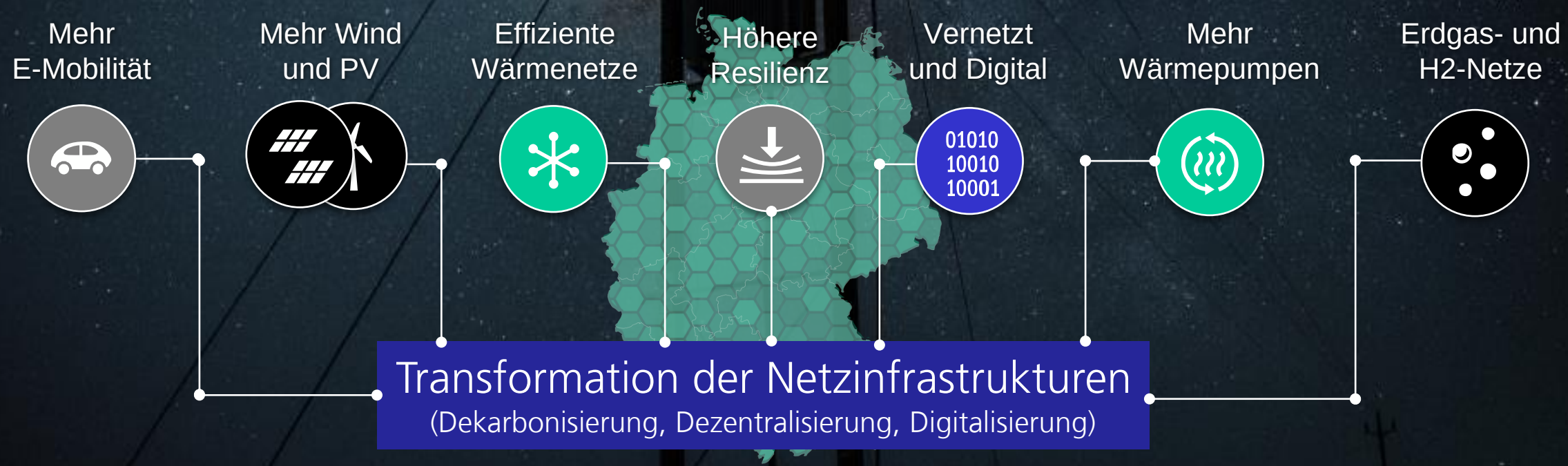
Resiliente Stromnetze

Prof. Dr. Martin Braun - Fraunhofer IEE & Universität Kassel
martin.braun@iee.fraunhofer.de

- Dr. Malte Siefert (Fraunhofer IEE)
- Dr. Denis Mende, Christian Hachmann, Holger Becker (Fraunhofer IEE & Universität Kassel)
- Karen Derendorf, Dr. Karsten von Maydell (DLR)
- Philipp Ernst, Dr. Robert Kohrs (Fraunhofer ISE)
- Dr. Georg Pangalos (Fraunhofer IWES)
- Christian Tomschitz (ZSW)

Stromnetze sind DIE kritische Infrastruktur



Transformation der Netzinfrastrukturen
(Dekarbonisierung, Dezentralisierung, Digitalisierung)

Risken: HILP (High Impact but Low Probability)

Fraunhofer IEE

Terrorangriffe / Kriege

- Cyber → Software
- Physisch → Hardware
- Elektromagnetisch (EMP) → Elektronik
- …

