

(Zukünftige) Anforderungen an Netzanschlussregler

Prof. Dr. Horst Schulte

Control Engineering Group, School of Engineering I, University of Applied
Sciences Berlin (HTW Berlin)

31. Windenergietage

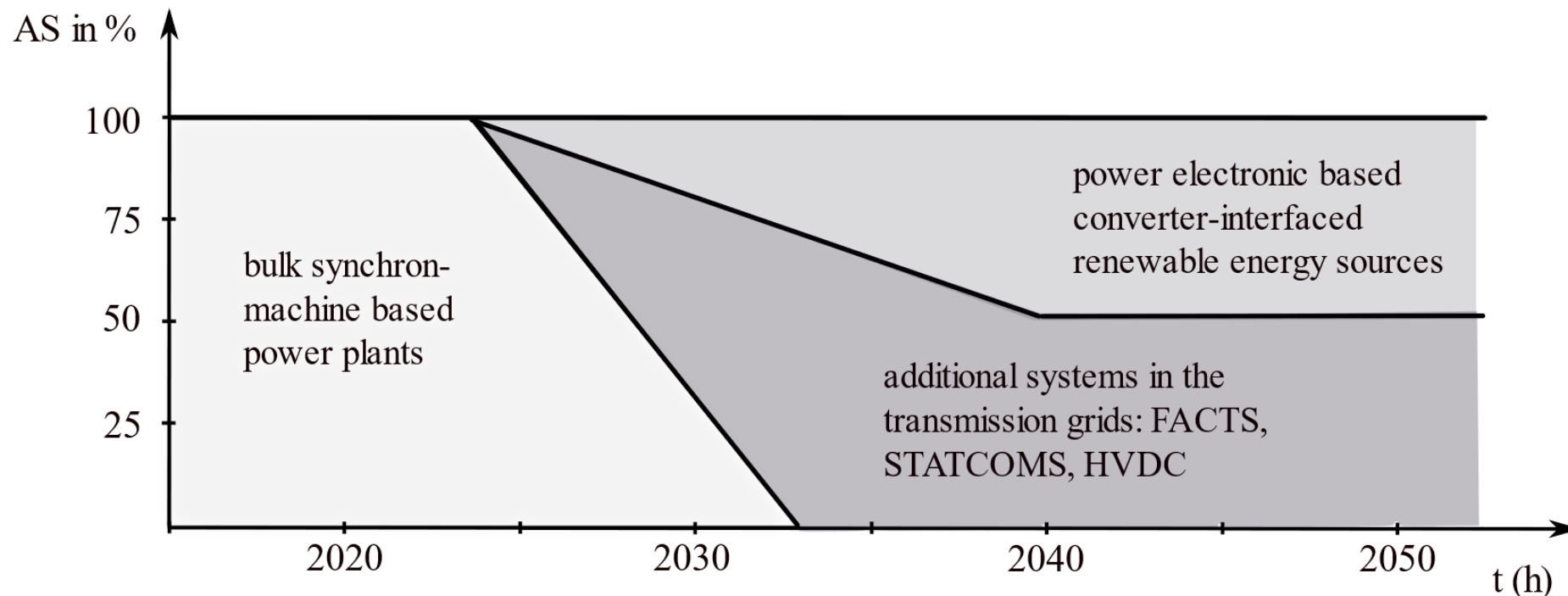
Potsdam, 09.11.2023

1. Einführung
2. Steigende Anforderungen an Netzanschlussregler
3. Dynamische Virtuelle Kraftwerke
4. Experimentelle Validierung mit Power HIL Systemen
5. Zusammenfassung

1. Einführung

■ Systemdienstleistungen mit Windkraftwerken

- Steigender Bedarf an Systemdienstleistungen (Auxillary Services) mittels verteilter, umrichterbasierter Systeme mit erneuerbarer elektrischer Erzeugung



■ Systemdienstleistungen mit Windkraftwerken

Was ist keine Systemdienstleistung?

- Einspeisung ins Netz (Teillast/Volllast ohne Hilfsdienste)

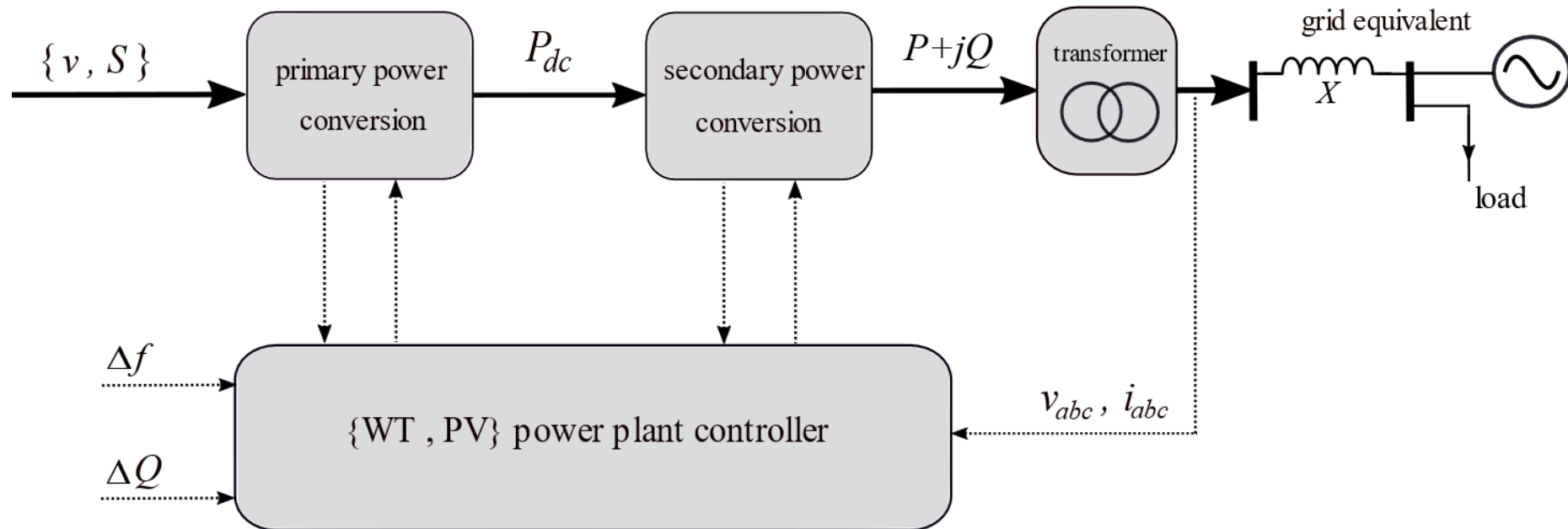
die zu betrachtenden Systemdienstleistungen sind

- Stabilisierung der Netzfrequenz (u.a. momentan Reserve)
- Stabilisierung der Netzspannung (u.a. Blindleistungseinspeisung)
- Betrieb bei schwachen Netzen (Kleine SCR)
- Fault-ride-through (FRT) für große Netzstörungen
- Fähigkeit zur Re-Synchronisierung mit Netzwiederanbindung
- Systemwiederherstellung und Schwarzstartfähigkeit durch Netzführung

