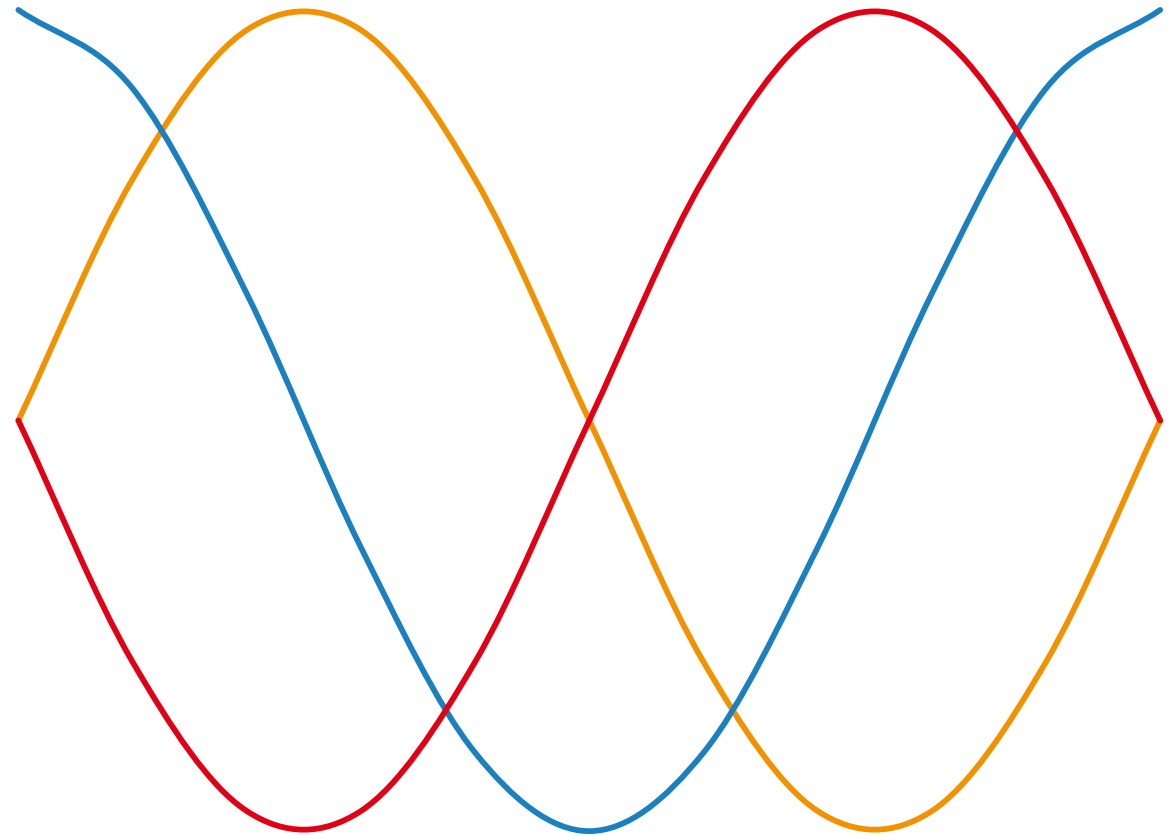
$$\ddot{x}(t) = -\sin t$$

Differentialgleichung

$$\ddot{x}(t) + x(t) = 0$$

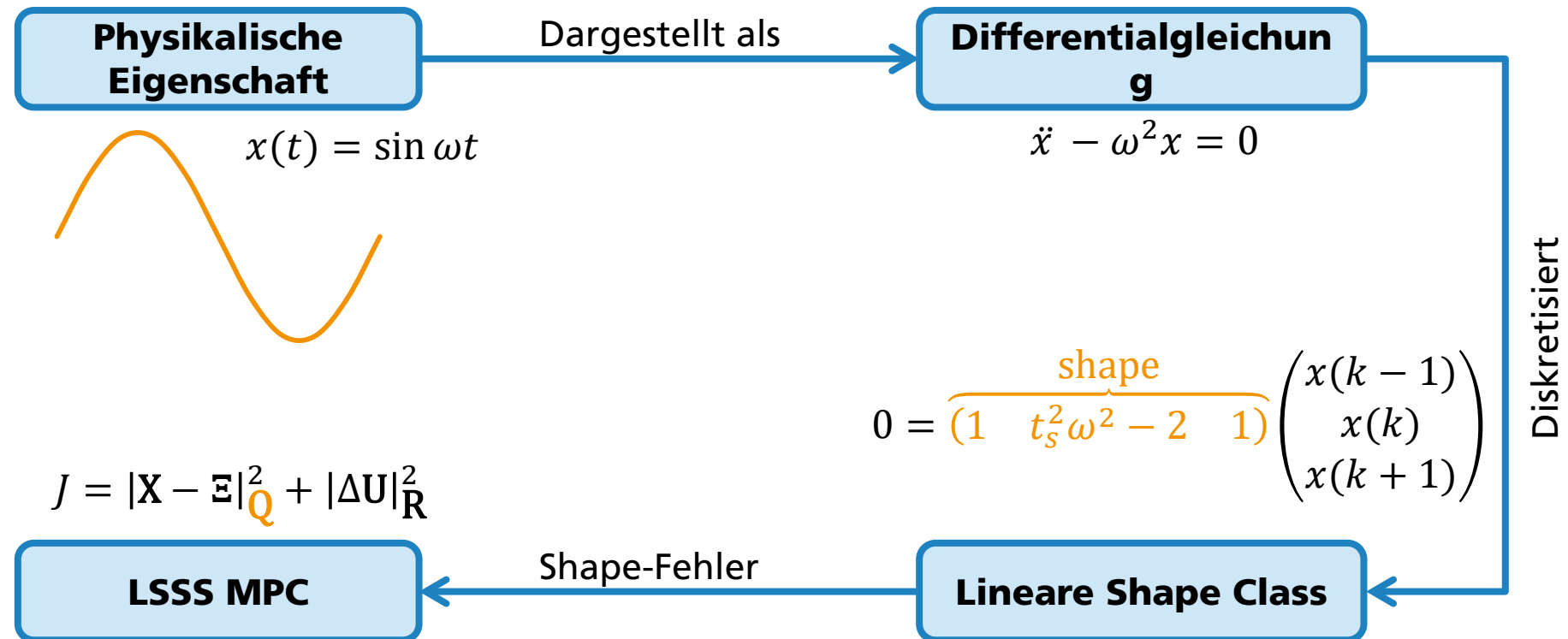
Diskretisierung

$$0 = \overbrace{\begin{pmatrix} 1 & t_s^2 \omega^2 - 2 & 1 \end{pmatrix}}^{\text{shape}} \begin{pmatrix} x(k-1) \\ x(k) \\ x(k+1) \end{pmatrix}$$



