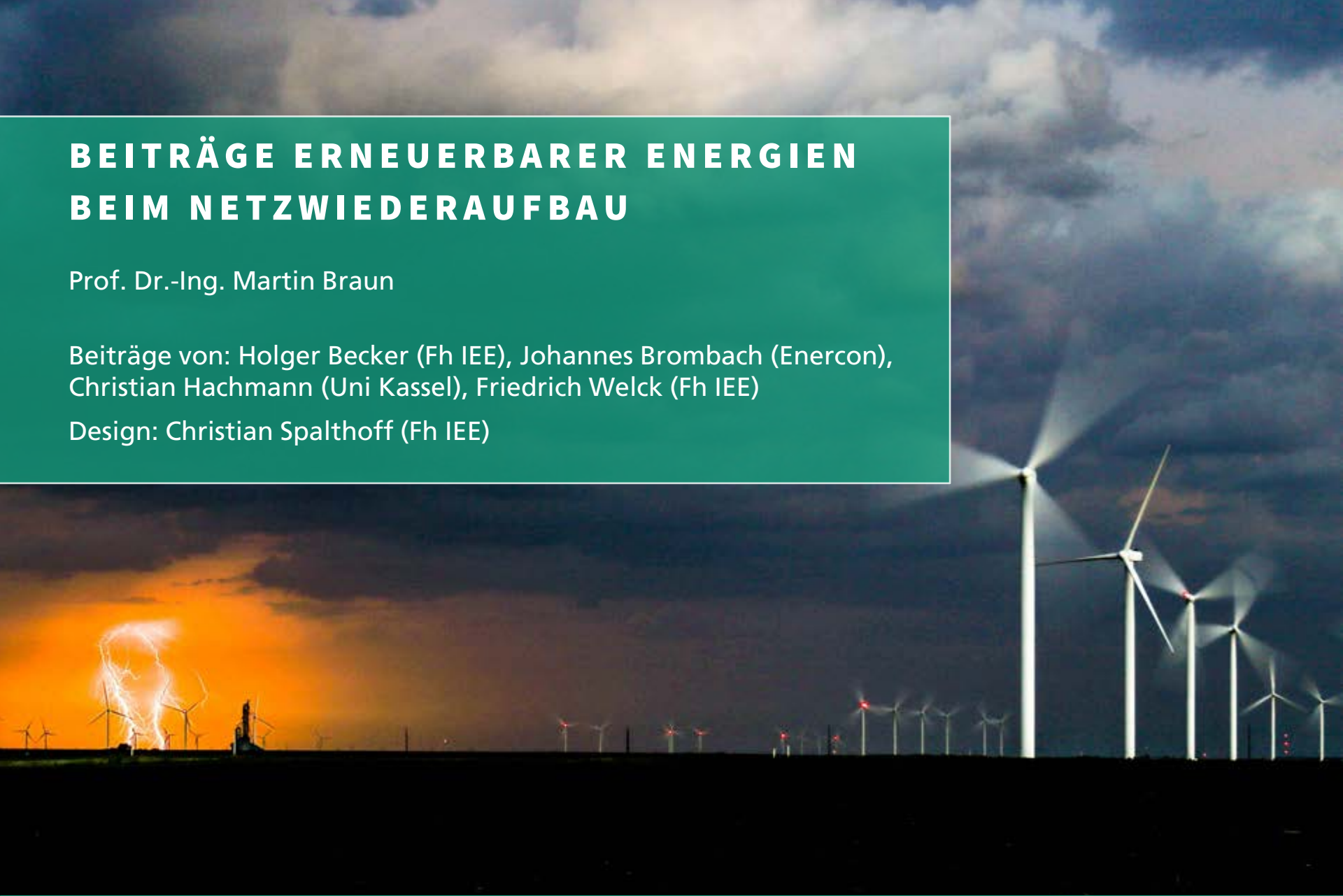


BEITRÄGE ERNEUERBARER ENERGIEN BEIM NETZWIEDERAUFBAU

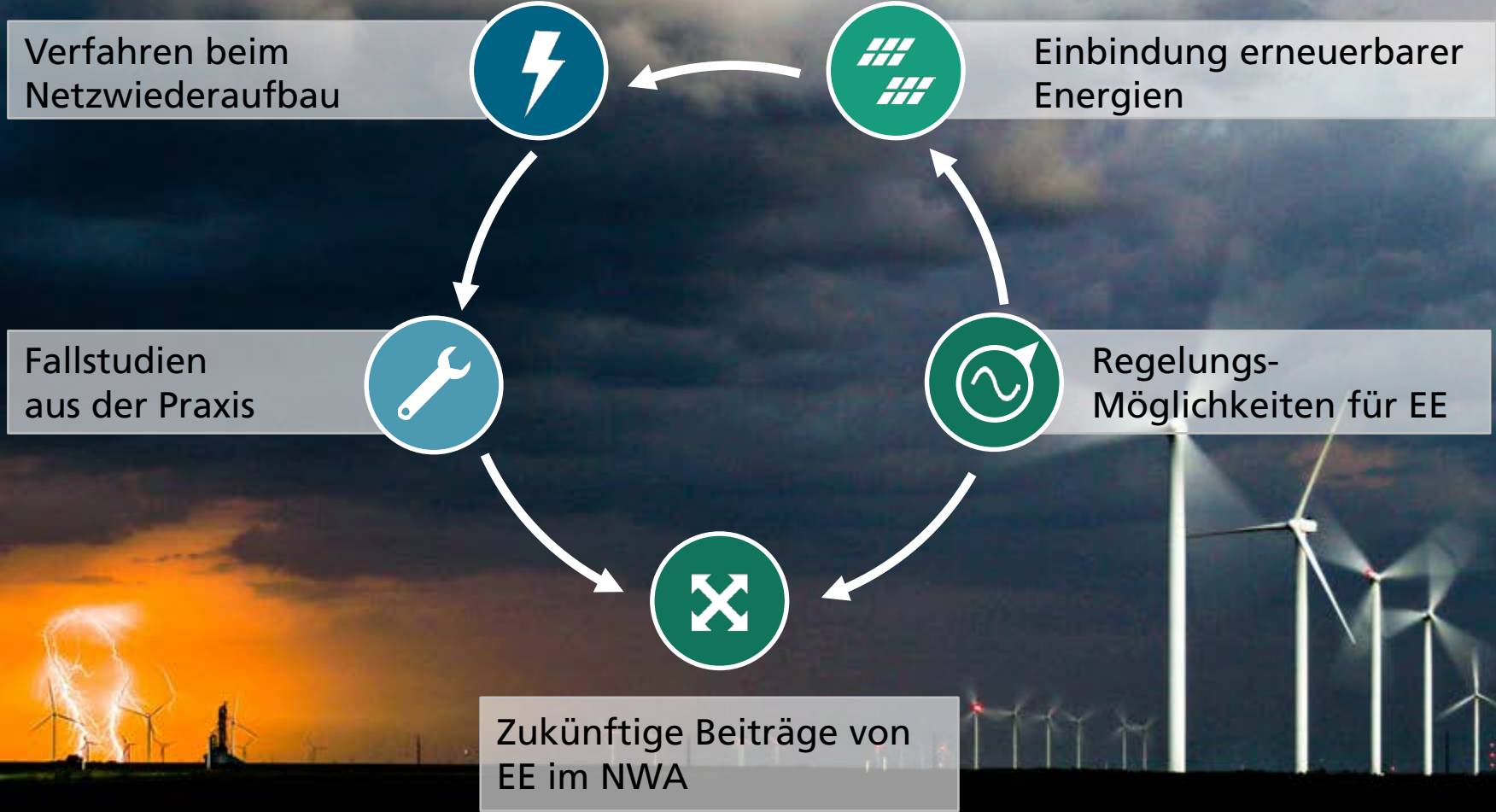
Prof. Dr.-Ing. Martin Braun

Beiträge von: Holger Becker (Fh IEE), Johannes Brombach (Enercon),
Christian Hachmann (Uni Kassel), Friedrich Welck (Fh IEE)

Design: Christian Spalthoff (Fh IEE)



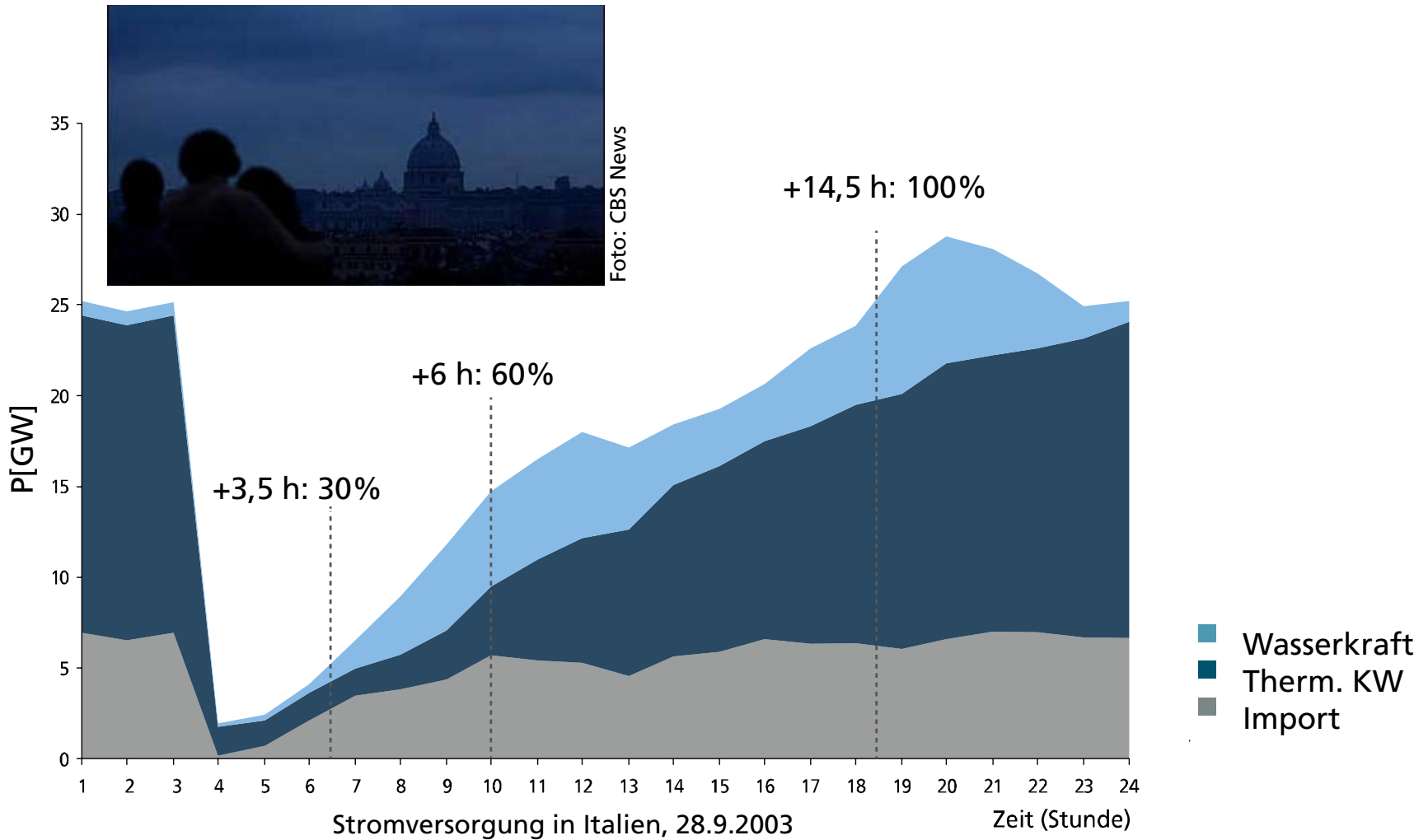
Inhalt





- 28. Sep. 2003** In Italien und der Vatikanstadt kam es um 3:30 Uhr zu einem Stromausfall. Ursache: Unterbrechung zweier Stromleitungen aus Frankreich und der Schweiz nach einem Lichtbogen zwischen Baum und Leitung an der Lukmanierleitung
- 4. Nov. 2006** Überlastung des Stromnetzes nach Freischaltung einer Leitung
Teile von Deutschland, Frankreich, Belgien, Italien, Österreich, Spanien waren teilweise bis zu 120 Minuten ohne Strom
- 31. Juli 2012** Überlastung des Stromnetzes, Stromausfall in 20 von 28 Bundesstaaten Indiens.
600 Millionen Menschen betroffen
- 31. März 2015** Nach Ausfall von Kraftwerken Abtrennung der Türkei vom europäischen Netz.
76 Millionen Menschen – Dauer 9 Stunden

Überregionale Störfälle – Beispiel Italien 2003



[Nach: Berizzi, A., „The Italian 2003 blackout“, IEEE PES General Meeting 2004]

Netzwiederaufbau heute

1 Schwarzfall

Lageanalyse (Informationen sammeln),
Personal einberufen

2 Lasten und Netz- konfiguration vorbereiten EE-Anlagen ausschalten, soweit möglich

evtl. auch Kraftwerke im Eigenbedarf

3 Startvorgang mit Schwarzstarteinheit

Pumpspeicherwerk startet
in Drehzahlregelung

oder kleine
Gasturbine



- Elektrifizierung Netz bis zum
nächsten Kraftwerk

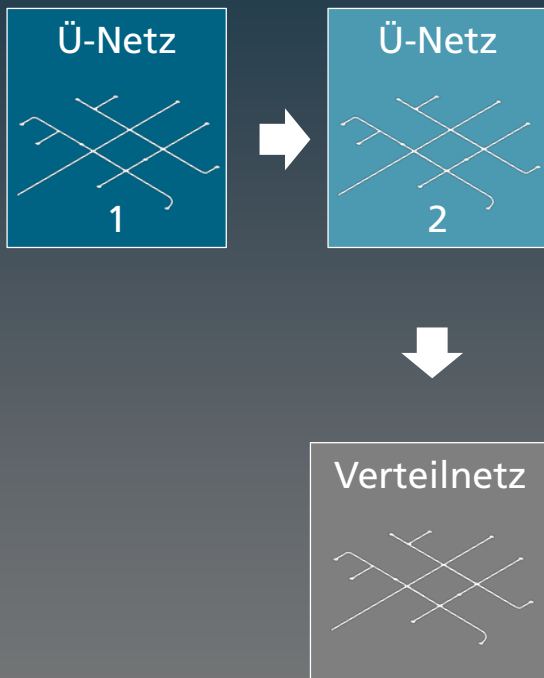
5 Synchronisation von Netzinseln

4 Wenn genügend Leistung: Zuschaltung von Last und Verteilungsnetzen (Cold-Load-Pickup, EE starten automatisch)

- Kraftwerk wird gestartet (Last)
- Kraftwerk wird belastet
(Erzeugung),
Sicherstellung der Mindestlast