2. Anforderungen an Netzanschlussregler

■ Problemstellung

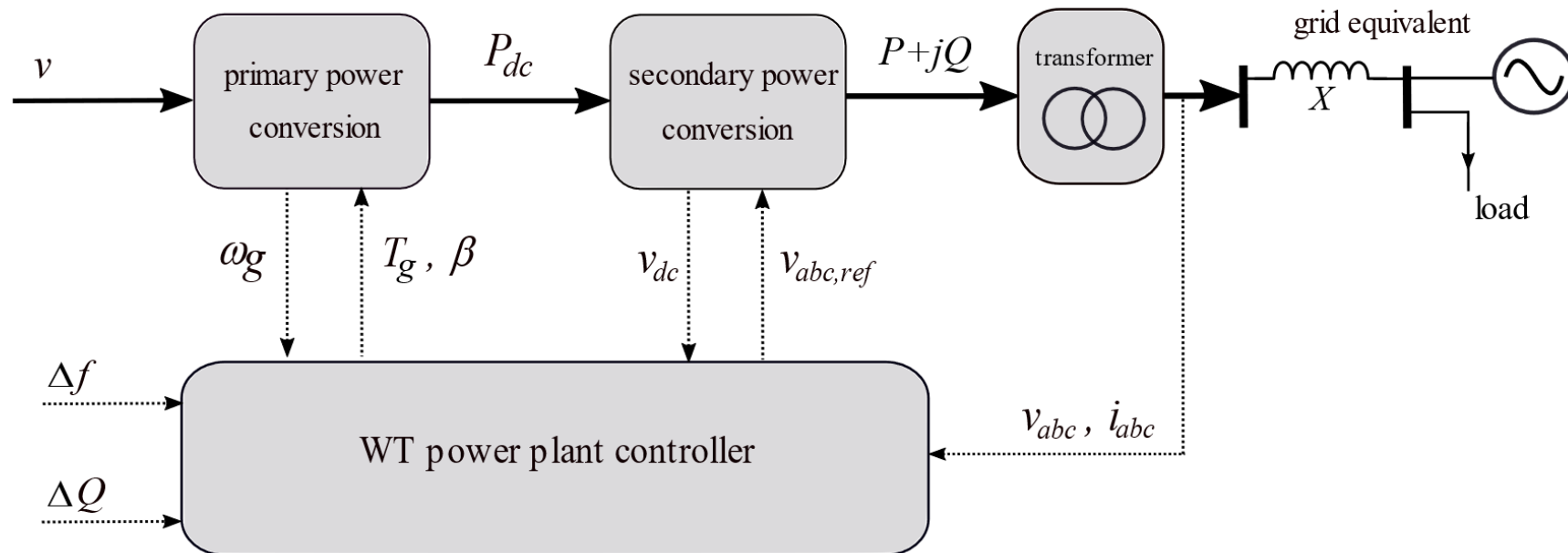
- Aggregation von Erzeugungseinheiten nach folgendem Schema (allgemein)



2. Anforderungen an Netzanschlussregler

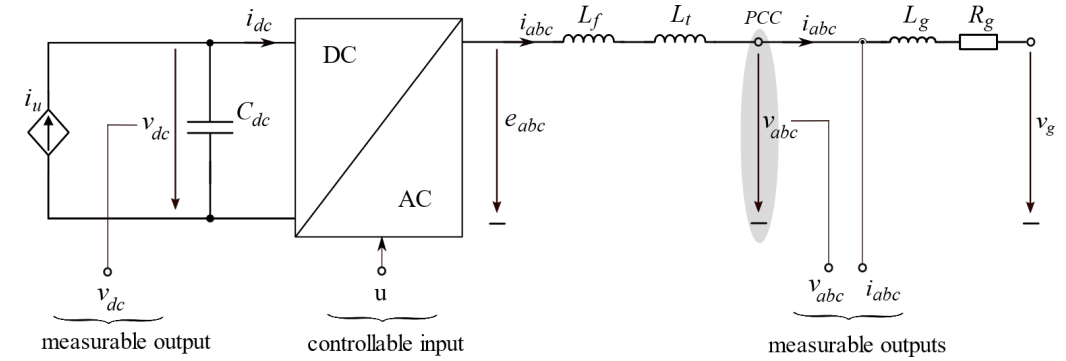
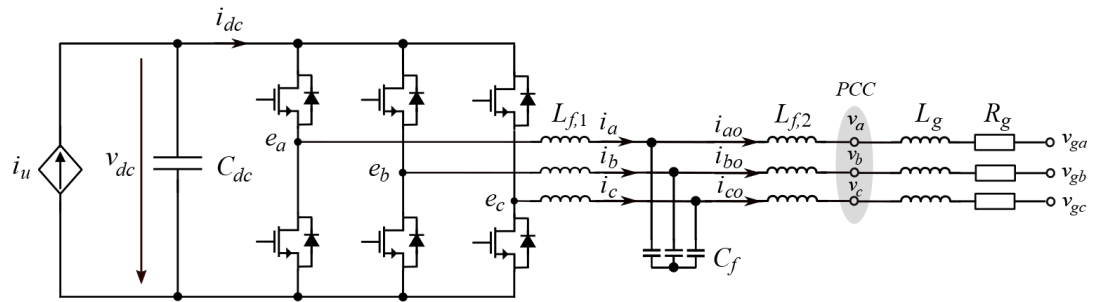
■ Problemstellung

- Aggregation von Erzeugungseinheiten nach folgendem Schema (WEA spezifisch)



2. Anforderungen an Netzanschlussregler

- Sekundäre Leistungswandlung (secondary power conversion)
- Umrichterbasierte Systeme



- enthalten Regelung als
 - netzgeführte Umrichter (grid-following converter): Stromquelle
 - netzbildende Umrichter (grid-forming converter) : Spannungsquelle

2. Anforderungen an Netzanschlussregler

■ Testfälle

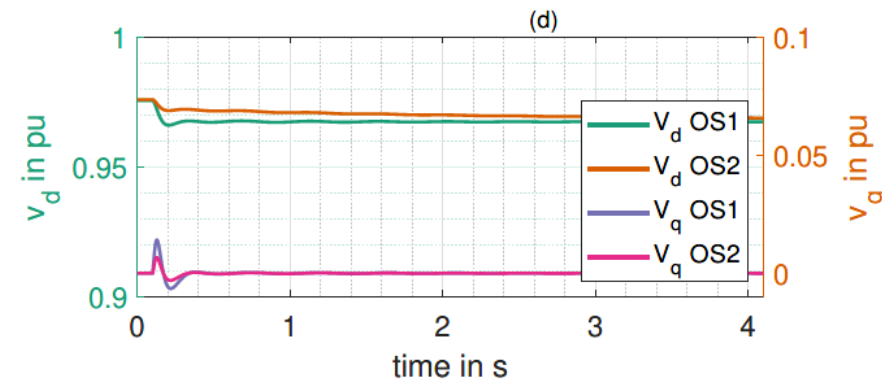
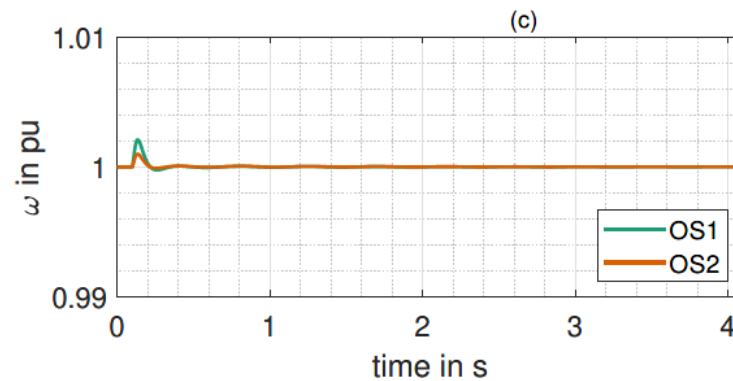
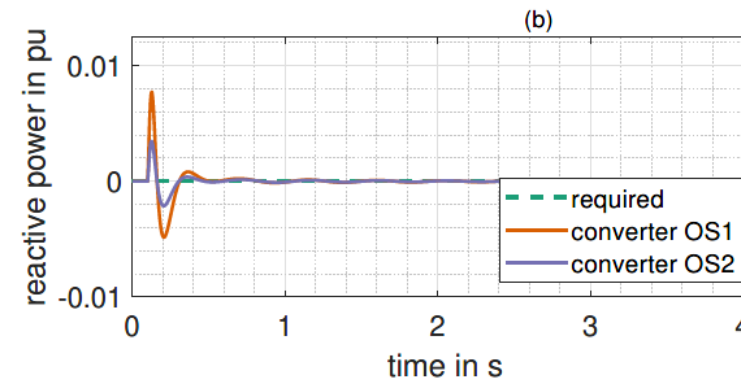
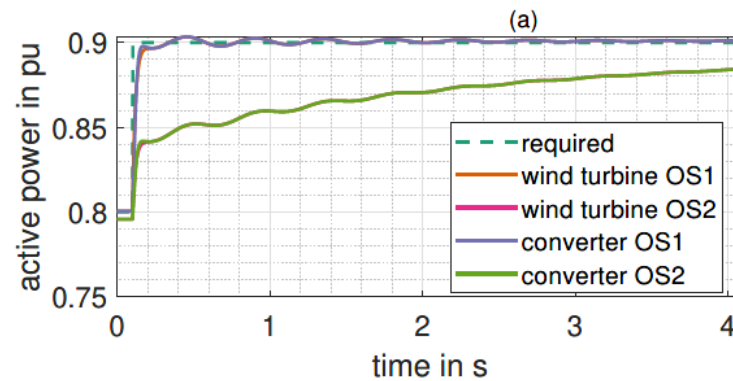
- Reaktion auf Wirkleistungsanforderung
- Reaktion auf Blindleistungsanforderung
- Änderung der Windeingangsströmung
- Netzstörungen
 - Phasensprünge
 - Lastsprünge