# OBERWELLENKOMPENSATION

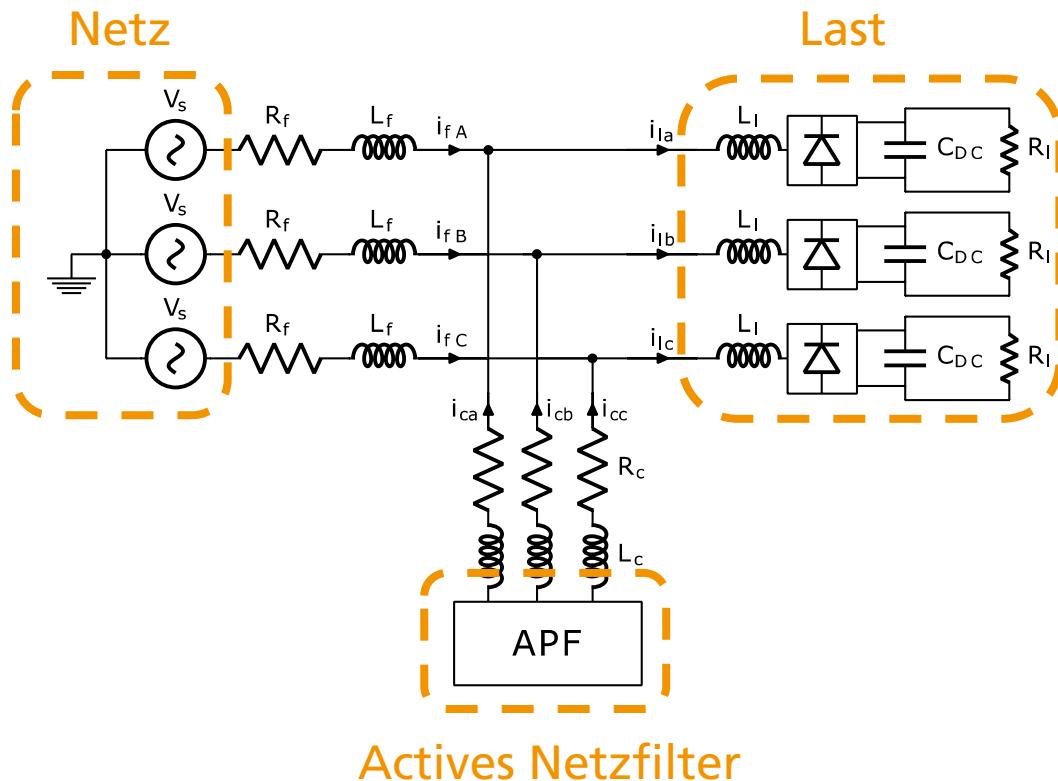
## SHAPE CLASS PRÄDIKTIVE REGELUNG



[Cateriano Yáñez et. al 2018]

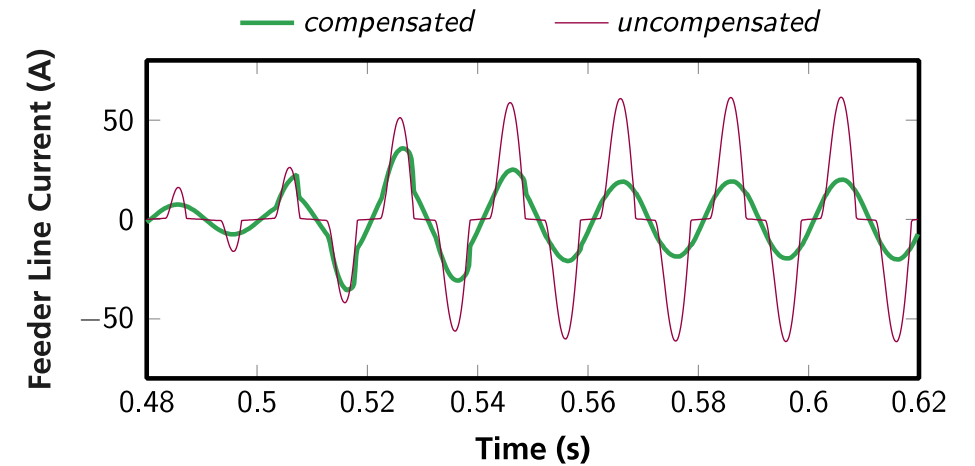
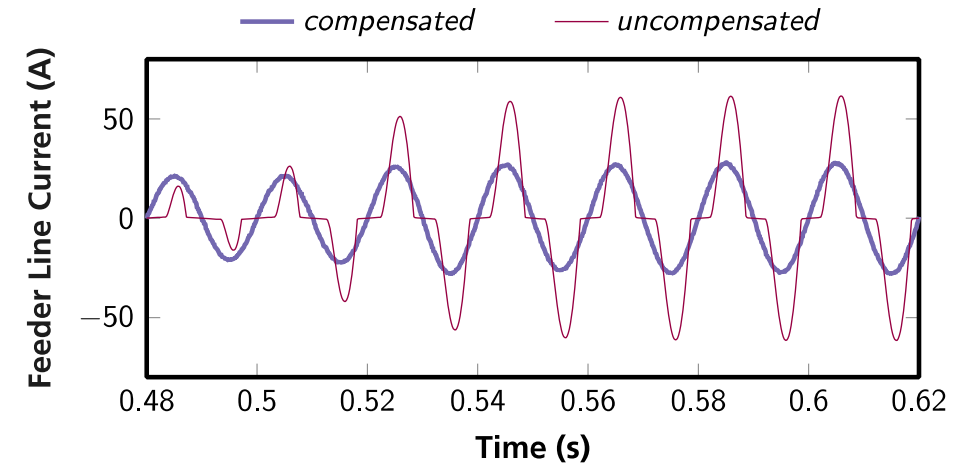
# OBERWELLENKOMPENSATION