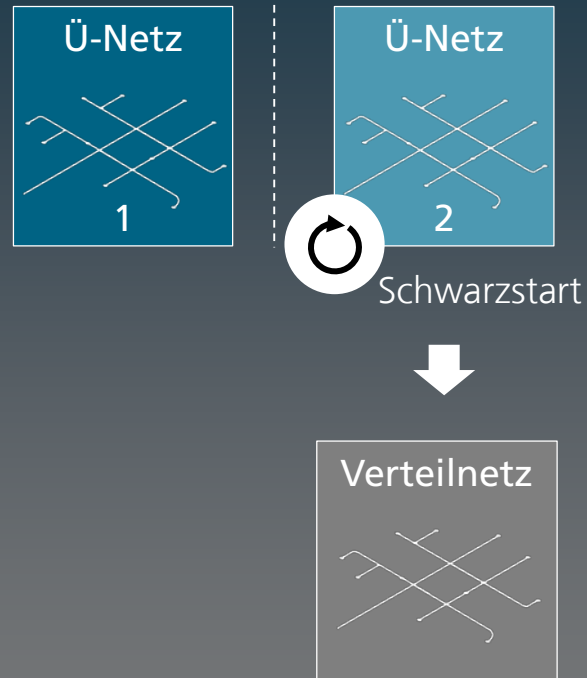
NWA-Strategien

Variante 1:



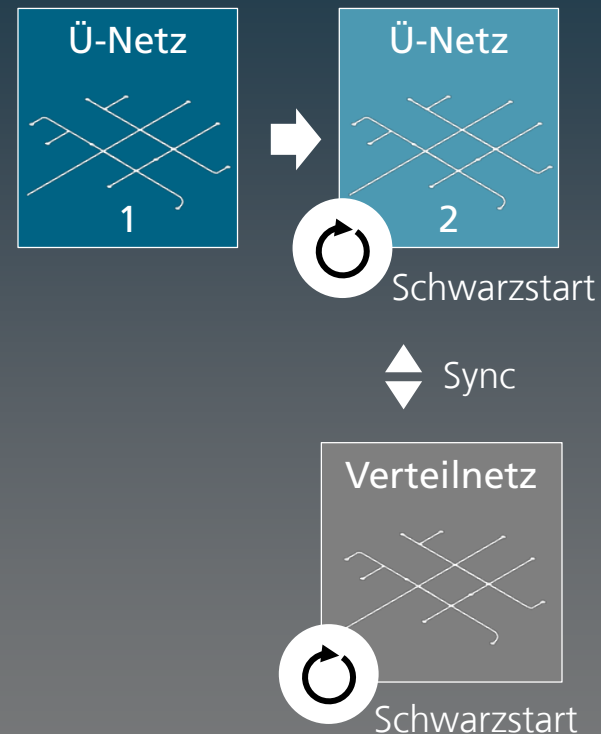
- Wiederversorgung über Nachbarnetz

Variante 2:



- Netzinsel Übertragungsnetz
- Danach Zuschaltung Verteilnetz

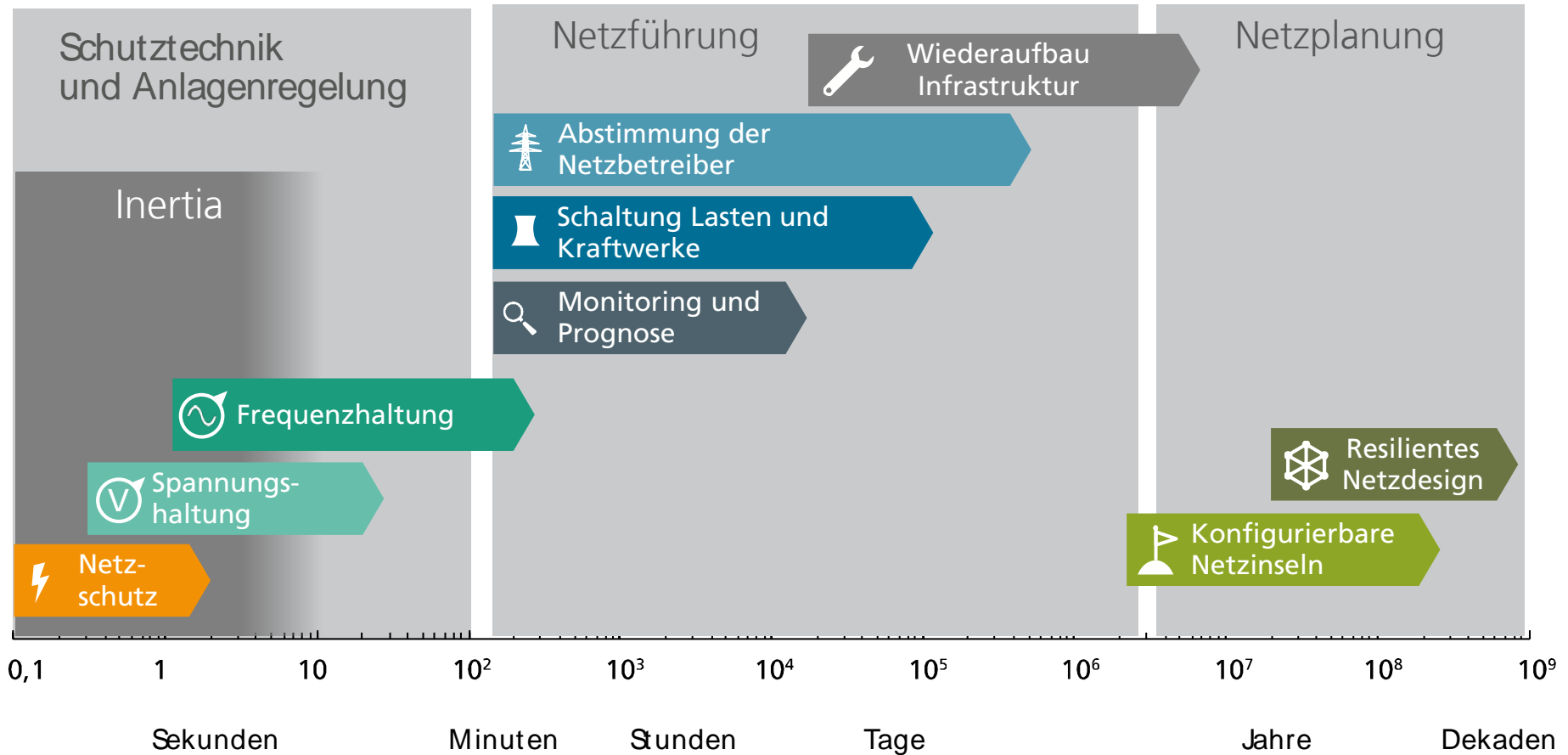
Variante 3:



- Netzinsel Verteilungsnetz
- Danach Rücksynchronisation mit Übertragungsnetz

Nach: Gawlik et al.: Review on Network Restoration Strategies as a Part of the RestoreGrid4RES Project. 15. Symposium Energieinnovation, 2018, Graz/Austria

Netzwiederaufbau über verschiedene Zeitskalen



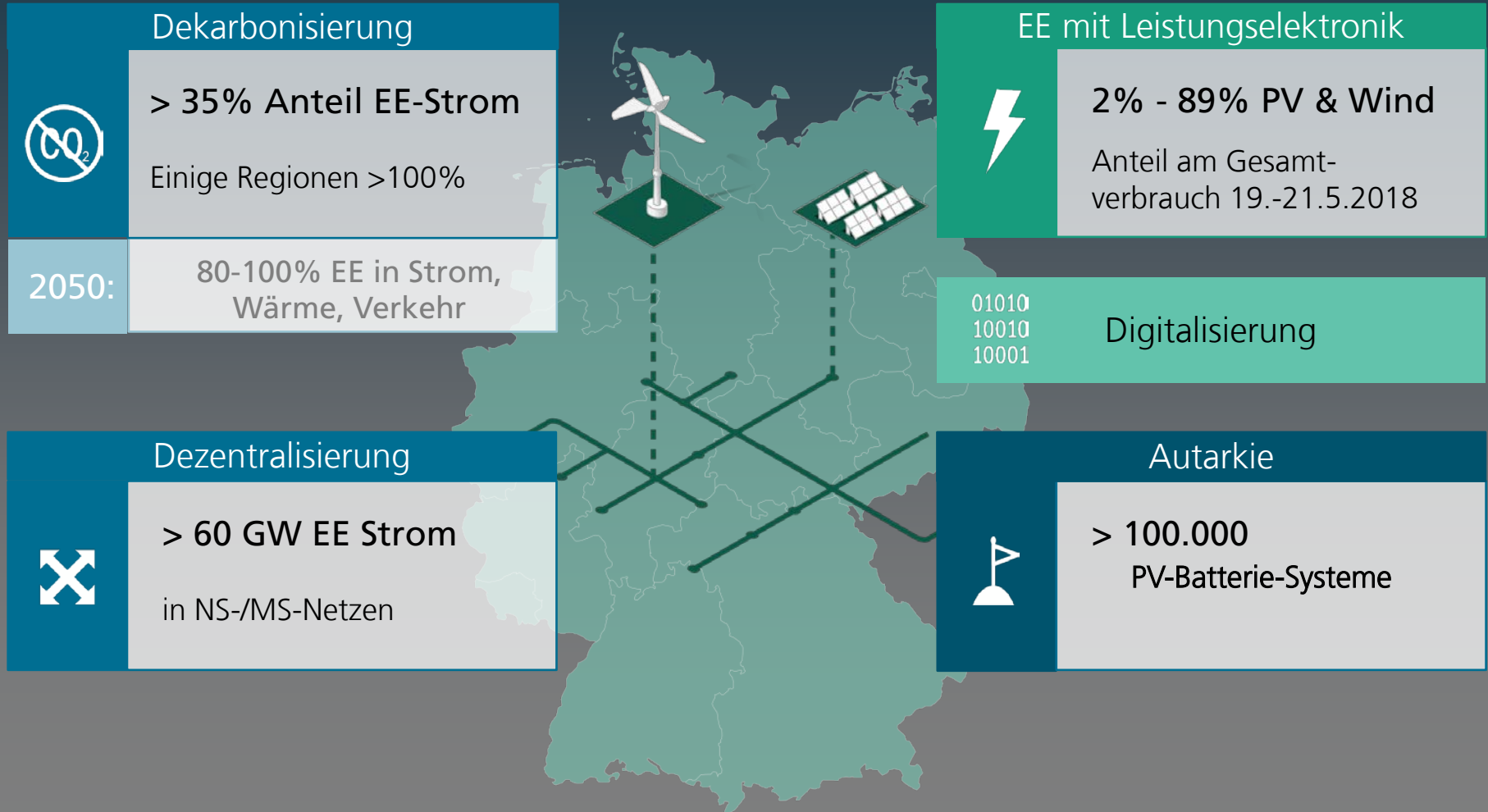
Inhalt

Verfahren beim
Netzwiederaufbau



Einbindung erneuerbarer
Energien

Energiewende (Status – Szenarien – Megatrends)



PV und Windenergie sind systemrelevant

Bedenken beim Einsatz EE im NWA

- Wetterabhängige, schwankende Erzeugung
→ zuverlässige Verfügbarkeit für den NWA?
→ Wie kann Last-Erzeugungs-Bilanz stabil ausgeglichen werden?
- Wechselrichterbasiert → Beitrag zur Systemträgheit?
- Anlagen Status / Vorhersage / Ansteuerung
→ Kommunikation im Schwarzfall?
- „Back-up“-Aufwand (Sicherheit und Zuverlässigkeit)
- Koordinationsbedarf und Verantwortlichkeiten (wenige große Kraftwerke besser zu koordinieren als viele dezentrale Anlagen)
- Eingriffe durch automatische Lastabschaltung bei Unterfrequenz („rolling black-out“)

Inhalt

Verfahren beim
Netzwiederaufbau

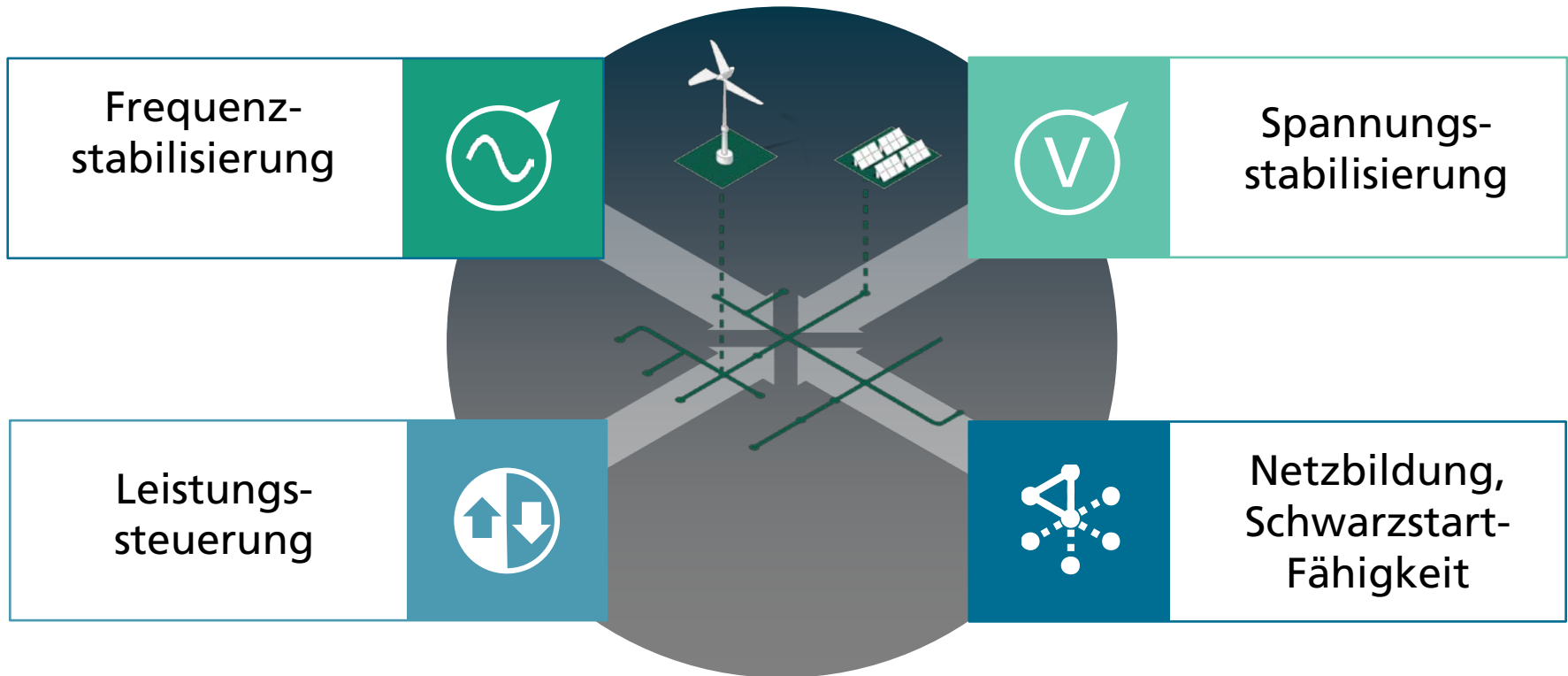


Einbindung erneuerbarer
Energien



Regelungs-
Möglichkeiten für EE

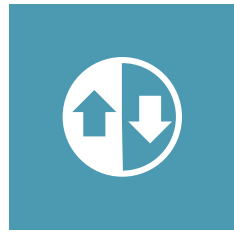
Möglicher Beitrag im NWA durch EE-Anlagen