Naturkatastrophen / Extremwetter

- Stürme
- Überflutung
- Hitze / Kälte
- Erdbeben
- Sonnenstürme
- Pandemien
- …

Menschliches / Technisches Versagen

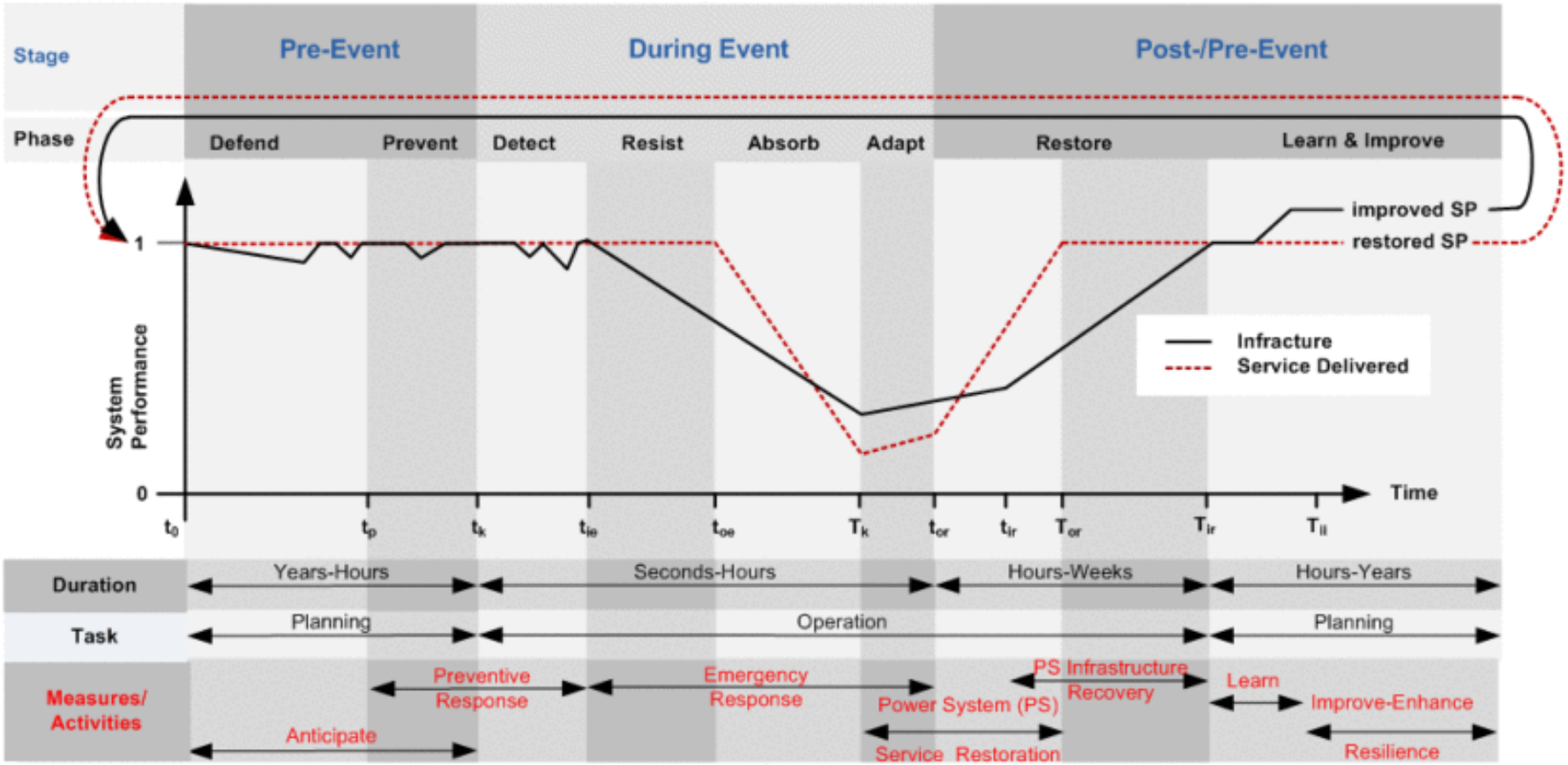
- Nichtbeherrschung Komplexität
- Unzureichende Vorbereitung auf Extremereignisse (z.B. Netzauftrennung)
- Fehlerhafte Auslegung von Anlagen und deren Betriebsweise
- Manuelle Fehleingriffe
- …

Resilienz Stromnetz

Definition Resilienz in Stromnetzen

Fraunhofer IEE

"***Power system resilience*** *is the ability to limit the extent, system impact, and duration of degradation in order to* ***sustain critical services following an extraordinary event****. Key enablers for a resilient response include the capacity to anticipate, absorb, rapidly recover from, adapt to, and learn from such an event. Extraordinary events for the power system may be caused by natural threats, accidents, equipment failures, and deliberate physical or cyber-attacks.*"



Quelle: A. M. Stanković *et al.*, "Methods for Analysis and Quantification of Power System Resilience," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 5, pp. 4774-4787, Sept. 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3212688.