## VERGLEICHSTUDIE



IRP-Regler

LS<sup>3</sup>MPC-Regler

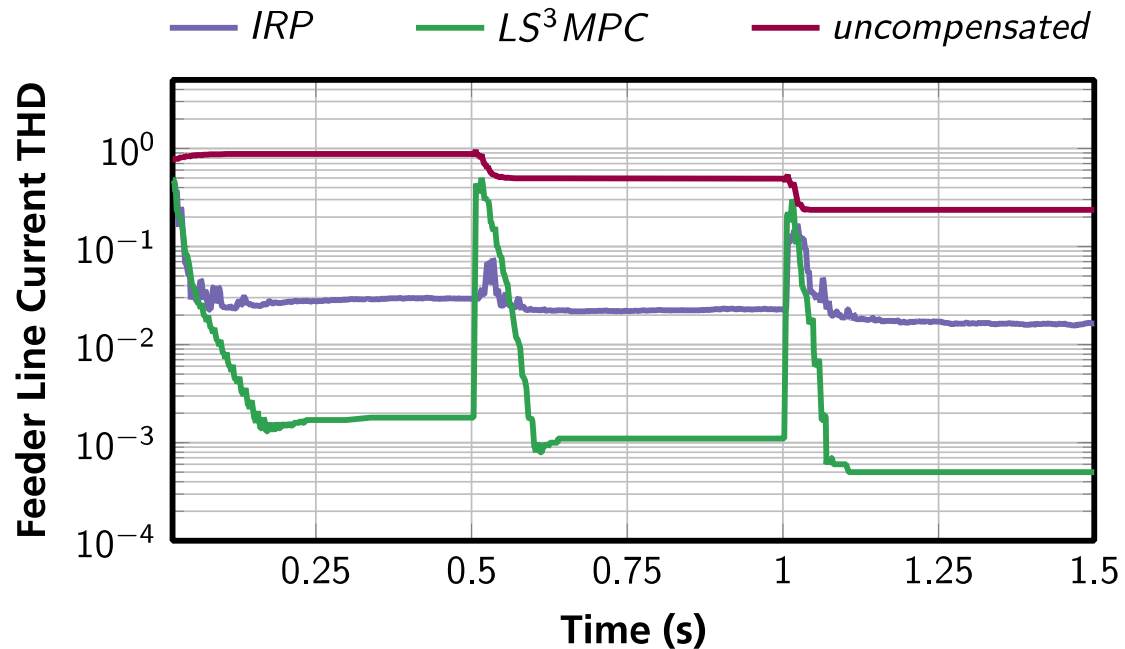


[Weihe et. al 2018]