Zu berücksichtigen:

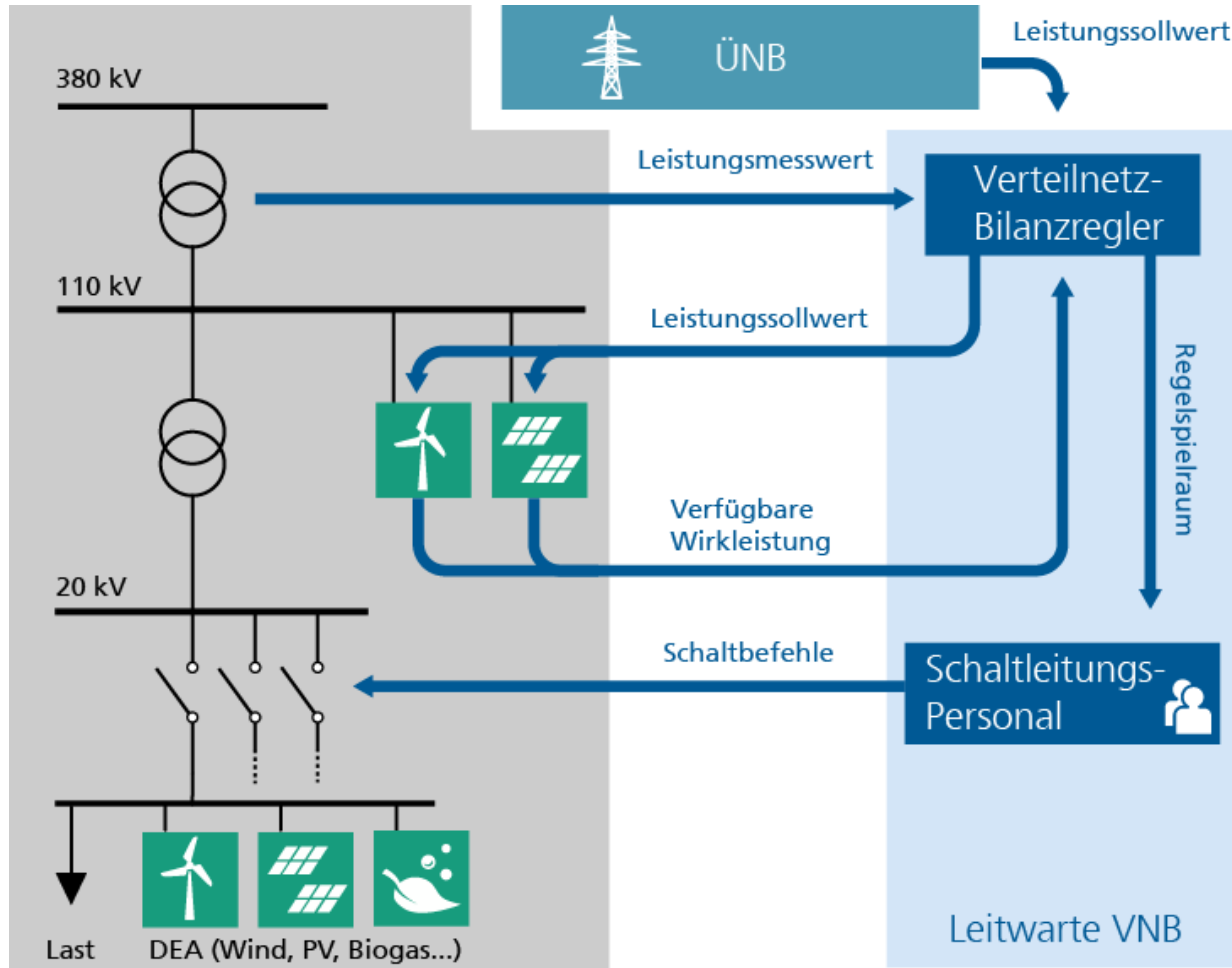
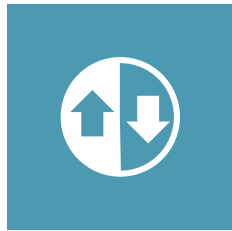
- Bei PV- und Windenergieanlagen ist die Verfügbarkeit wetterabhängig
- Schwarzfallfeste Kommunikationsanbindung teilweise erforderlich: Status-Informationen, Vorhersage, Fernsteuerbarkeit

Leistungssteuerung durch EE-Anlagen



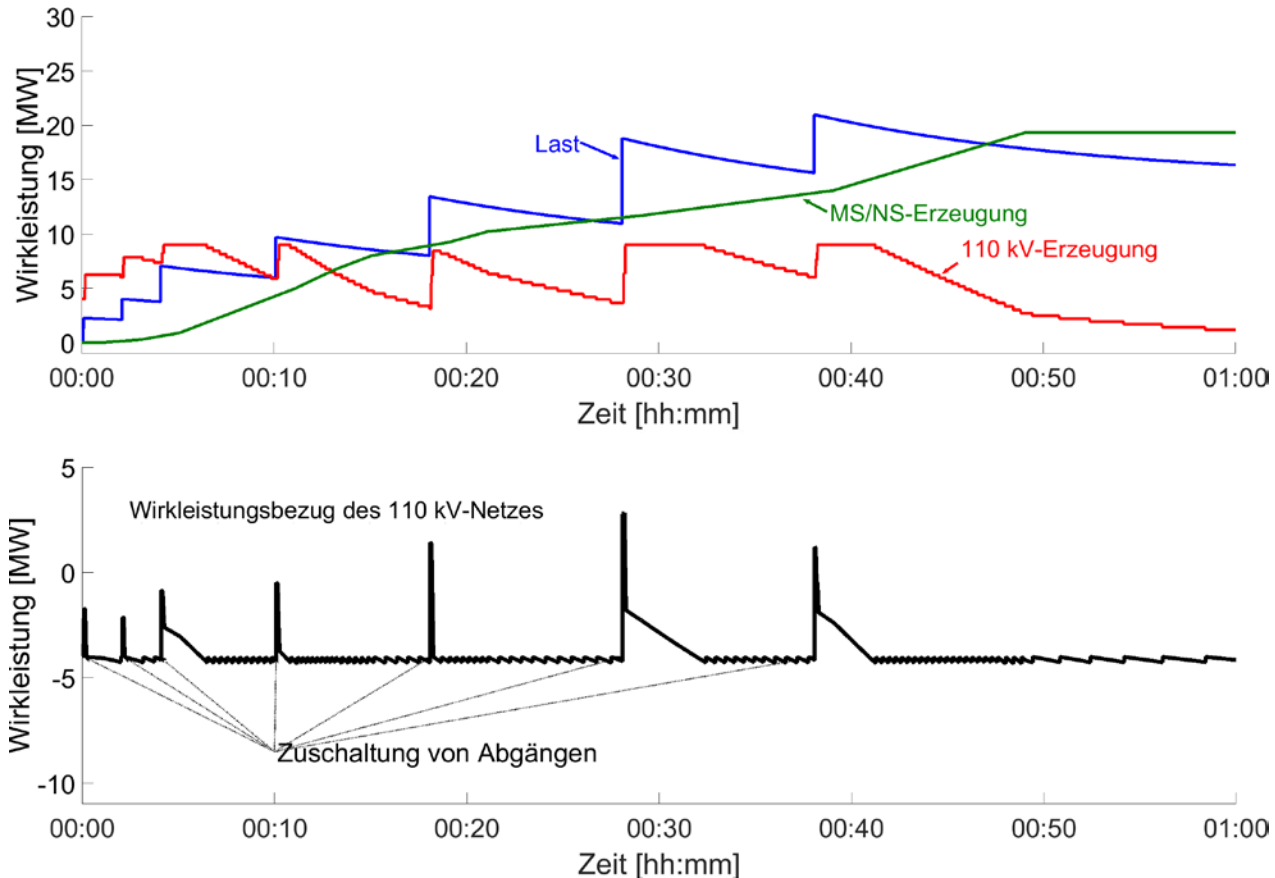
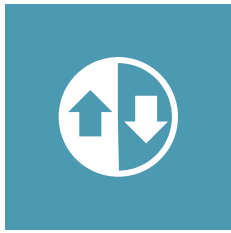
- Wirk- und Blindleistungsvorgaben, falls USV-abgesicherte Kommunikation
z.B. Startpunkt: $P = Q = 0$
- Schnell nachgeführt auf neuen Sollwert innerhalb von Sekunden
→ Gradienten der Leistungsänderung definierbar
- Nur wenig Energie zum Starten der Anlagen notwendig
→ schnell verfügbar
- Leistungsverfügbarkeit bei PV und Windenergie wetterabhängig
→ konstante Leistungsbereitstellung bei gedrosseltem Betrieb über einen bestimmten Zeitraum möglich
- Potenzial zur Einhaltung von Leistungssollwerten (z.B. durch ÜNB):
durch regelbare Anlagen kann die Leistungsschwankung der nicht-geregelten Last und Erzeugung auf unteren Spannungsebenen ausgeglichen werden
→ Fallstudie

Leistungssteuerung durch EE-Anlagen



Nach Braun et al.: The Future of Power System Restoration - Using Distributed Energy Resources as a Force to Get Back Online, IEEE Power & Energy Magazine, Nov/Dec 2018 (to be published)

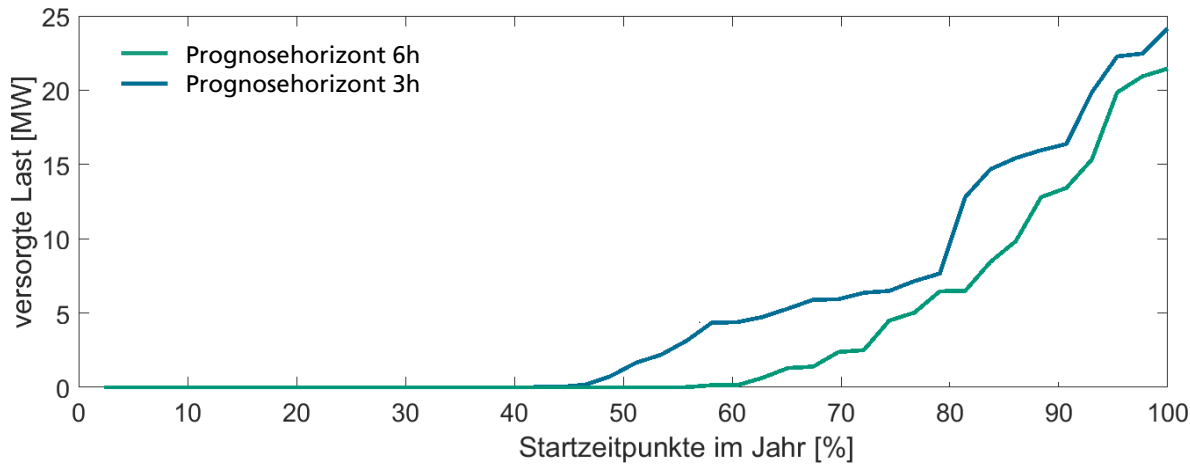
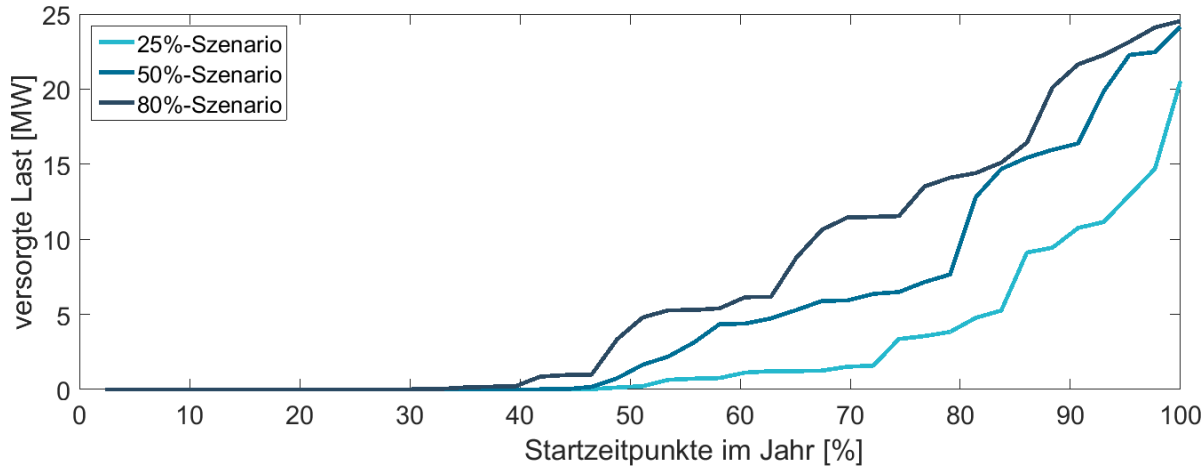
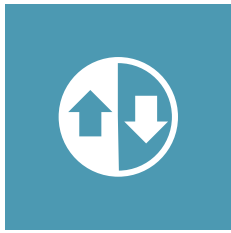
Leistungssteuerung durch EE-Anlagen