Resilienz Themenauswahl

Transformation des Energiesystems dezentral und zellulär

Systemsicht:

- Dezentralisierung des Energiesystems führt zu einem zellulären System bestehend aus lokalen Energiesystemen (LES) auf NS und MS-Ebene.
- LES können als Einheit zentral gesteuert werden.

Lokale Sicht:

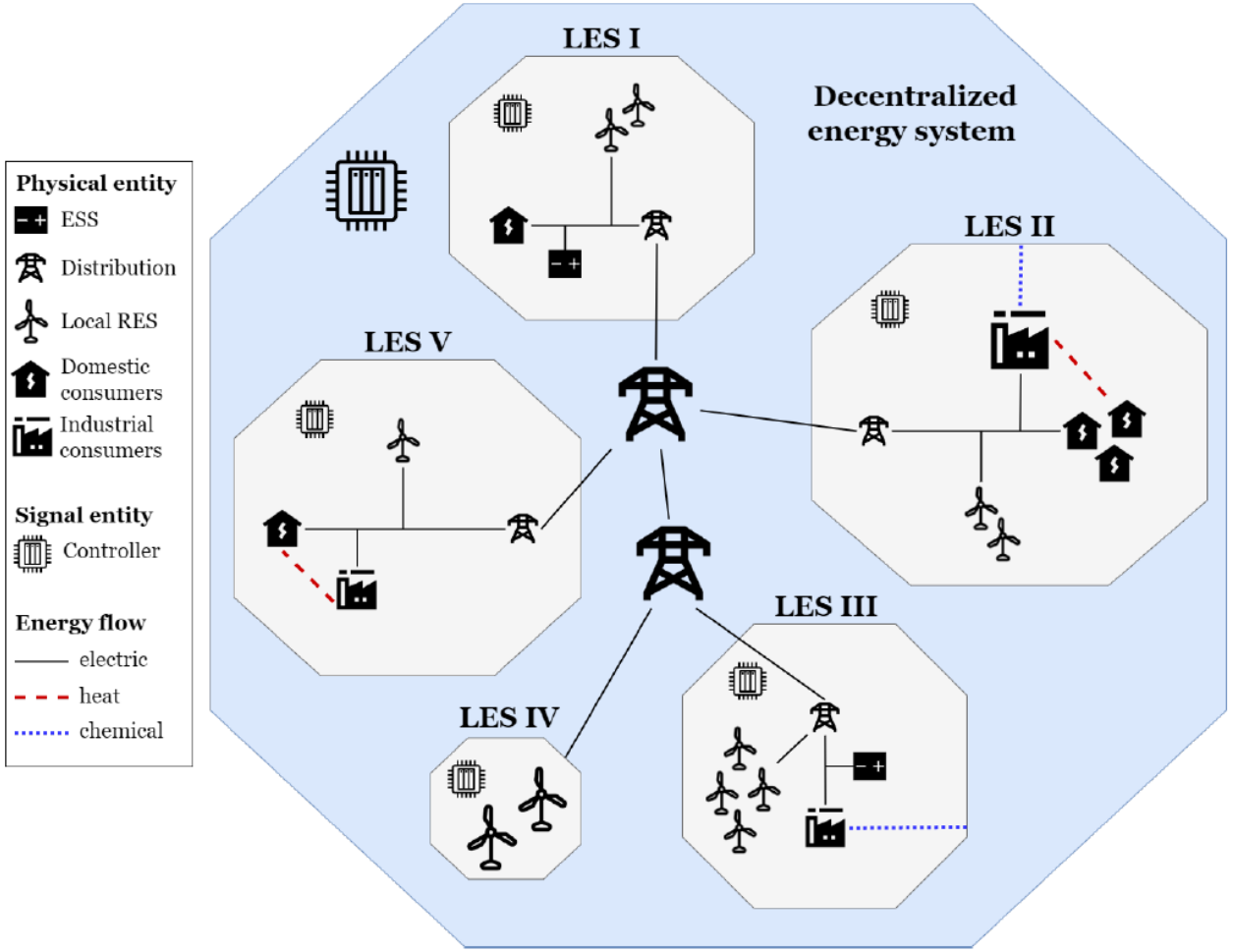
- Flexibilisierung von Anlagen

Chancen:

→ Verbesserte Steuerung der Anlagen als Verbund im LES durch z. B. modellprädiktive Regelung basierend auf multilinearen Modellen.