# OBERWELLENKOMPENSATION

## VERGLEICHSTUDIE

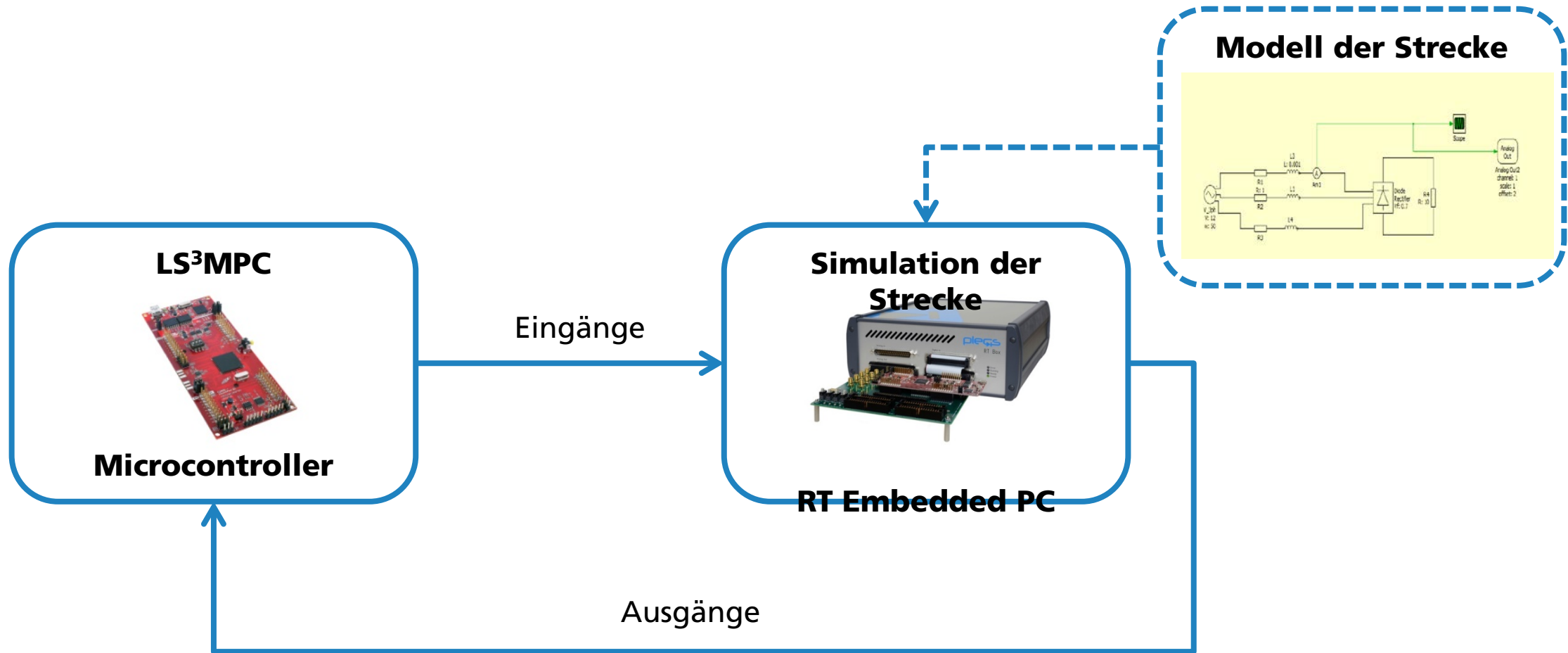


Load Scenarios	THD( $v_f$ )		THD( $i_f$ )	
	IRP	MPC	IRP	MPC
100Ω	1.07%	0.01%	2.92%	0.18%
9Ω	0.75%	0.02%	2.72%	0.11%
2Ω	0.85%	0.07%	2.56%	0.05%

[Weihe et. al 2018]

# OBERWELLENKOMPENSATION

## HARDWARE IN THE LOOP



---

# ZUSAMMENFASSUNG

---

- Anteil an rotierenden Massen sinkt in zukünftigen Stromnetzen
- Momentanreserve kann mit Batteriespeichersystemen emuliert werden
- Eine Optimierung bezüglich bestimmter Kriterien ist möglich
- Modellprädiktive Regelung kann zur Oberwellenkomensation eingesetzt werden
- MPC adaptiert sich auf unterschiedliche Lastszenarien
- Aktuell wird eine HIL-Simulationsumgebung entwickelt

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!  
Thank you for your attention