2. Anforderungen an Netzanschlussregler

■ Testfälle

- Reaktion auf Wirkleistungsanforderung (Sprung bei $t_e = 0.1$ s)

$$\Delta P_{req} = \begin{cases} 0 & t < t_e \\ 0.1 S_B & t \geq t_e \end{cases}$$

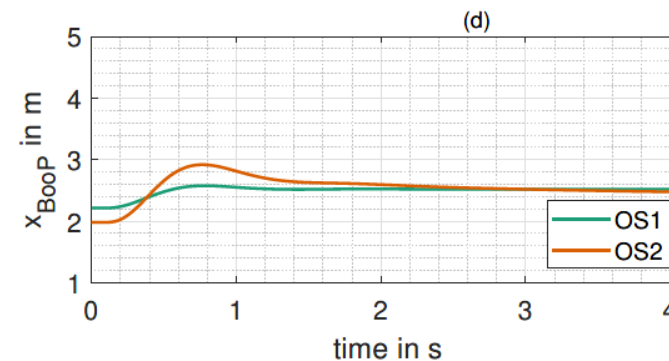
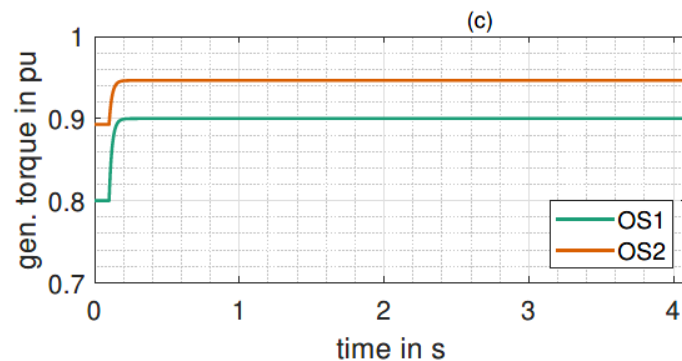
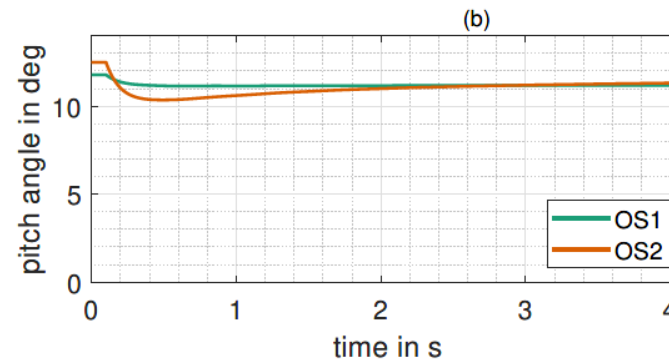
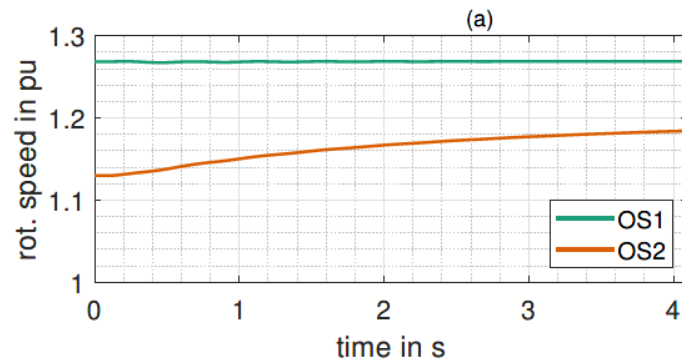


2. Anforderungen an Netzanschlussregler

■ Testfälle

- Reaktion auf Wirkleistungsanforderung (Sprung bei $t_e = 0.1$ s)

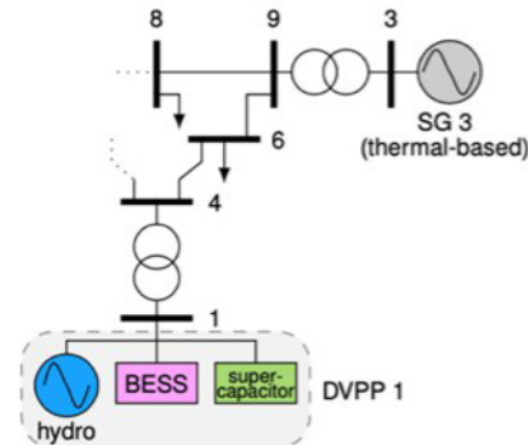
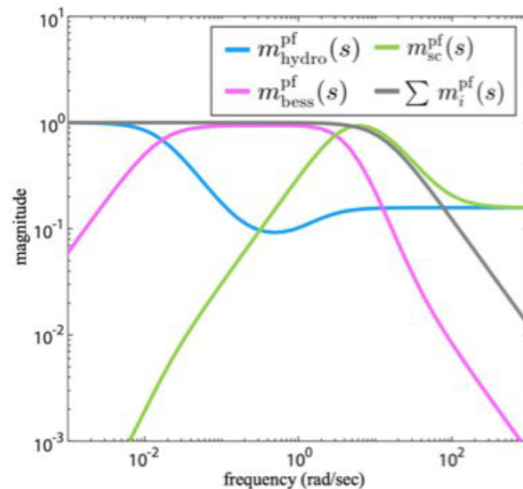
$$\Delta P_{req} = \begin{cases} 0 & t < t_e \\ 0.1 S_B & t \geq t_e \end{cases}$$



2. Anforderungen an Netzanschlussregler

■ Grenzen der lokalen Betrachtung von einzelnen EZAs

- Übertragungsfunktionen einzelner EZAs bilden nicht die Anforderungen ab, die ein Systemoperator (TSO, DSO) an die Frequenz- und Spannungsregelung eines Kraftwerks stellt
- Beispiel komplementäre EZA Dynamik bei $\Delta f \rightarrow \Delta P$ ausnutzen



3. Dynamische Virtuelle Kraftwerke

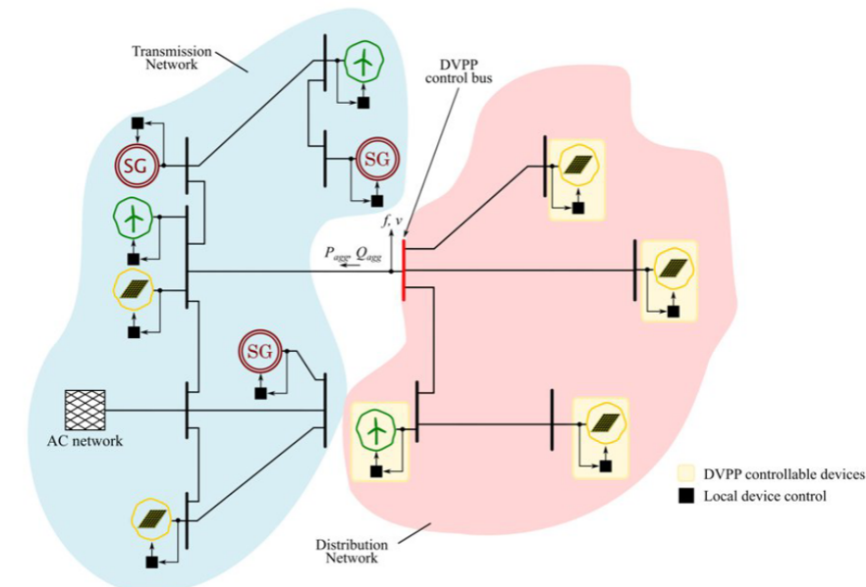
■ Virtuelle Kraftwerke

- Begriff "Virtuelles Kraftwerk" (VPP) ist nicht einheitlich und eindeutig definiert
- allgemeine Definition, die auf jedes VPP anwendbar ist, findet sich in [1]:

virtuelle Kraftwerke beinhalten

- verteilte dezentrale Erzeugungsanlagen
- steuerbare Verbraucher (optional)
- Energiespeicher (optional)

die zu einem Kraftwerk aggregiert werden



[1] H. Saboori, M. Mohammadi, and R. Taghe, "Virtual Power Plant (VPP), Definition, Concept, Components and Types," in 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), March 2011, pp. 1–4