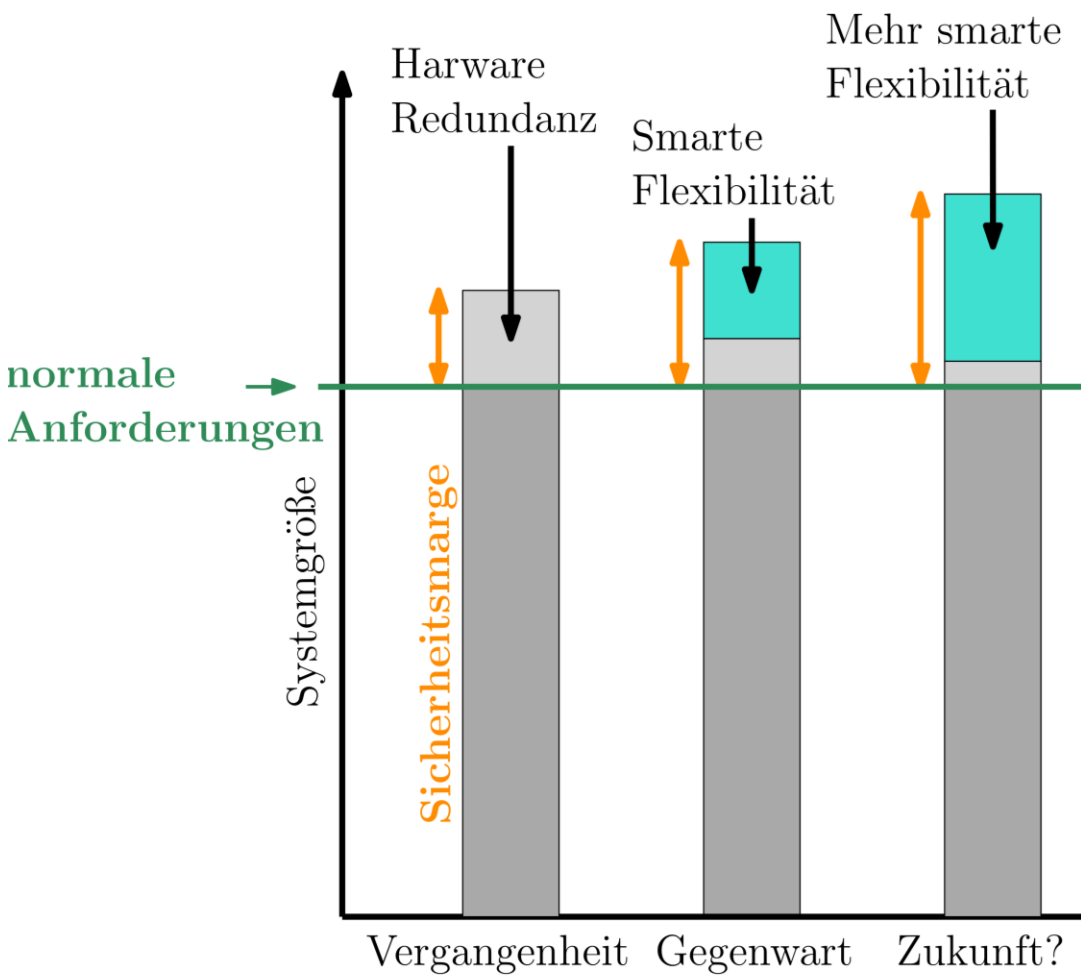
→ Reduzierung des Netzausbaus durch lokale Optimierung

→ Stützung der Netzstabilität und potenziell Netzwiederaufbau durch LES.