Quelle: Braun et al.: The Future of Power System Restoration - Using Distributed Energy Resources as a Force to Get Back Online, IEEE Power & Energy Magazine, Nov/Dec 2018 (to be published)

Leistungssteuerung durch EE-Anlagen

Verfügbarkeit



- Abgangsscharfe Informationen über installierte Erzeugungsleistung nach Typen sowie erwartete Last ist entscheidend.
- DG-Zubau vergrößert Handlungsoptionen
- Je länger der Zeitraum, über den Ausregelung möglich sein soll, desto geringer der Handlungsspielraum

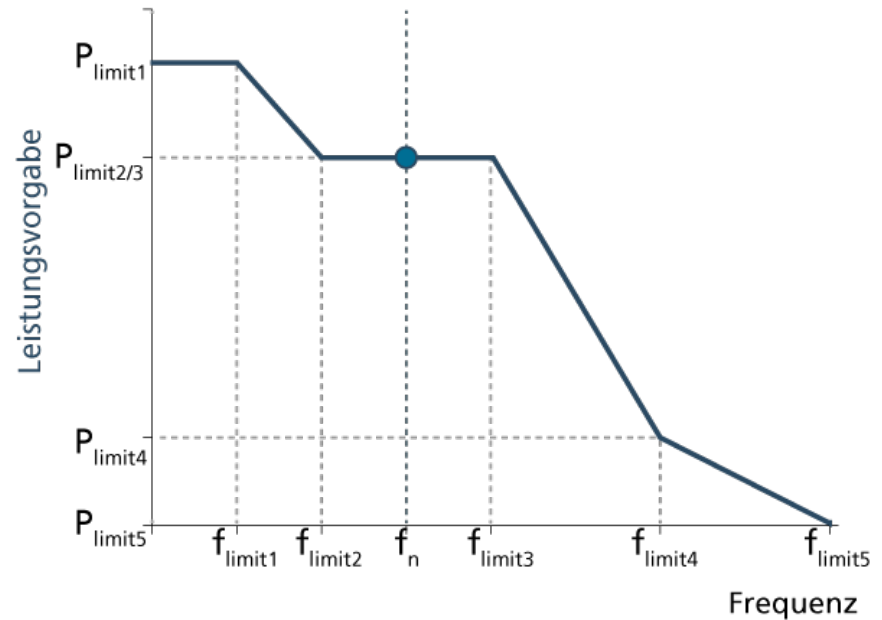
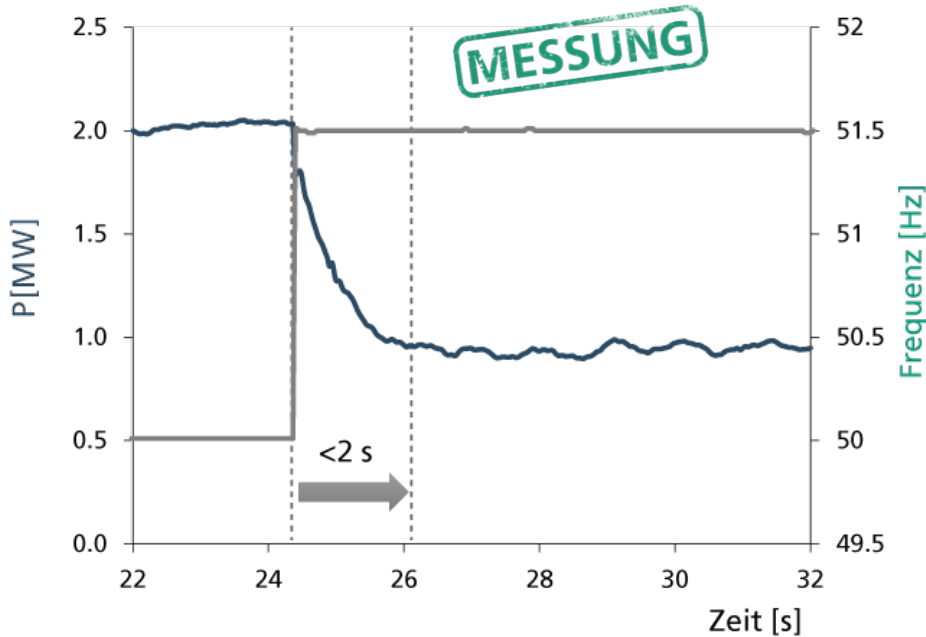
Frequenzstabilisierung durch Wind + PV-Anlagen



- Zentrale Wirkleistungsvorgabe durch Netzbetreiber
 - Negative Regelreserve bei Leistungseinspeisung
 - Positive Regelreserve bei angedrosselter Betriebsweise
- Begrenzung des Leistungsgradienten
- Lokale $P(f)$ – Regelung
 - Primärregelung
 - Schnelle Wirkleistungsregelung
- “virtuelle Trägheit” z.B durch Entkopplung Rotordrehzahl und Netzfrequenz (auch Frequenzdämpfung)

Frequenzstabilisierung durch Wind + PV-Anlagen

Lokale, schnelle P(f) – Regelung



Leistungsmessung einer 2-MW-Windanlage bei einem simulierten Frequenzanstieg um 1,5 Hz

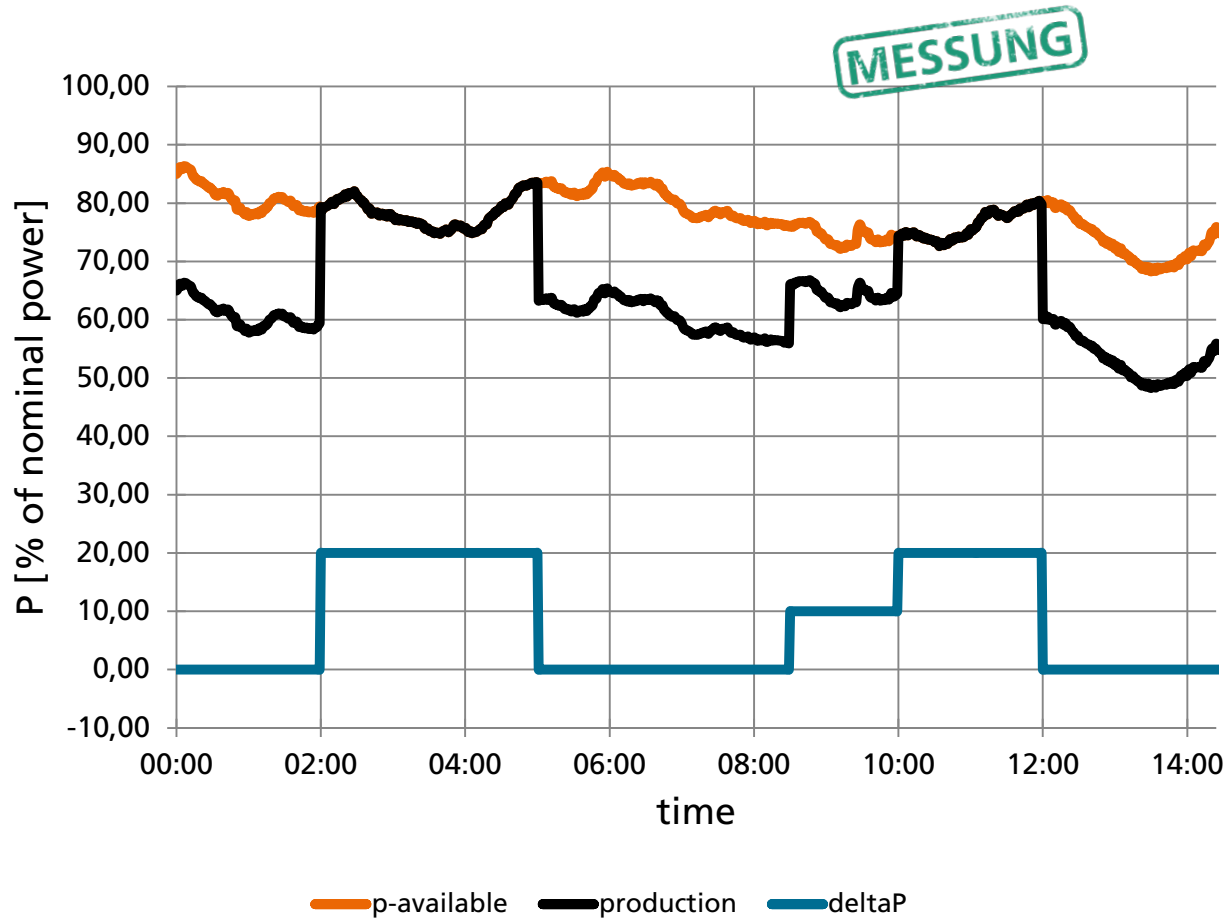
Parametrierbare Leistungs-Frequenz-Kurve einer Windenergieanlage mit positiven und negativen aktiven Leistungsreserven

Bildquellen: Enercon

Quelle: Braun et al.: The Future of Power System Restoration - Using Distributed Energy Resources as a Force to Get Back Online, IEEE Power & Energy Magazine, Nov/Dec 2018 (to be published)

Frequenzstabilisierung durch Wind + PV-Anlagen

Zentrale Wirkleistungsvorgabe durch Netzbetreiber



Bildquellen: Enercon

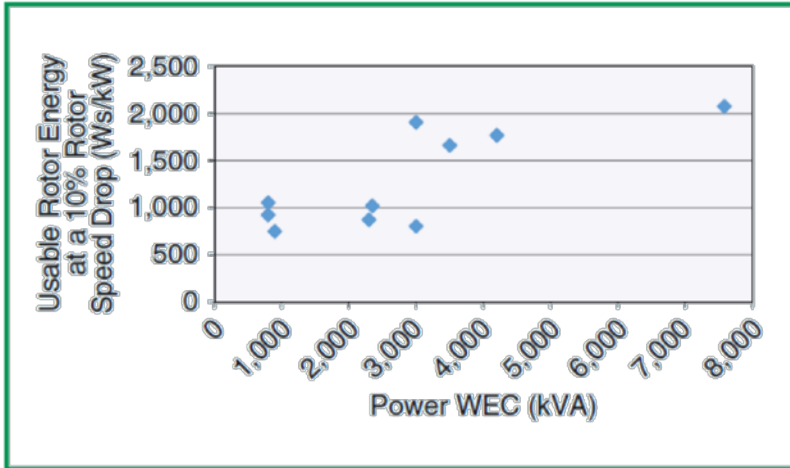
Quelle: Braun et al.: The Future of Power System Restoration - Using Distributed Energy Resources as a Force to Get Back Online, IEEE Power & Energy Magazine, Nov/Dec 2018 (to be published)



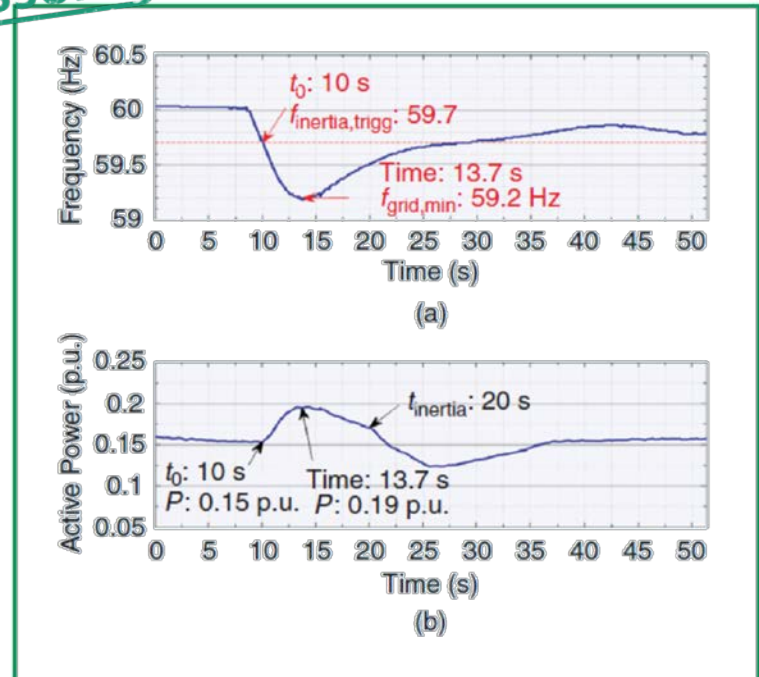
Frequenzstabilisierung durch Wind + PV-Anlagen

Virtuelle Trägheit

Bei Windkraftanlagen steht mehr Energie zur Verfügung und kann auch innerhalb eines größeren Frequenzbereichs mobilisiert werden.