3. Dynamische Virtuelle Kraftwerke

■ Klassische Virtuelle Kraftwerke

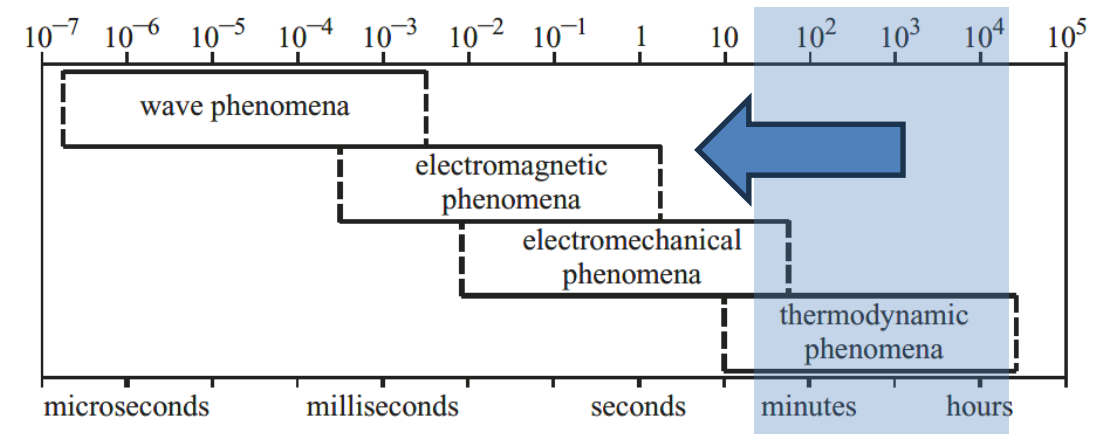
- Abgrenzung/Definitionen von VPP-Konzepten in Bezug auf
 - EZA Typen (Primärenergien) die in einem VPP aggregiert
 - VPPs Geschäftsmodelle
- EZA Anlagen Typen
 - Einschränkung von Anlagentypen
 - Beschränkung auf regenerative Erzeuger
 - Beschränkung der Spannungsebene und Leistung
- Geschäftsmodelle
 - üblich: Geschäftsmodelle basierend auf dem Verkauf von Energie und Systemdienstleistung
 - Nachbarschaftskraftwerk, Regelleistungsmärkte

3. Dynamische Virtuelle Kraftwerke

■ Dynamic Virtual Power Plant

– Erweiterung um

- Fast frequency reserve
- virtual-inertia



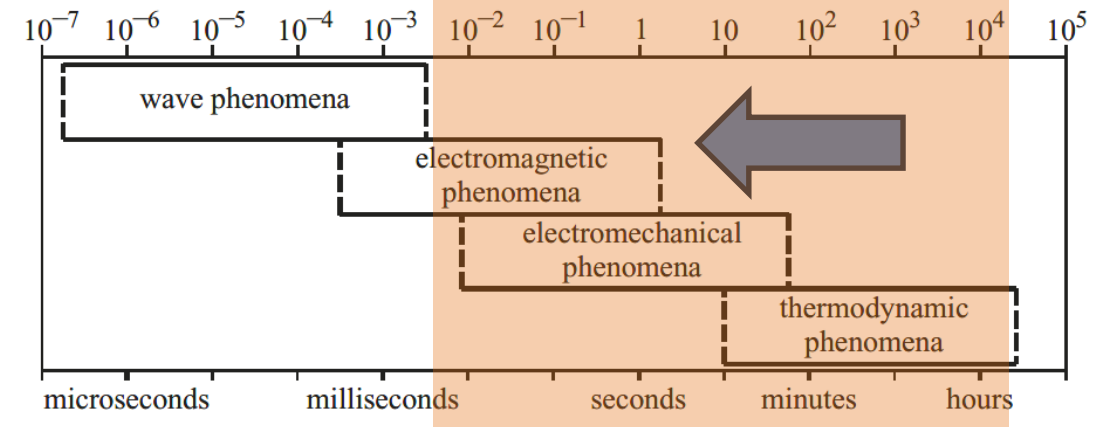
- Konzept, dass die Integration von aggregierten EZAs in bestehende Regelungssysteme auf der gleichen Ebene wie klassische Synchrongeneratoren erlaubt
- Integration of inverter-based control (grid-following/grid-forming) into power systems at power plant level

3. Dynamische Virtuelle Kraftwerke

■ Dynamic Virtual Power Plant

– Erweiterung um

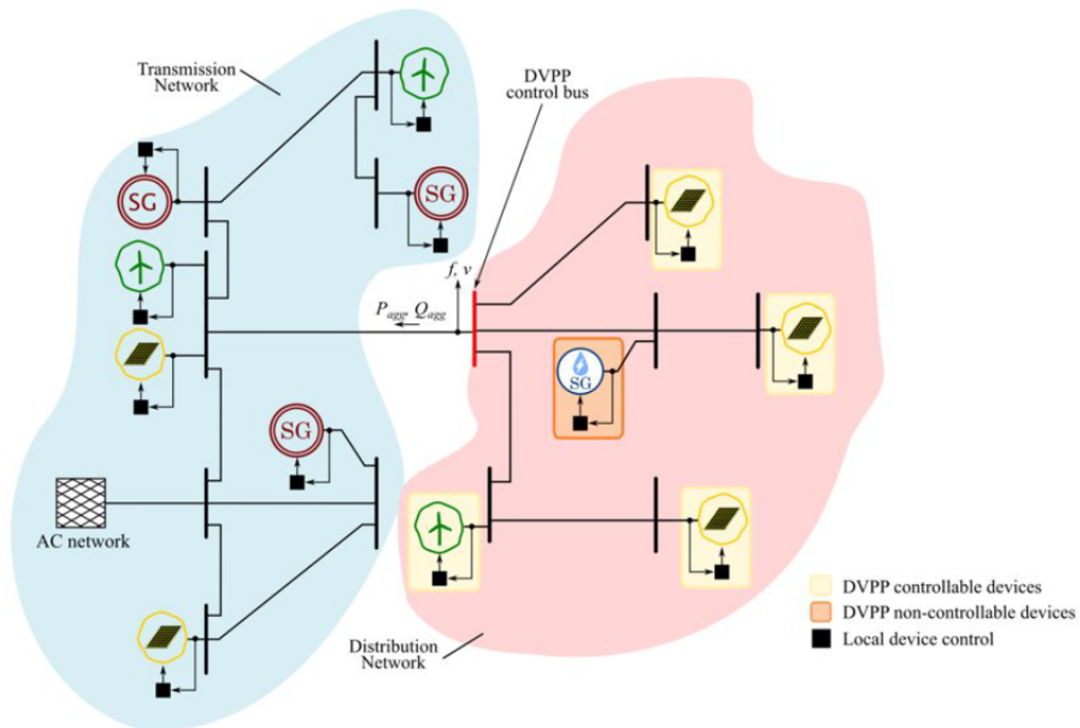
- Fast frequency reserve
- virtual-inertia



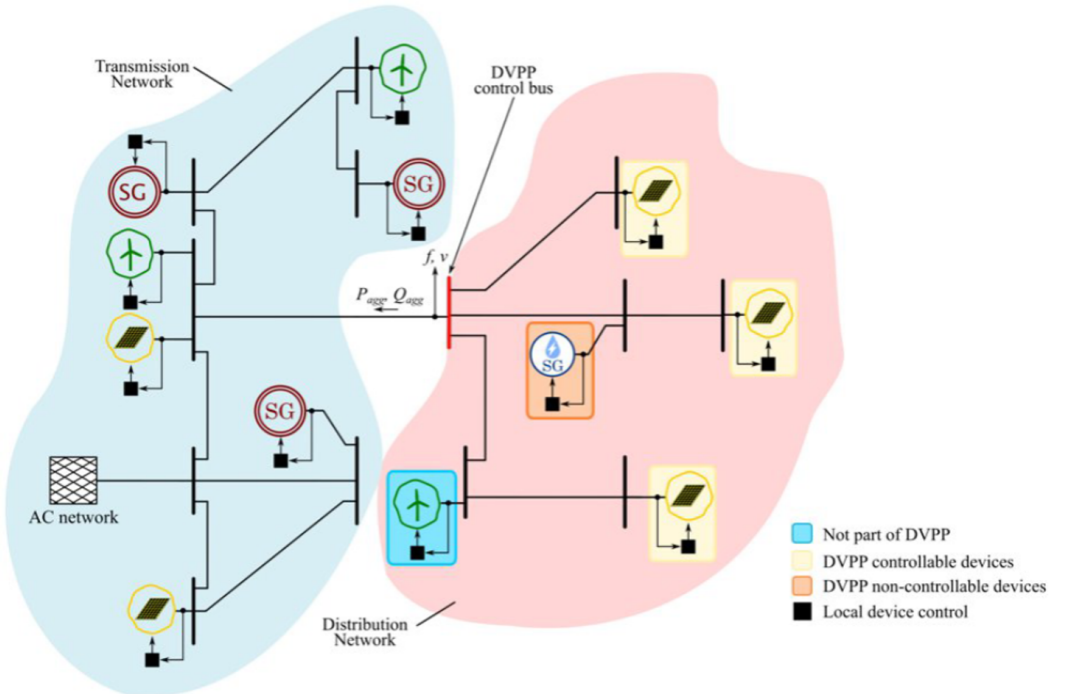
- Konzept, dass die Integration von aggregierten EZAs in bestehende Regelungssysteme auf der gleichen Ebene wie klassische Synchrongeneratoren erlaubt
- Integration of inverter-based control (grid-following/grid-forming) into power systems at power plant level

3. Dynamische Virtuelle Kraftwerke

- Verteilnetz enthält steuerbare und nicht steuerbare Kraftwerke im DVPP Verbund



- Verteilnetz enthält steuerbare und nicht steuerbare Kraftwerke außerhalb des Verbunds

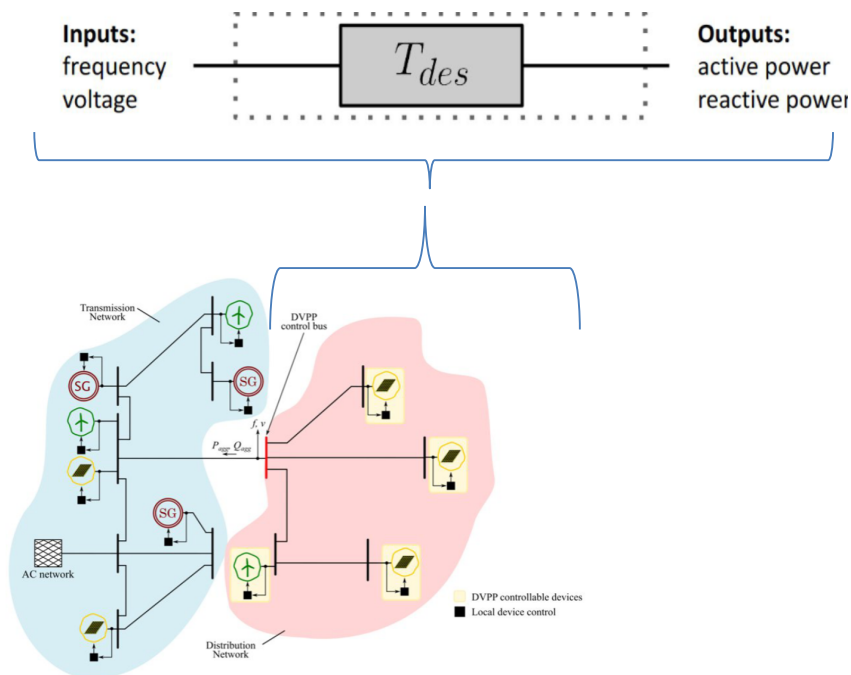


3. Dynamische Virtuelle Kraftwerke

Decentralized Control Problem

- Control of Dynamic Virtual Power Plants

Aggregation: Desired control behavior is defined by an aggregated reference model



We assume the desired dynamic behavior have been specified by

$$\begin{bmatrix} \Delta p_{des}(s) \\ \Delta q_{des}(s) \end{bmatrix} = T_{des}(s) \begin{bmatrix} \Delta f(s) \\ \Delta v(s) \end{bmatrix}$$

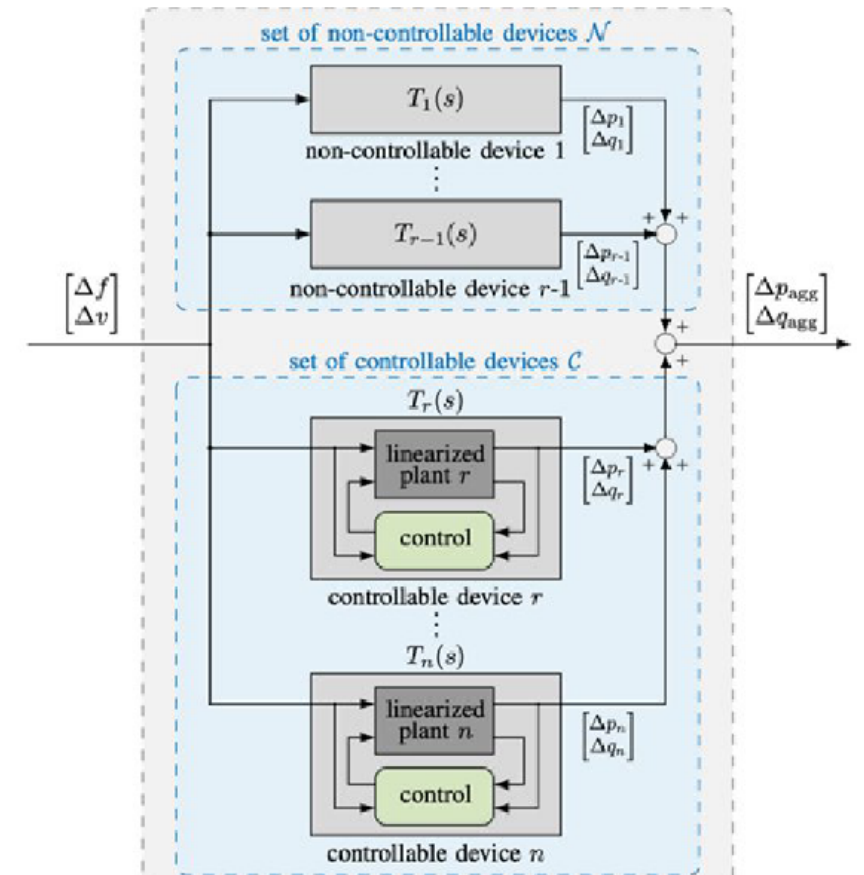
3. Dynamische Virtuelle Kraftwerke

Decentralized Control Problem

- Control of Dynamic Virtual Power Plants
- **Disaggregation:** Decomposition of the aggregated T_{agg} reference model into T_i reference models

$$\begin{bmatrix} \Delta p_{agg} \\ \Delta q_{agg} \end{bmatrix} = \sum_{i \in \mathcal{N} \cup \mathcal{C}} T_i \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta v \end{bmatrix} = T_{agg} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta v \end{bmatrix}$$

with non-controllable devices and controllable devices

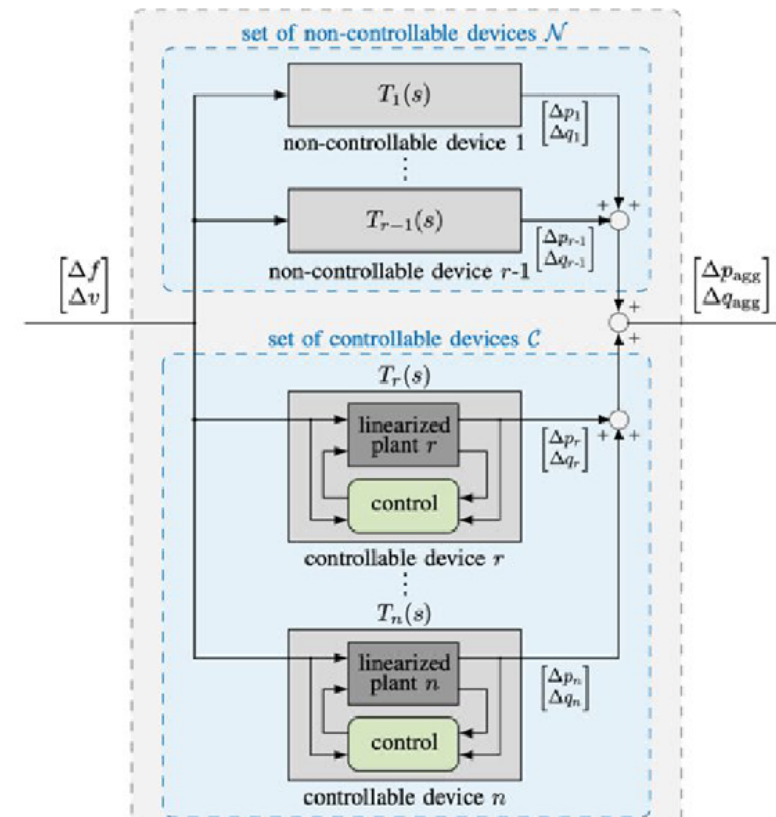
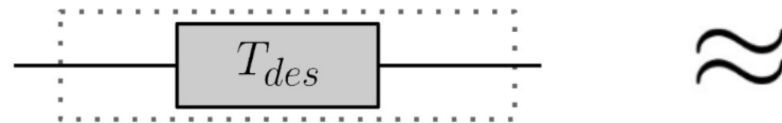