MESSUNG



Frequenzabfall von 50 Hz auf 47,5 Hz:

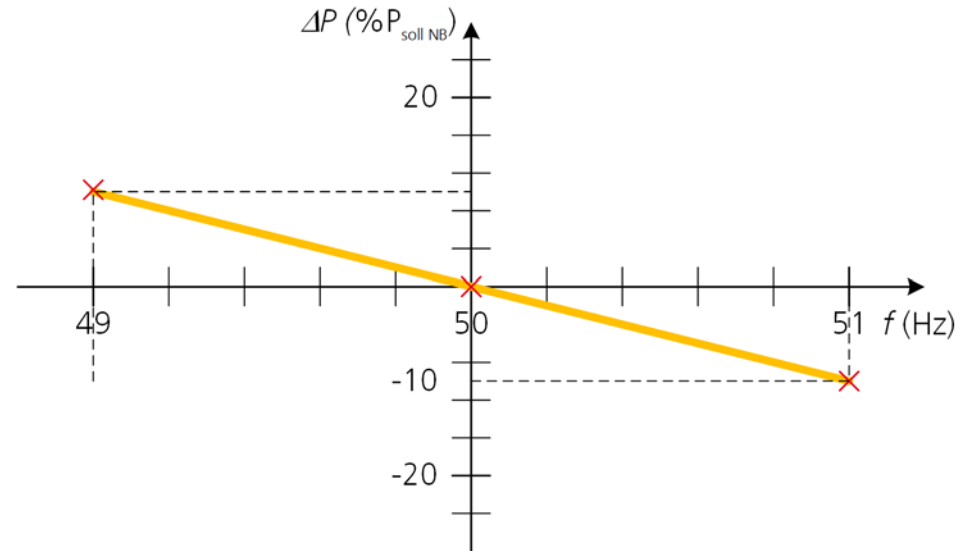
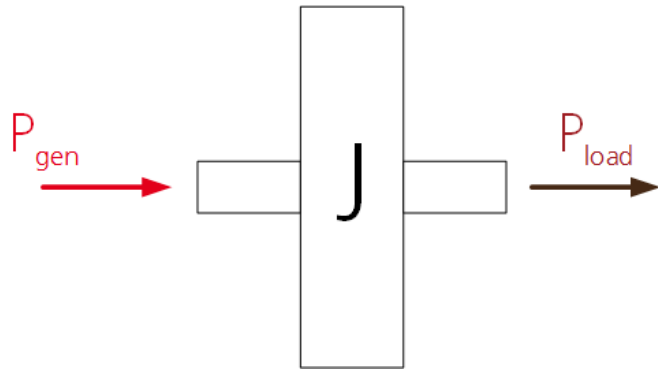
Direkt gekoppelte Synchronmaschinen geben $\frac{50^2 - 47,5^2}{50^2} = 9,75\%$ der in der Schwungmasse gespeicherten Energie ans Netz ab. $E = \frac{1}{2} J \omega^2$

Bei Anlaufzeitkonstante von 5 s:
 $\text{ca. } 5 \frac{\text{Ws}}{\text{W}} \cdot 0,0975 \approx 500 \frac{\text{Ws}}{\text{kW}}$

Bildquellen: Enercon

Quelle: Braun et al.: The Future of Power System Restoration - Using Distributed Energy Resources as a Force to Get Back Online, IEEE Power & Energy Magazine, Nov/Dec 2018 (to be published)

Frequenzstabilisierung durch Windenergieanlage - Simulation (1/3)



$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} (M_{gen} - M_{load})$$

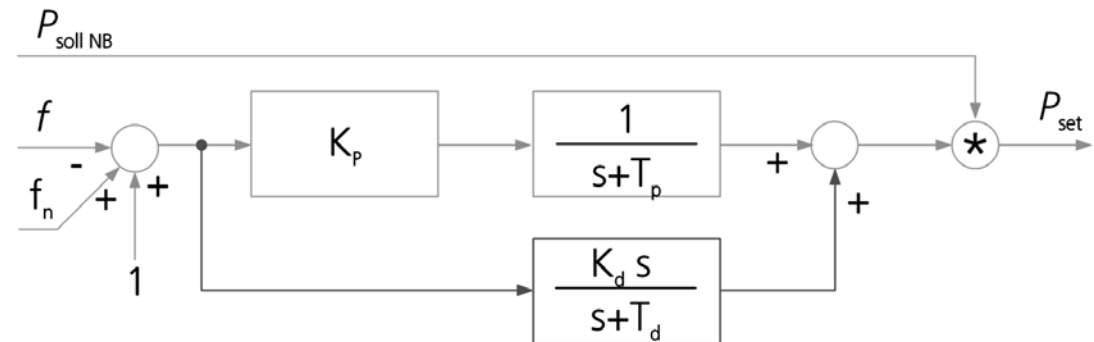
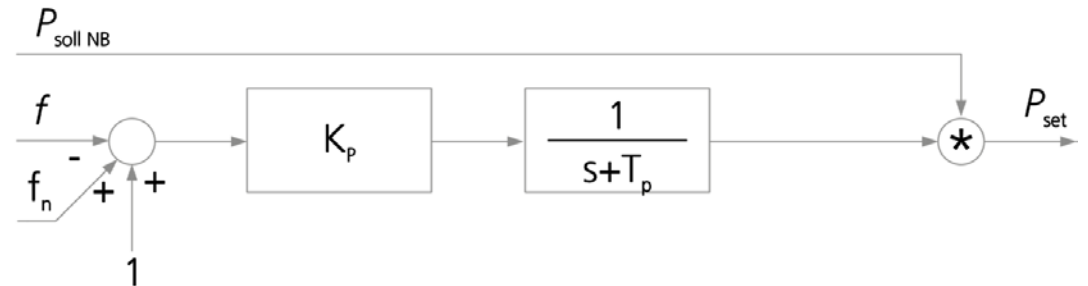
- Lasterhöhung → Frequenzsenkung
- Windenergieanlage kann zur Frequenzstabilisierung über Kennlinie beitragen

Quelle: Holger Becker: Forschungsprojekt NETZ:KRAFT: interne Projektpräsentation

Frequenzstabilisierung durch Windenergieanlage - Simulation (2/3)



- Variante 2a:
 - $T_p = 5$ s (frequency restoration reserve, FRR)
- Variante 2b:
 - $T_p = 0.1$ s (fast frequency response, FFR)
- Variante 3:
 - Trägheitsantwort



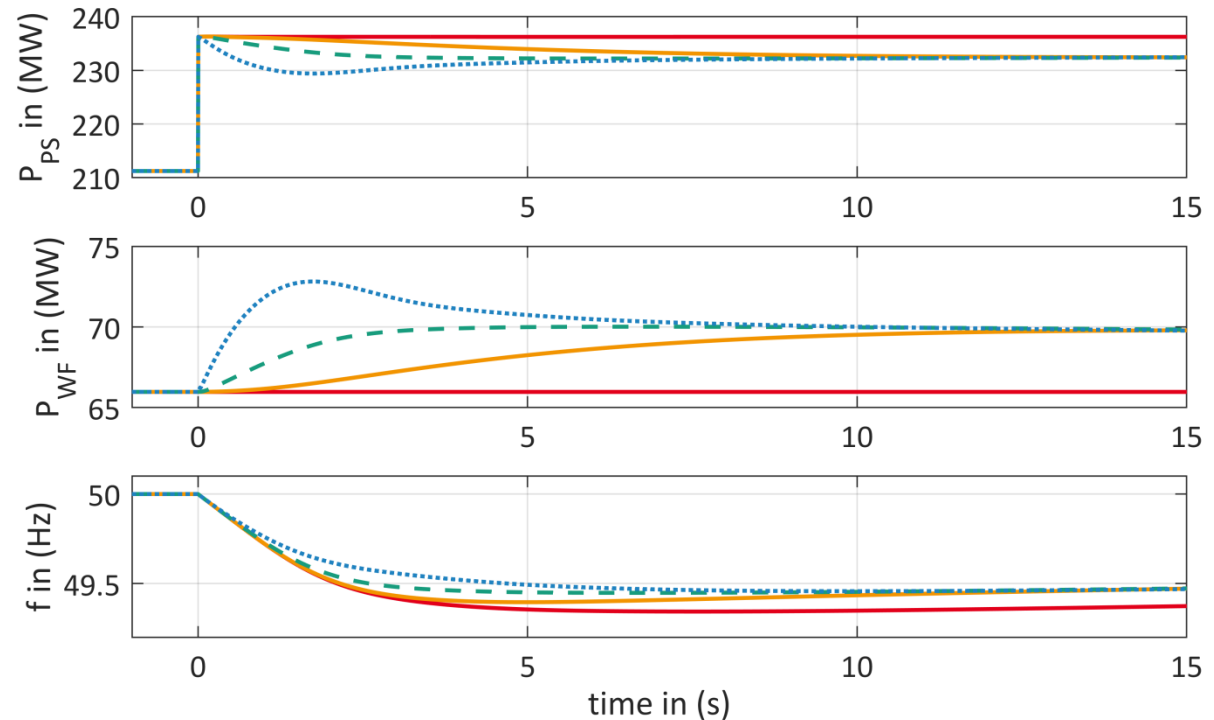
Quelle: Holger Becker: Forschungsprojekt NETZ:KRAFT: interne Projektpräsentation

Frequenzstabilisierung durch Windenergieanlage - Simulation (3/3)



Load connection

- Basis: $P(WF) = \text{const}$
- 2a: WF: FRR
- 2b: WF: FFR
- 3: WF: inertia



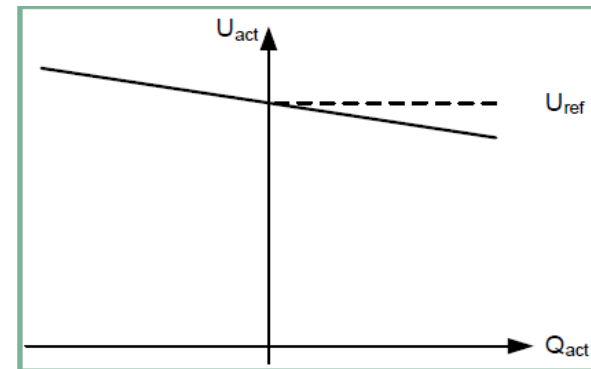
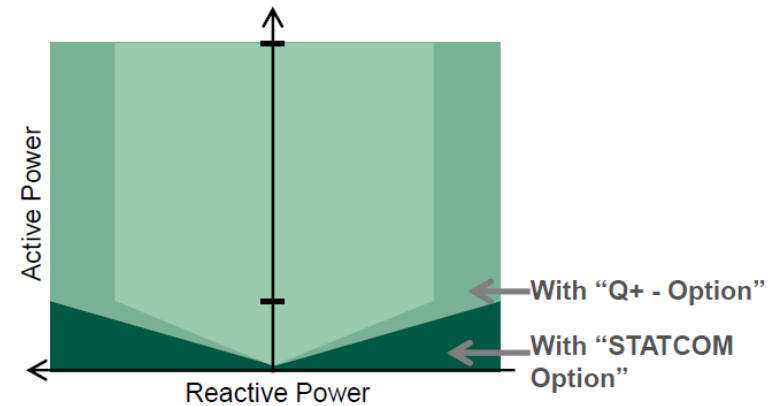
- Eine schnelle Frequenzantwort dämpft den Frequenztieftpunkt
- Trägheitsantwort verringert den RoCoF

Quelle: Holger Becker: Forschungsprojekt NETZ:KRAFT: interne Projektpräsentation

Spannungsstabilisierung durch EE



- Zentrale Blindleistungsvorgabe durch Netzbetreiber (Blindleistungskompensation, Spannungshaltung)
 - Windenergie: STATCOM-Funktionalität
 - Photovoltaik: Q@Night
- Lokale Q(U) – Regelung
 - Primärregelung
 - Schnelle Blindleistungsregelung
- Fault-Ride-Through – Funktionalität
 - Verbleiben am Netz bei Spannungsüberhöhung / -einbruch
 - Blindleistungseinspeisung zur Spannungsstabilisierung



Quelle: Brombach, Schwanka Trevisan: ENERCON INCIDENT CONTROL FOR GRID RESTORATION, panel presentation, IEEE PES GM 2018

Netzbildung durch EE-Anlagen



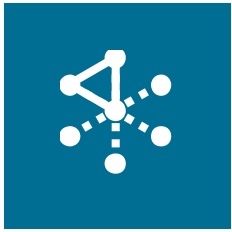
- NWA muss koordiniert stattfinden
 - Kommunikation zwischen Netzbetreiber und EE-Anlage
 - USV-abgesicherte IKT

- Anlage muss starten können, ohne dass Fremdenergie notwendig ist
 - Regelungseinheit muss USV-abgesichert sein
 - Anlage muss über verfügbare erneuerbare Energie starten können
- Windenergie
- Solarenergie
- Biogas

- Wirk- und Blindleistungsreserven notwendig
(angedrosselter Betrieb, wetterbedingt ausreichende Verfügbarkeit)

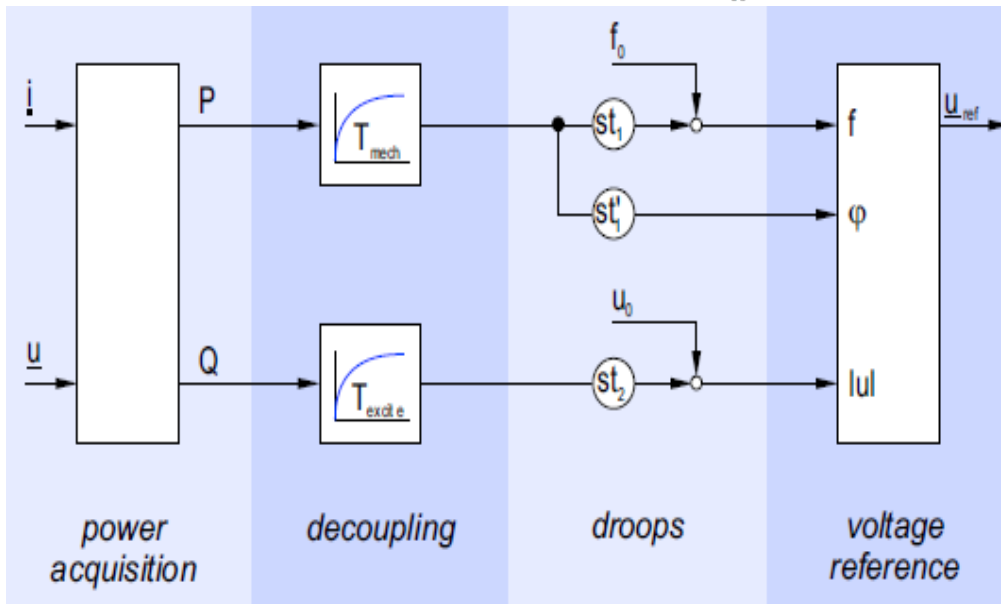
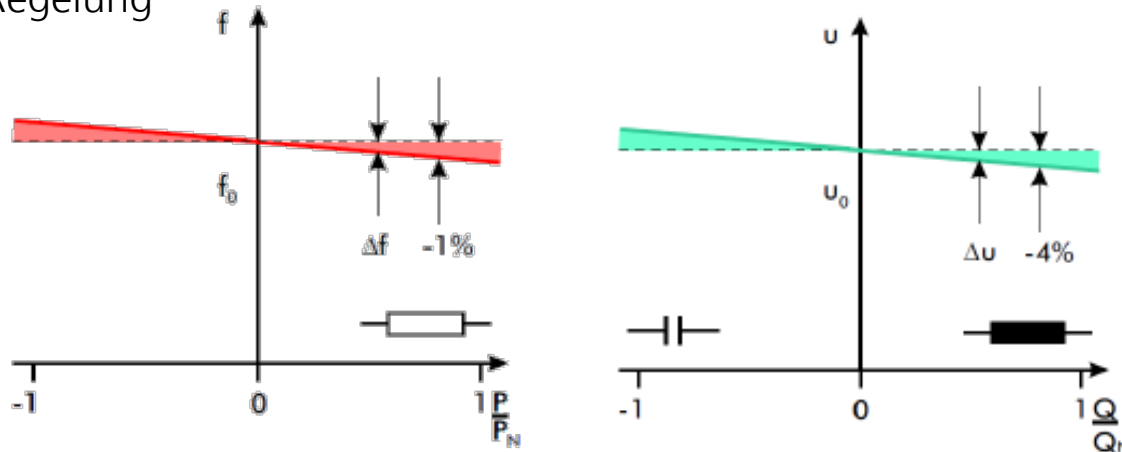
- Direkte Spannungs- und Frequenzregelung
(z.B. Selfsync, virtuelle Synchronmaschine)