3. Dynamische Virtuelle Kraftwerke

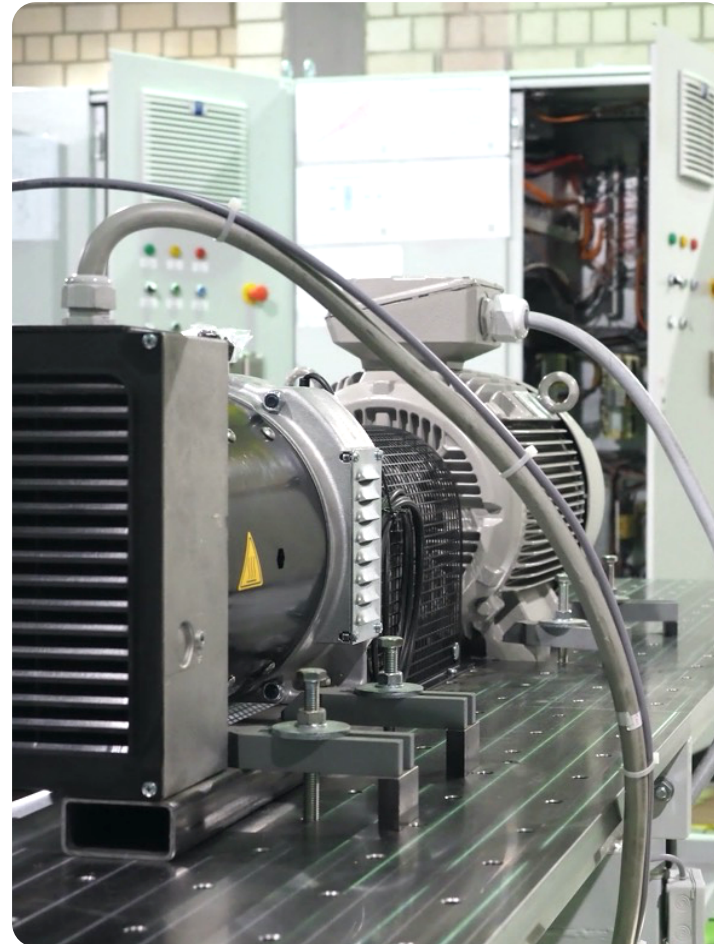
Decentralized Control Problem

- Control of Dynamic Virtual Power Plants

1. Step: Disaggregation
2. Step: Local Controller Design



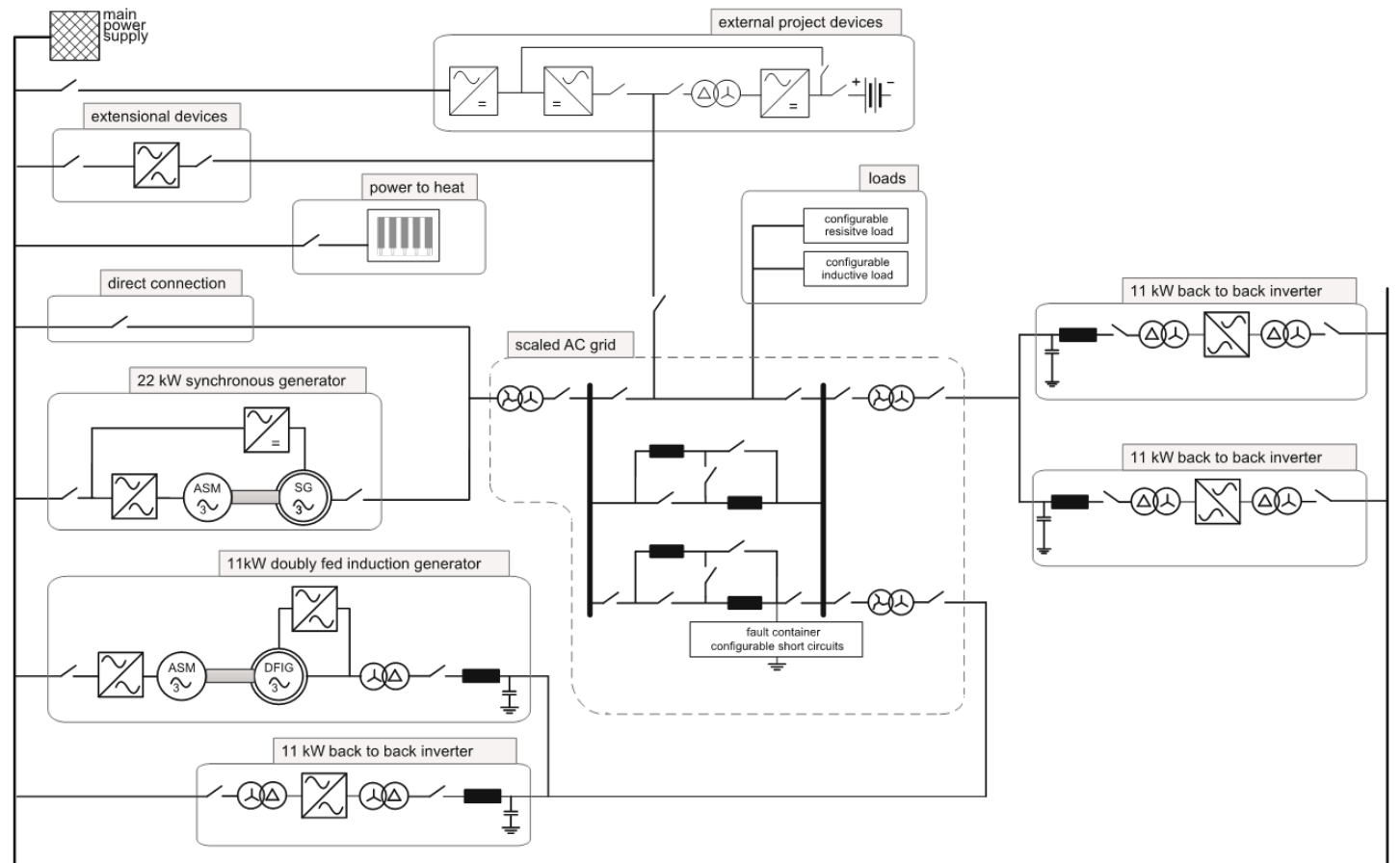
4. Experimentelle Validierung mit Power HIL



4. Experimentelle Validierung mit Power HIL

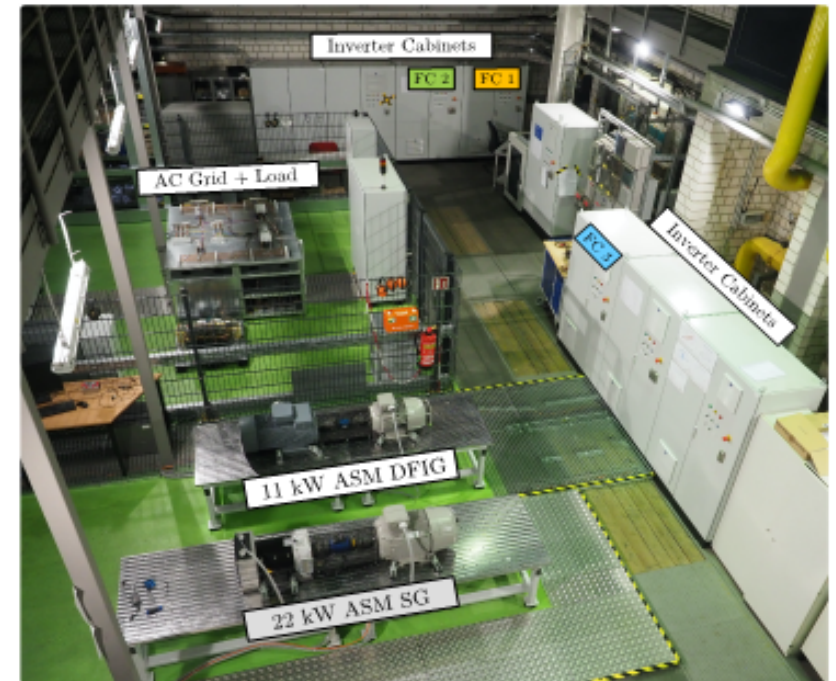
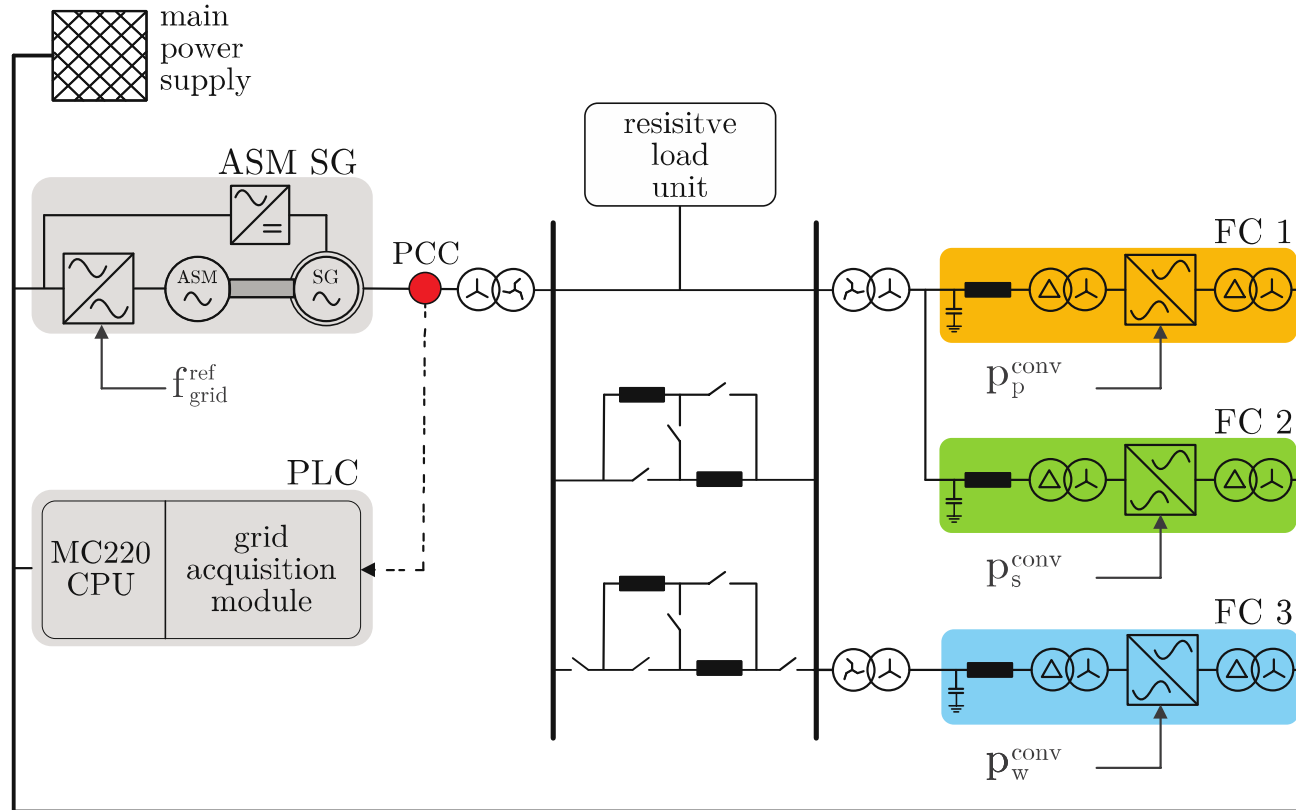
MAIN FEATURES

- 3 x 11 kW back-to-back converter
- 1 x 22 kW SG
- 1 x 11 kW DFIG
- Scaled AC Grid with fault container
- Up to 40 kW configurable resistive load
- Up to 3.6 kW configurable inductive load
- 80 Ch. 20 kSps measurement system
- Fully automated testing environment
- Realtime MIL and PHIL



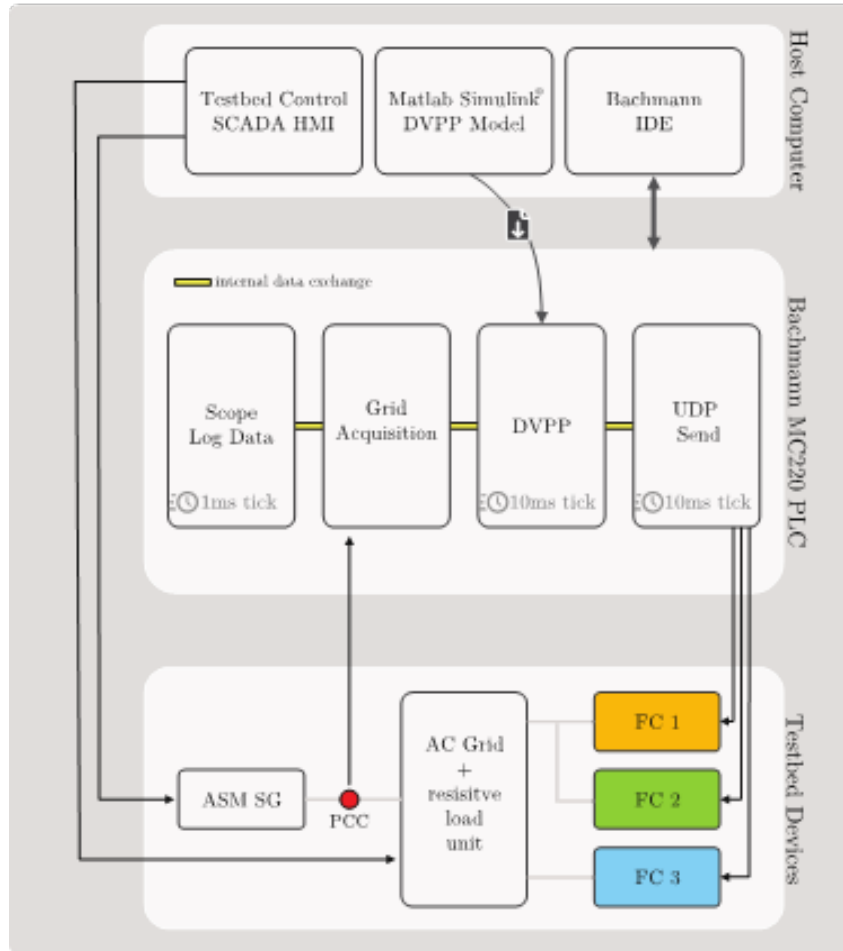
4. Experimentelle Validierung mit Power HIL

- Reduziertes Übersichtsbild (enthält nicht alle Prüfstandskomponenten)



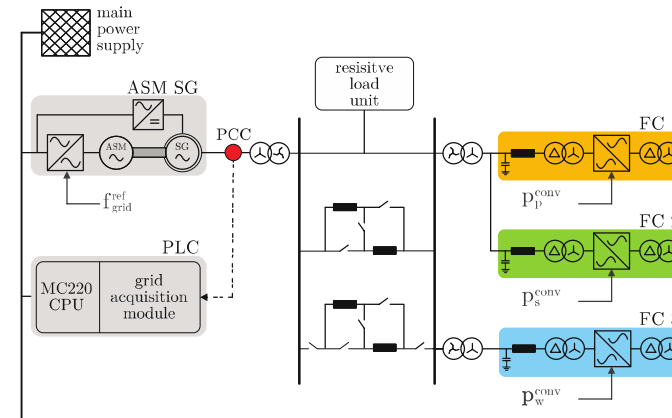
4. Experimentelle Validierung mit Power HIL