- Kurzfristige Überlastbarkeit



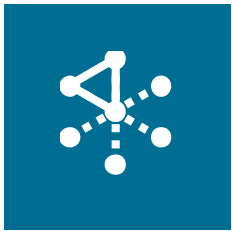
Netzbildung durch EE-Anlagen

Beispiel selfsync-Regelung



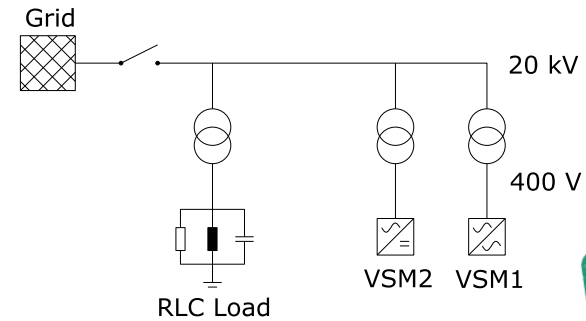
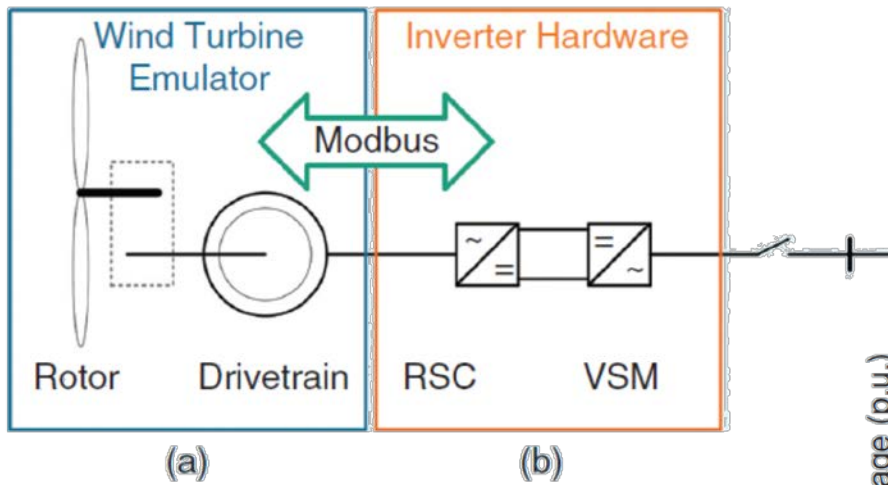
$$\underline{u}_{ref} = |u| \times \sin(2\pi ft) + \varphi.$$

Quelle: A. Engler, Applicability of droops in low voltage grids. International Journal of Distributed Energy Resources 2005

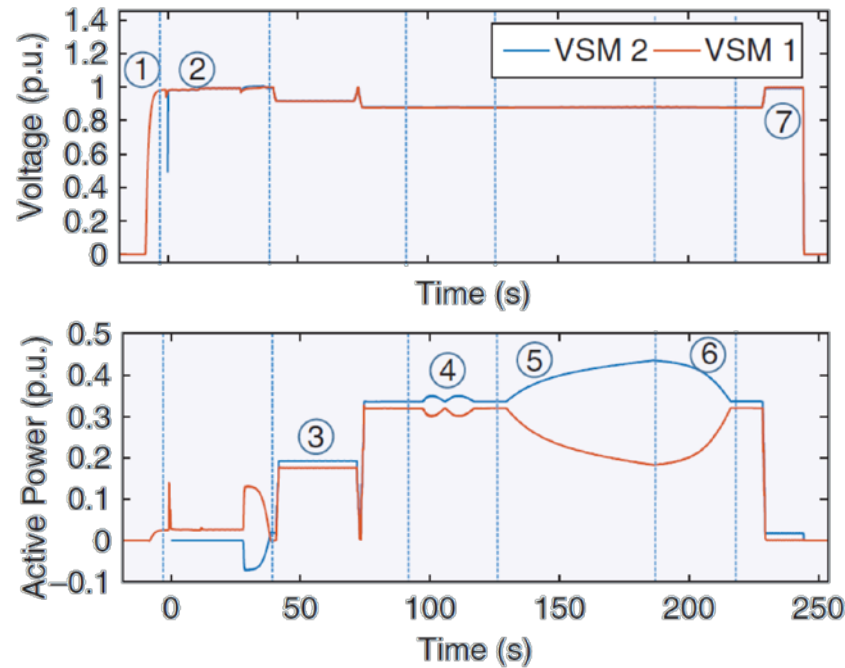


Netzbildung durch EE-Anlagen

Beispiel Laborwechselrichter geregelt als virtuelle Synchronmaschine (VSM)

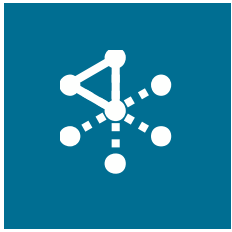


MESSUNG



1. VSM1 netzbildend
2. VSM2 synchronisiert netzbildend
3. Lastzuschaltungen
4. VSM1 mit reduziertem Wind
5. VSM2 übernimmt Last von VSM1
6. VSM1 mit wieder erhöhtem Wind
7. Beide VSM schalten ab

Quelle: Braun et al.: The Future of Power System Restoration - Using Distributed Energy Resources as a Force to Get Back Online, IEEE Power & Energy Magazine, Nov/Dec 2018 (to be published)



Netzbildung durch EE-Anlagen

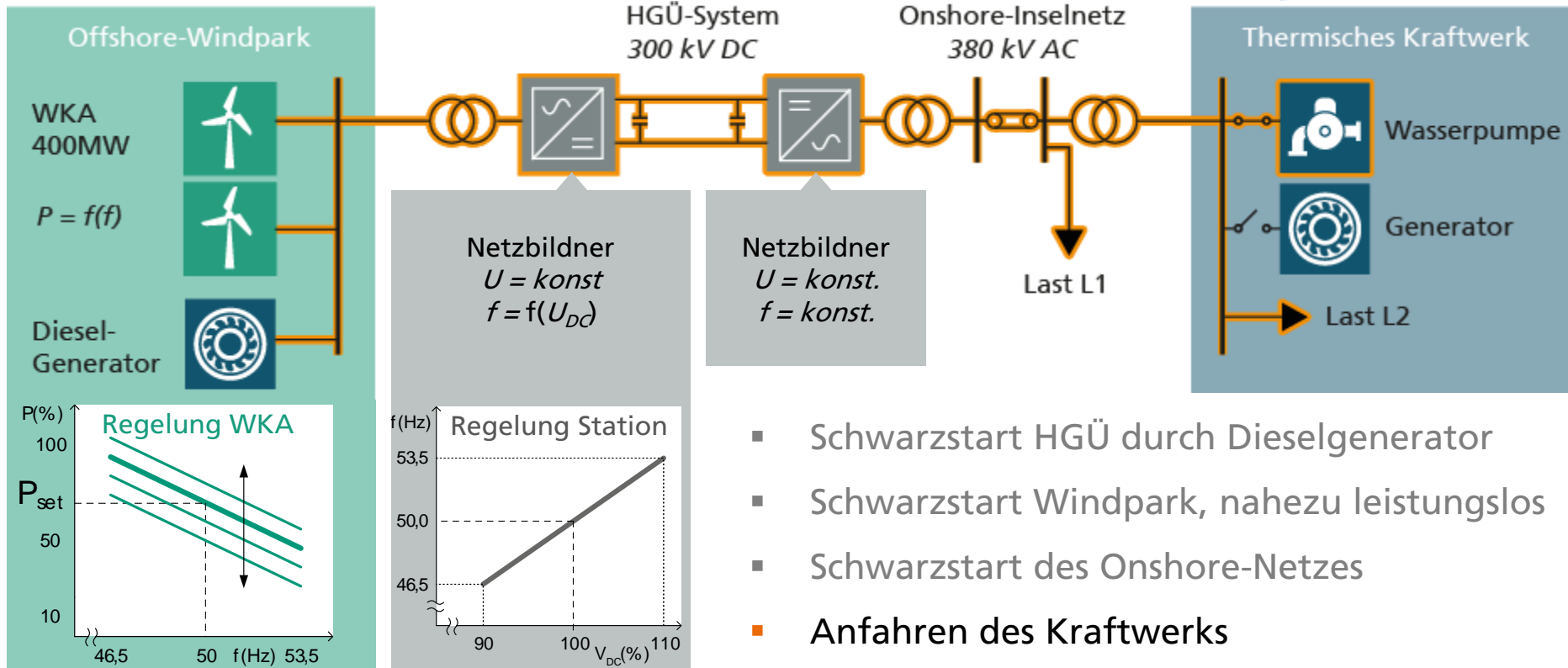
Beispiel Offshore-Windpark (Simulation)

Frequenzabnahme erhöht Leistung

Spannungsverlust senkt Frequenz

Lastzunahme senkt DC-Spannung

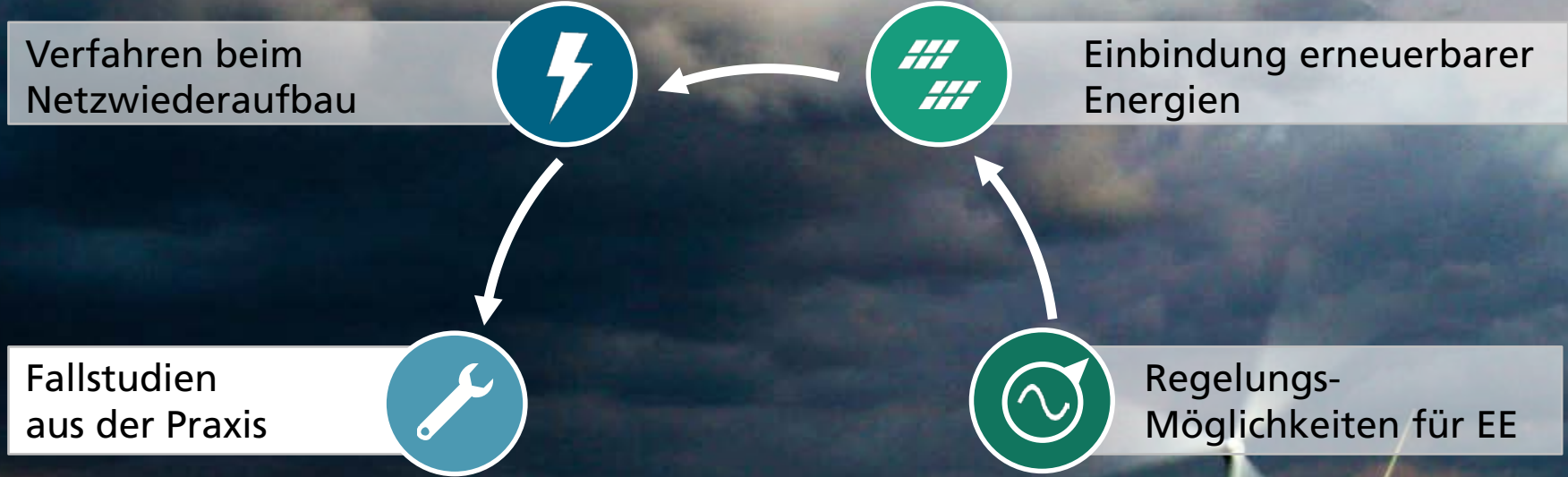
Pumpe startet: hohe Last



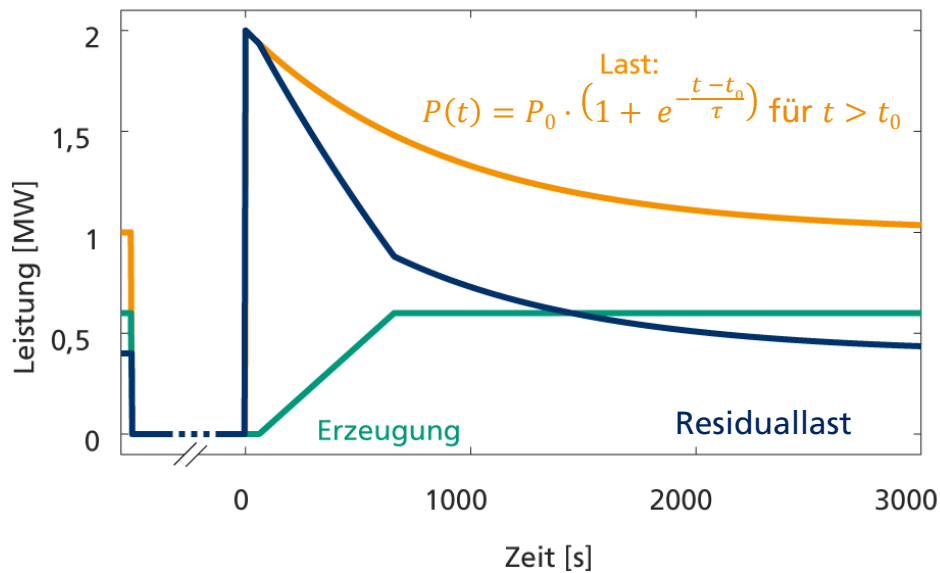
Quelle: Becker, et. al.: System Restoration using VSC-HVDC connected Offshore Wind Power Plant as Black-Start Unit, IEEE EPE 2017, Warswa, Poland

- Schwarzstart HGÜ durch Dieselgenerator
- Schwarzstart Windpark, nahezu leistungslos
- Schwarzstart des Onshore-Netzes
- Anfahren des Kraftwerks