Schematic of the DVPP testing process



Initial Conditions

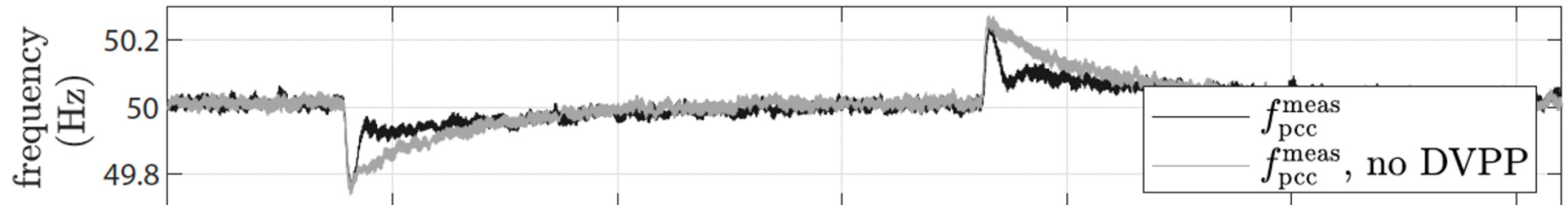
Description	Component	Value	Value pu
Initial base load	Load Unit	9 kW	-
Initial grid voltage at PCC	SG	400 V	1.0
Initial grid frequency at PCC	ASM	50 Hz	0.5
Initial active power FC 1	FC 1	3 kW	0.3
Initial active power FC 2 *	FC 2	1 kW	0.1
Initial active power FC 3	FC 3	2 kW	0.2
Data log resolution	PLC	1 kHz	-
DVPP task tick rate (sample time)	PLC	10 ms	-
UDP task tick rate (sample time)	PLC	10 ms	-
Grid frequency measurement resolution	PLC	1 mHz	-
Grid frequency measurement update rate	PLC	6,67 ms	-



4. Experimentelle Validierung mit Power HIL

Case Study: Fast Frequency Reserve

- Goal: Investigating DVPP behavior during short-term changes in the grid-frequency
- Method: Employing ± 1 kW load jump by adjusting reference value of the restive loads
- Results:

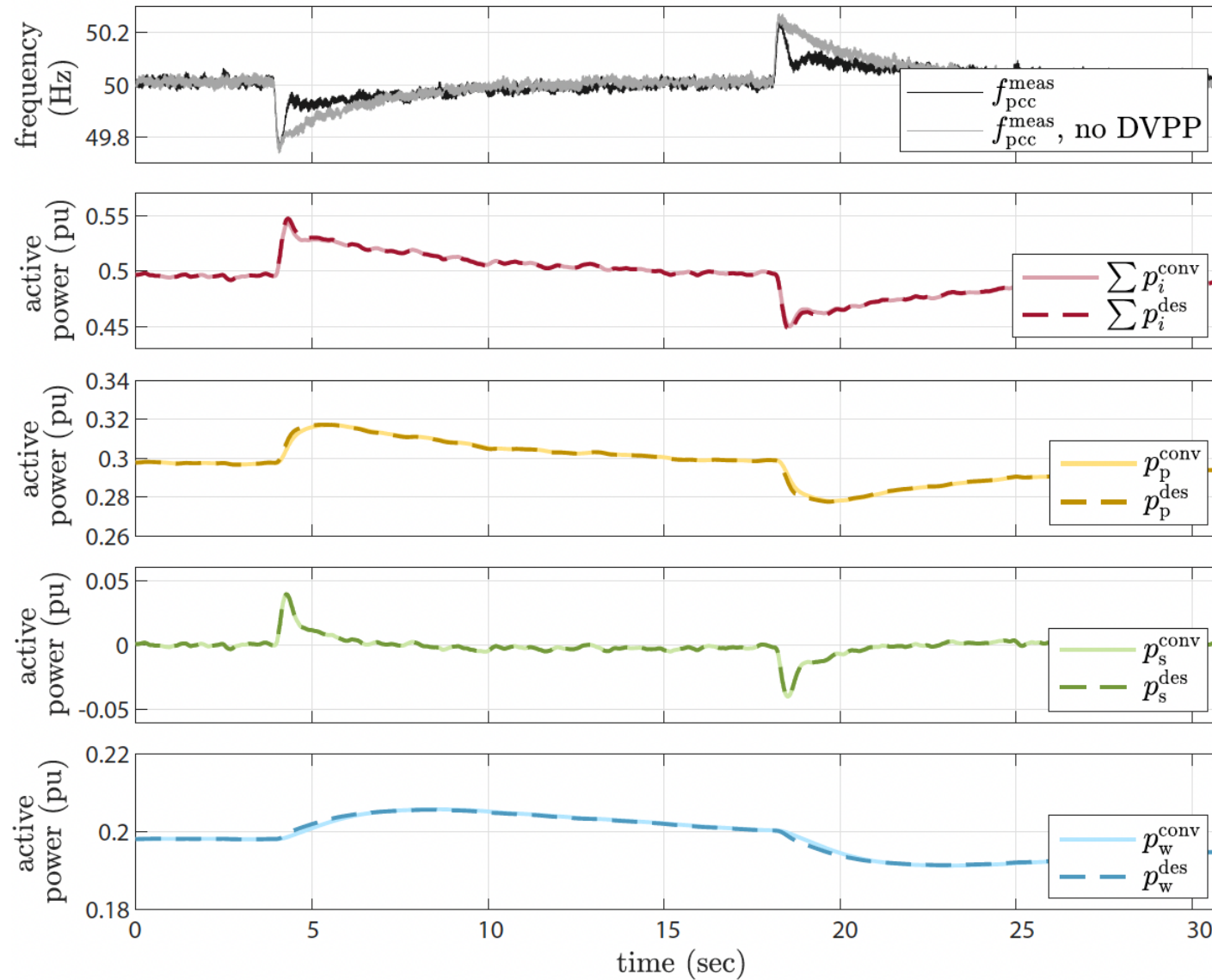


Andrejewski, Moritz; Häberle, Verena; Goldschmidt, Nico; Dörfler, Florian; Schulte, Horst: Experimental Validation of a Dynamic Virtual Power Plant Concept Based on Multiple-Converter Power Hardware-In-the-Loop Test Bench. Wind Integration Workshop, New York: 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.00882>

4. Experimentelle Validierung mit Power HIL

Case Study

- Results:



5. Literatur zum Thema DVPP

- DVPP Control Concepts** Häberle, V., Fisher, M. W., Prieto-Araujo, E., & Dörfler, F. (2021). Control design of dynamic virtual power plants: An adaptive divide-and-conquer approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 37(5), 4040-4053. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3139775>
- Häberle, V., Tayyebi, A., He, X., Prieto-Araujo, E., & Dörfler, F. (2023). Grid-forming and spatially distributed control design of dynamic virtual power plants. *IEEE Transactions on Smart Grid*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.02057>
- Björk, J., Johansson, K. H., & Dörfler, F. (2022). Dynamic virtual power plant design for fast frequency reserves: Coordinating hydro and wind. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*. <http://dx.doi.org/10.1109/TCNS.2022.3181553>
- Wind Turbine Operation and Control for DVPP** Pöschke, Florian; Schulte, Horst: Evaluation of different APC operating concepts considering turbine loading and response time for grid support. In: *Wind Energy Science* 7, 4. (2022), S. 1593-1607. <https://doi.org/10.5194/wes-7-1593-2022>
- Pöschke, Florian; Gauterin, Eckhard; Kühn, Martin; Fortmann, Jens; Schulte, Horst: Load mitigation and Power tracking capability for Wind Turbines using Linear Matrix Inequality-based control design. In: *Wind Energy* Vol. 23, Issue 9. (2020), S. 1792-1809. <http://dx.doi.org/10.1002/we.2516>
- Pöschke, Florian; Petrovic, Vlaho; Berger, Frederik; Neuhaus, Lars; Hölling, Michael; Kühn, Martin; Schulte, Horst: Model-based wind turbine control design with power tracking capability: a wind-tunnel validation. In: *Control Engineering Practice* 2022, 120. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.105014>
- PV Power Plant: Operation and Control for DVPP** Schulte, Horst; Kusche Stephan: Fast Power Tracking Control of PV Power Plants for Frequency Support. In: *at - Automatisierungstechnik*, Band 71 Heft 10, October 2023, 10, Special Issue Computational Intelligence (2023), <https://www.degruyter.com/journal/key/auto/html#issues>

Acknowledgements to DVPP Research

- This work has received funding from the European Union Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 883985
- POSYTYF – Powering SYstem flexibiliTY in the Future through RES

<https://posytyf-h2020.eu/>