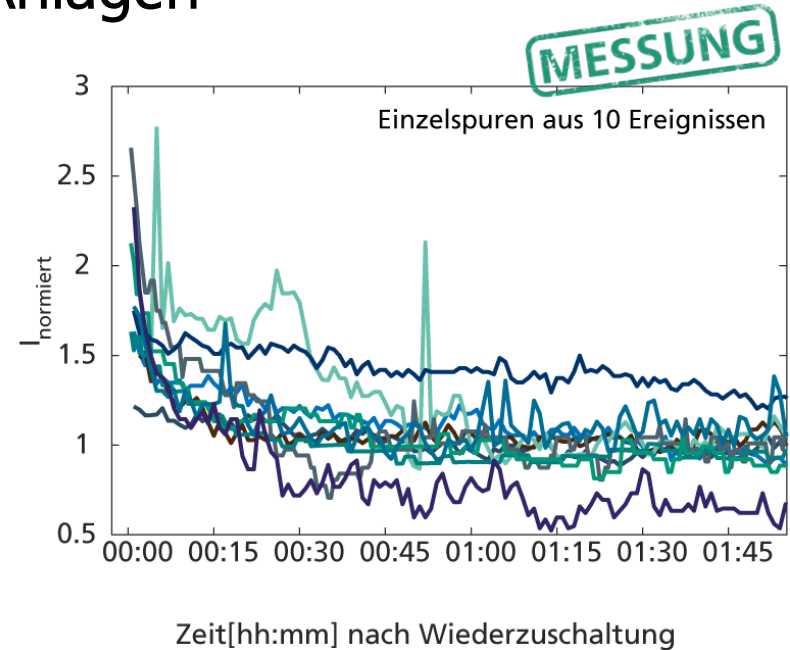
Inhalt



Cold Load Pick Up (CLPU) mit EE-Anlagen



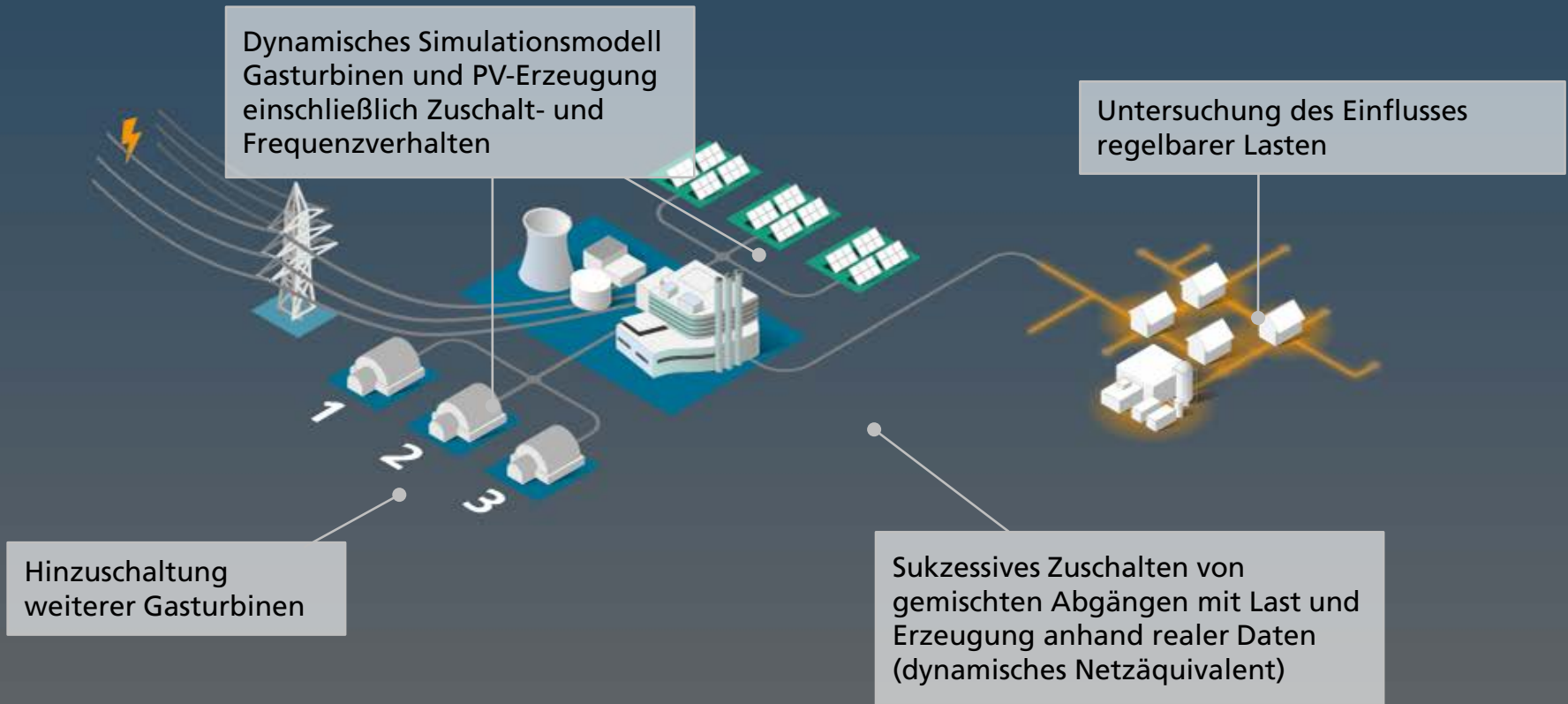
Exemplarischer Lastverlauf mit CLPU für einen Abgang mit 1 MW Last und 600 kW dezentraler Erzeugung



Normierter Stromverlauf nach Wiedereinschaltung in gleicher Konfiguration nach längerem Netzfehler für 10 reale Störungen bei vernachlässigbarer dezentraler Einspeisung

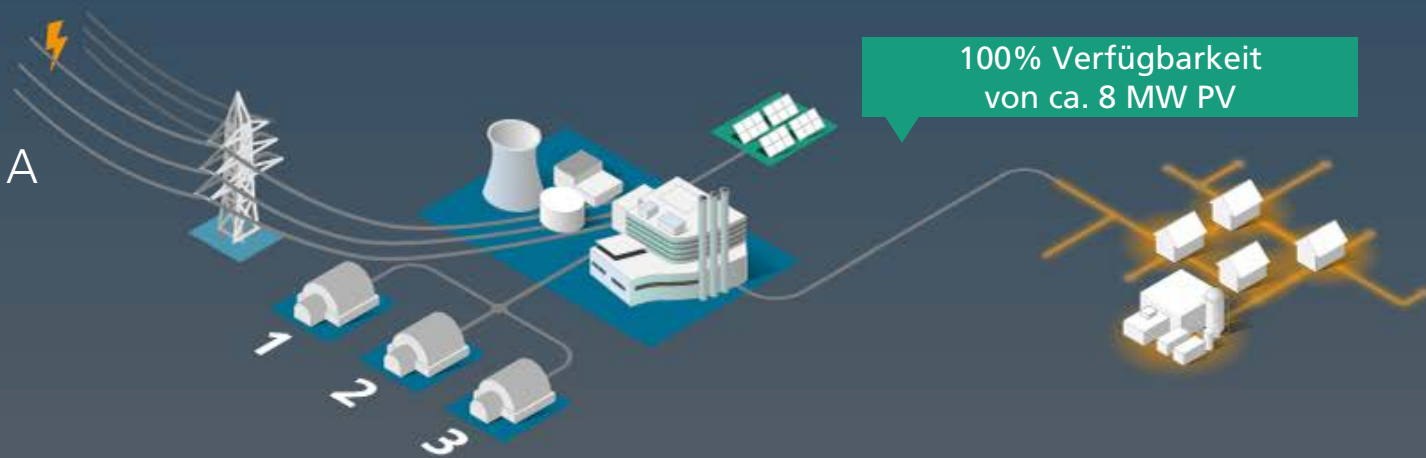
Netzwiederaufbau einer Großstadt mit Gaskraftwerk

Gaskraftwerk im Inselnetzbetrieb

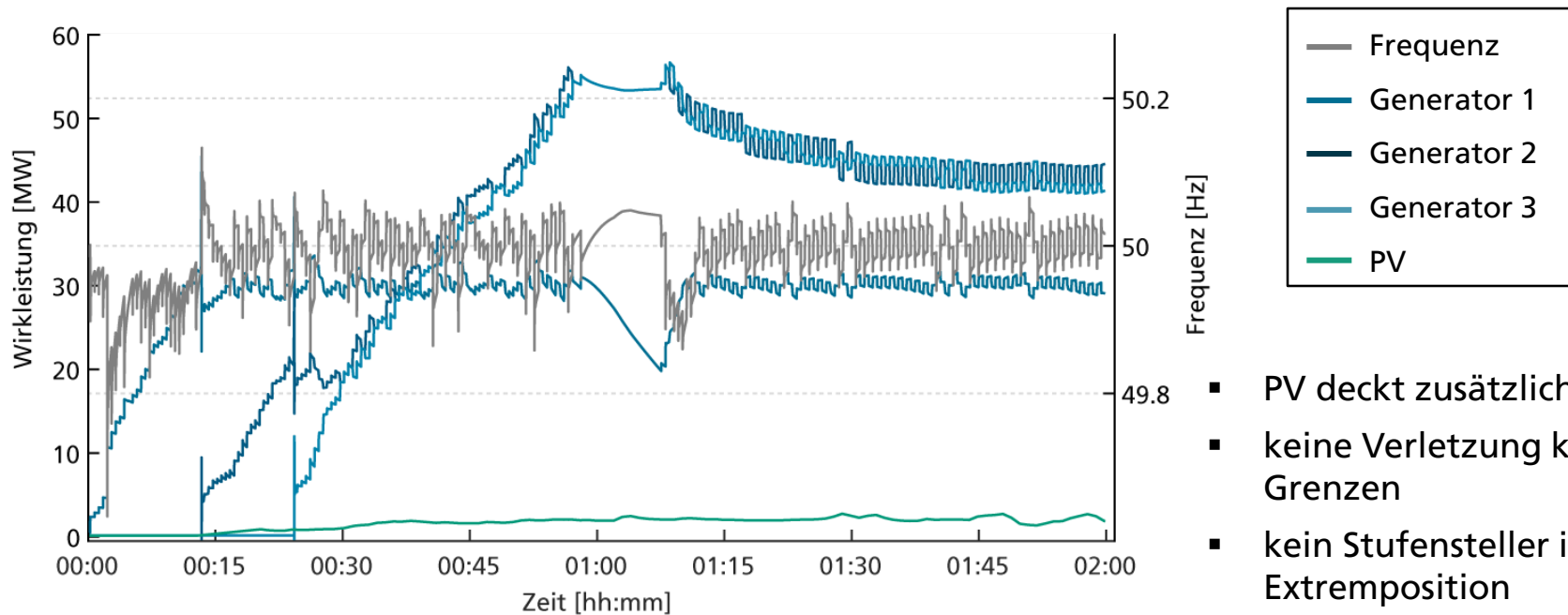


Untersuchung für zahlreiche Lastverläufe aus Solarstrahlungsdargebot und Last anhand realer Einstrahlungsmesswerte sowie wirklichkeitsnaher Lastprofile

Variante A

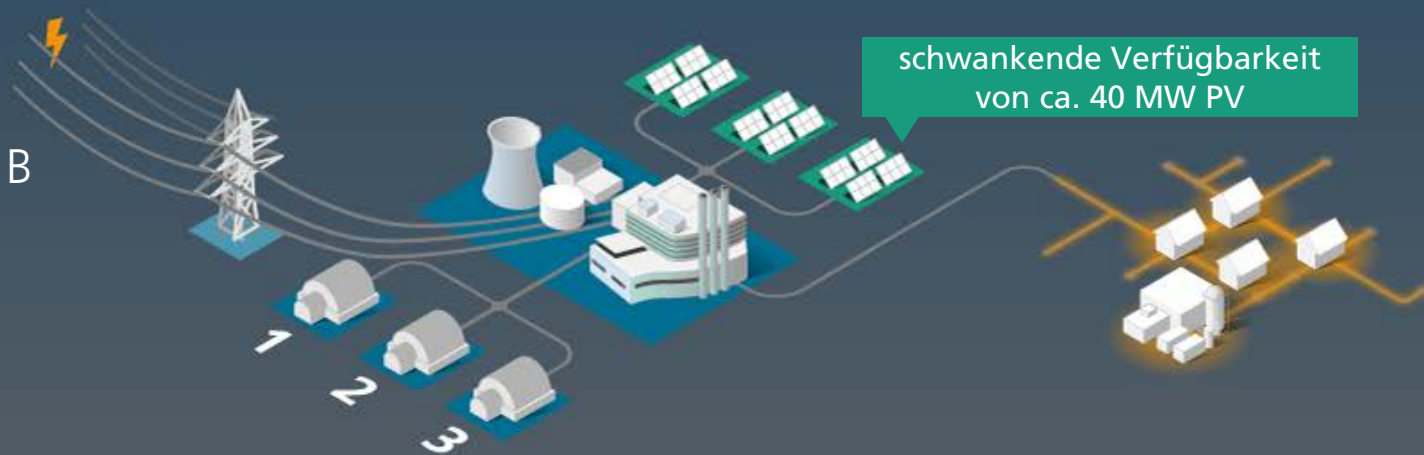


Simulationsablauf: Regelbasiertes Zuschalten von Abgängen, Generatoren und Umlasten.

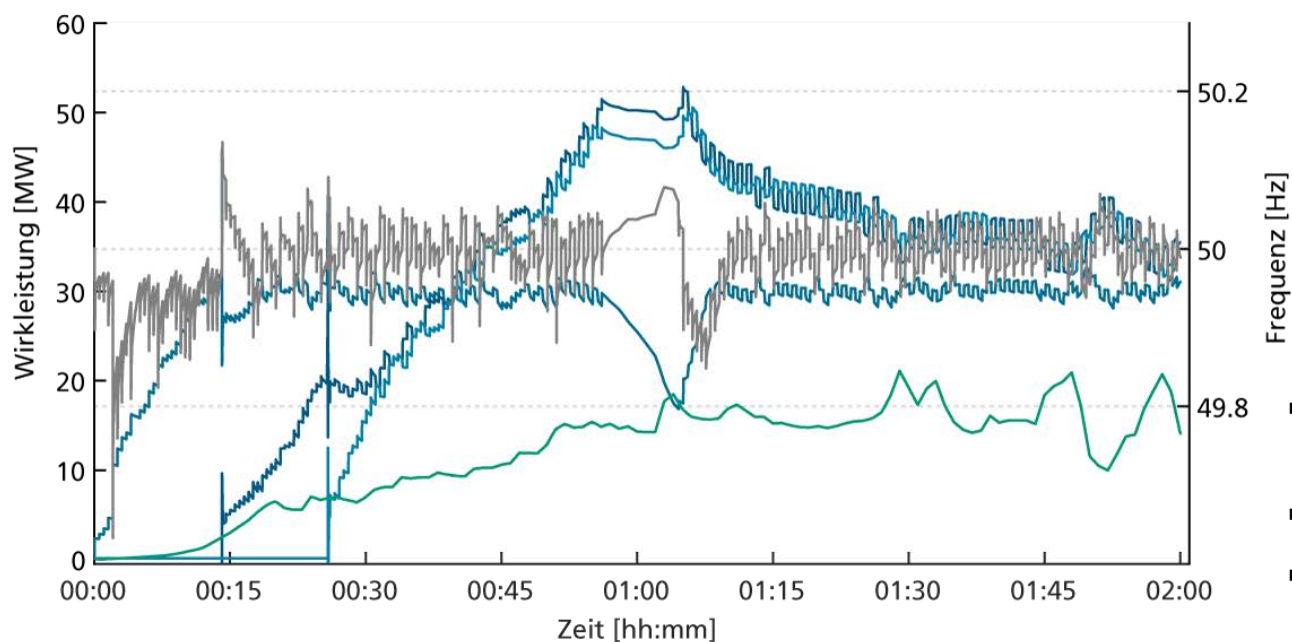


- PV deckt zusätzliche Last
- keine Verletzung kritischer Grenzen
- kein Stufensteller in Extremposition

Variante B

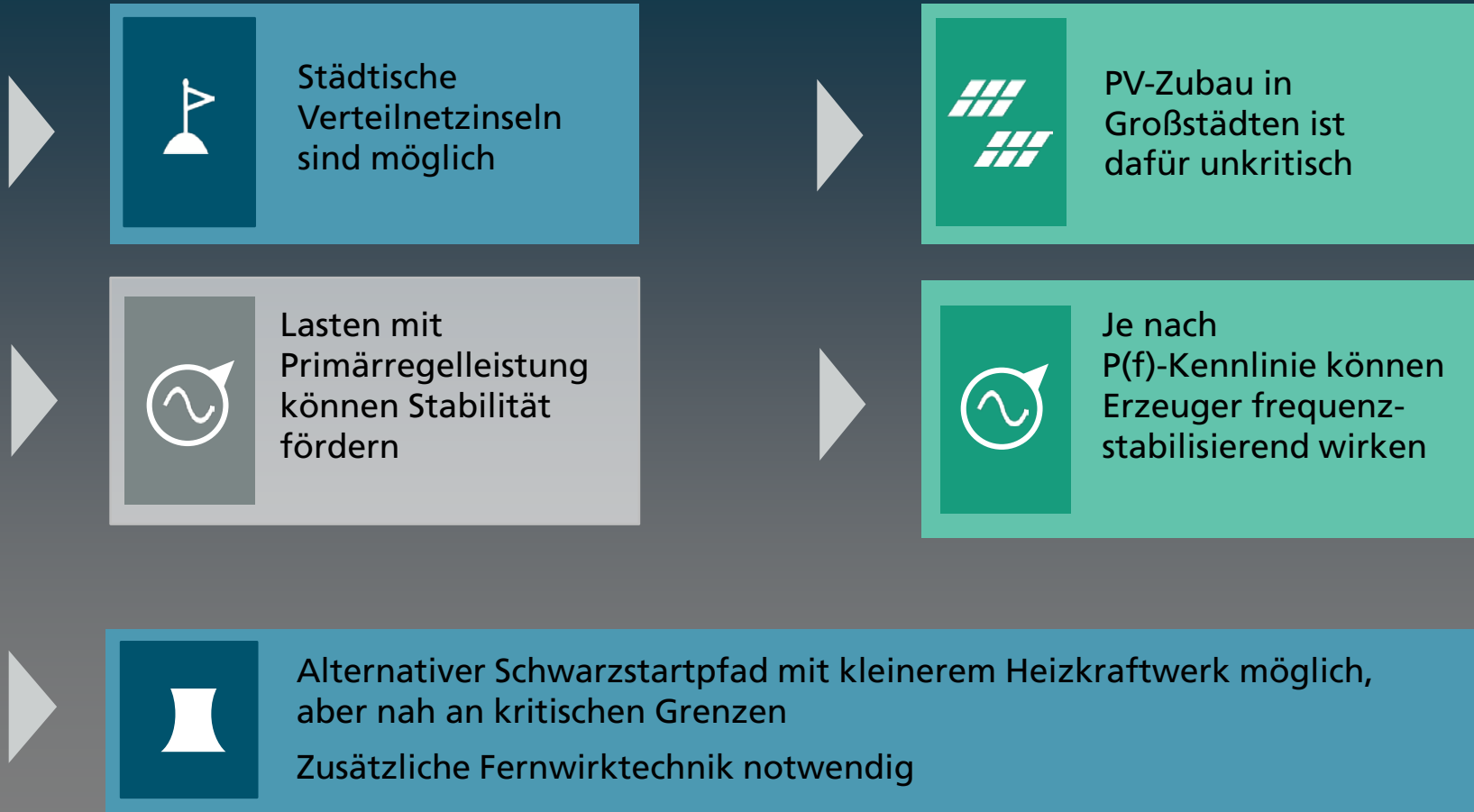


Simulationsablauf: Regelbasiertes Zuschalten von Abgängen, Generatoren und Umlasten.

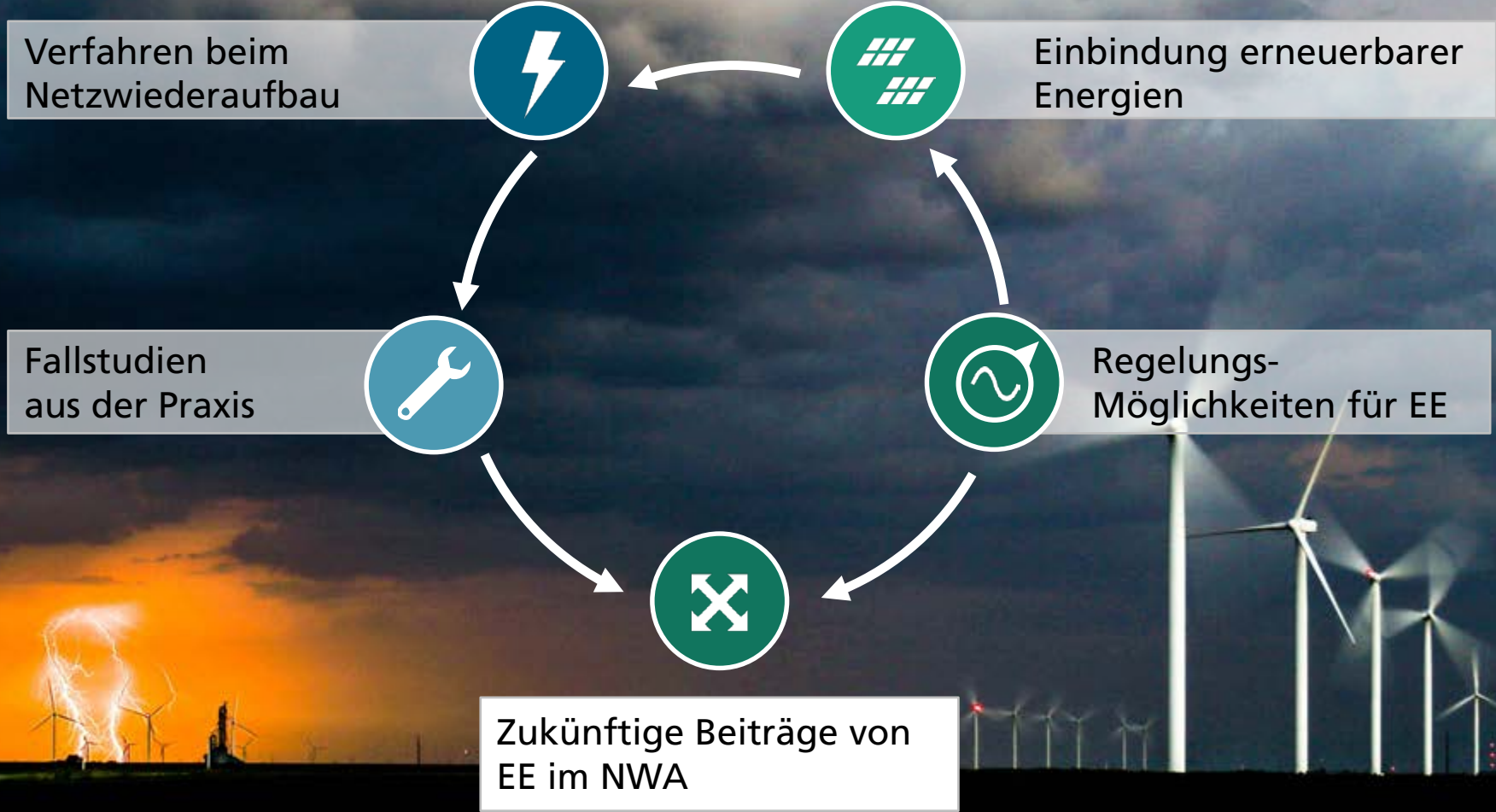


- Einspeiseschwankungen können ausgeglichen werden
- Ggf. Umlasten erforderlich
- Regelspielraum in beide Richtungen größer

Ergebnisse der Fallstudie Großstadt



Inhalt



Zusammenfassung

Gegenwart



PV- und Windenergieanlagen bereits systemrelevant



Zukunft

PV- und Windenergieanlagen müssen auch einen adäquaten Beitrag zum NWA leisten



Frequenzstabilisierend



Spannungstabilisierend



Leistungssteuernd

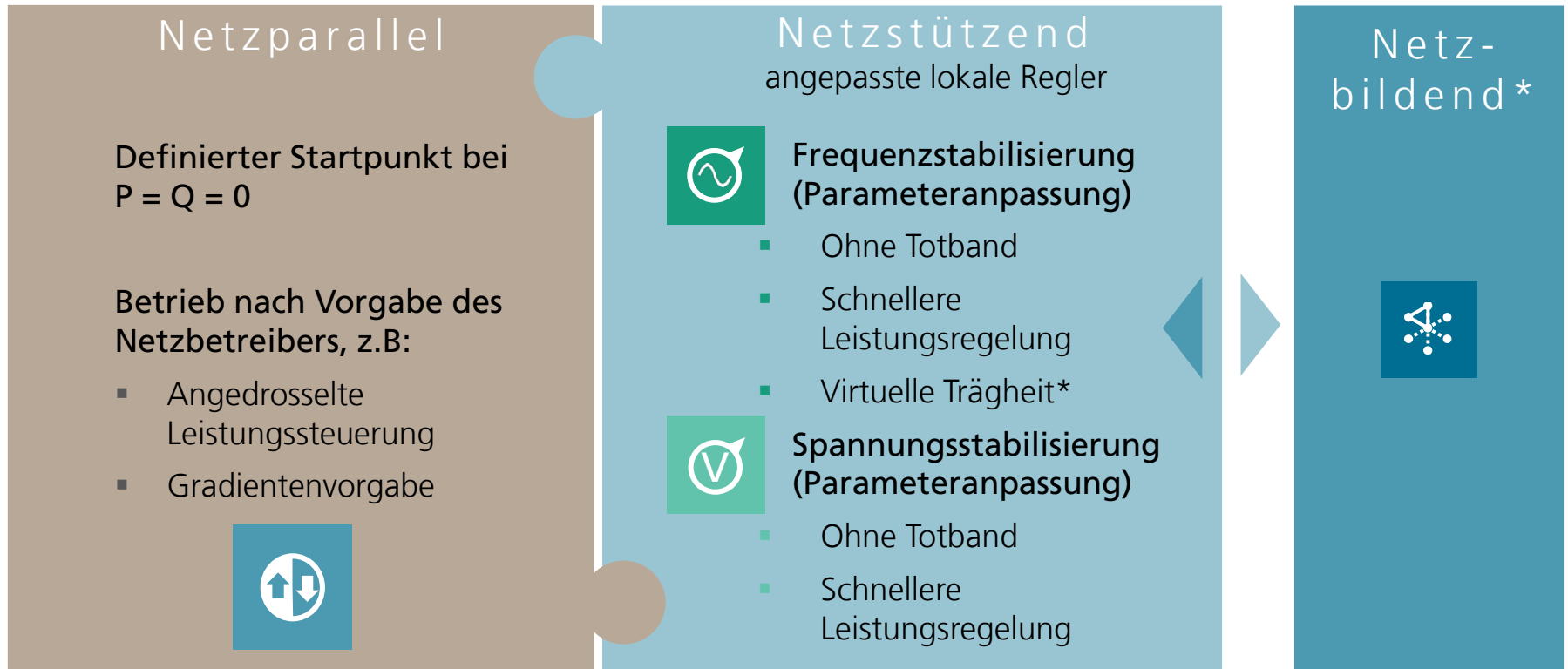


Netzbildend



NWA-MODI EINER ZUKÜNFTIGEN EE-ANLAGE

Wahl-Modi jeweils mit angepassten Sollwert-/Parametervorgaben



Voraussetzung:

- Kommunikation mit Netzbetreiber USV-gesichert und/oder
- Fall-Back-Verhalten bei Netzausfall ohne USV-Absicherung

NETZ:KRAFT

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

Projektpartner

on the basis of a decision
by the German Bundestag



Kontakt

Prof. Dr. Martin Braun

Leiter

Netzplanung und Netzbetrieb

- martin.braun@iee.fraunhofer.de
- +49 561 7294 118
- www.iee.fraunhofer.de/netze

Fraunhofer IEE

Geschäftsfeld Netzplanung und Netzbetrieb

- Wirtschaftlich-technische Studien zu Analyse, Planung, Betrieb und Führung von Energiesystemen
- Automatisierte Planungswerkzeuge www.iee.fraunhofer.de/pandapowerpro
- Werkzeuge und Modelle (Algorithmen zur Netzoptimierung, Hardware-/ Software-Umgebung für Pilotsysteme) www.iee.fraunhofer.de/beedip
- Co-Simulations- und Test-Plattformen für Betriebsführungen www.opsim.net
- Planung und Betrieb von Multi-Energie-Systemen.
- Labor für Microgrids / Hybrid-Systeme and PHIL-Untersuchungen

Kontakt

Prof. Dr. Martin Braun
Fachgebiet Energiemanagement und
Betrieb elektrischer Netze (e²n)

- Mail: martin.braun@uni-kassel.de
- Tel.: +49 561 804 6202
- <http://www.uni-kassel.de/eecs/e2n>

Fachgebiet e²n

Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze

- Automatisierte Netzplanung / optimiertes Systemdesign
www.pandapower.org
- Resilientes Systemverhalten und Systemdesign im Fehlerfall und im Netzwiederaufbau
- Energiemanagement und Netzbetriebsführung / Automatisierungslösungen in dezentralen Versorgungsstrukturen
- Regelung und Auslegung von Erzeugern, Verbrauchern, Speichern und Netzbetriebsmitteln zur Bereitstellung von Energie- und Netzdienstleistungen