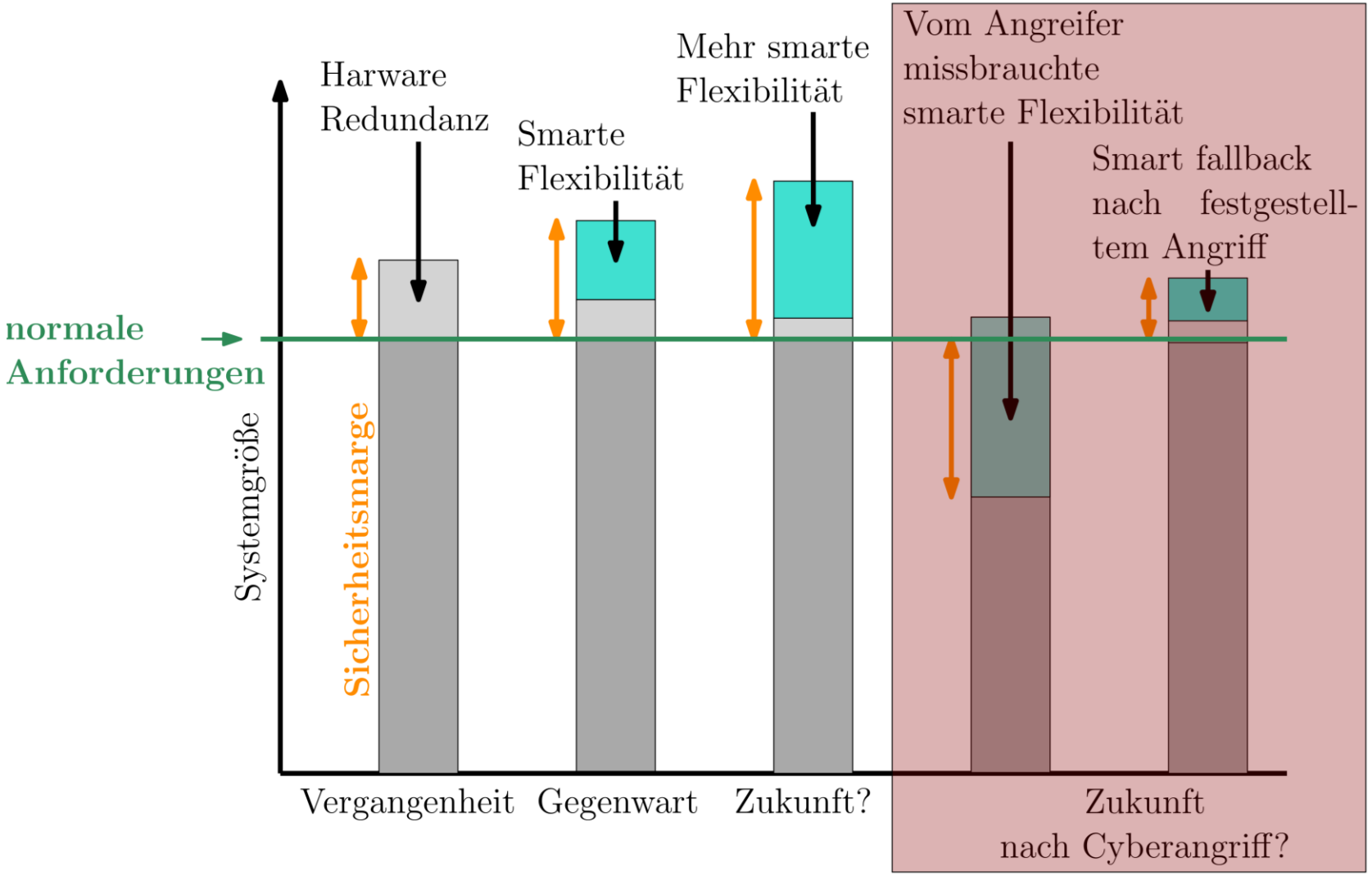
© IWES

Cyber – Physikalische Resilienzbetrachtung



s. auch:
https://ieeexplore.ieee.org/document/9120261

Cyber – Physikalische Resilienzbetrachtung

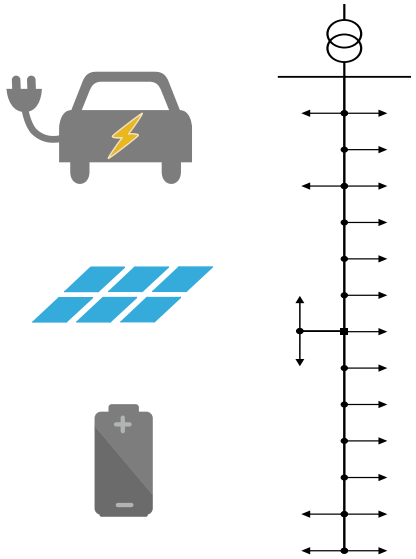


s. auch:
https://ieeexplore.ieee.org/document/9120261

Robuster Netzbetrieb bei Ausfall der IKT im Smart Grid

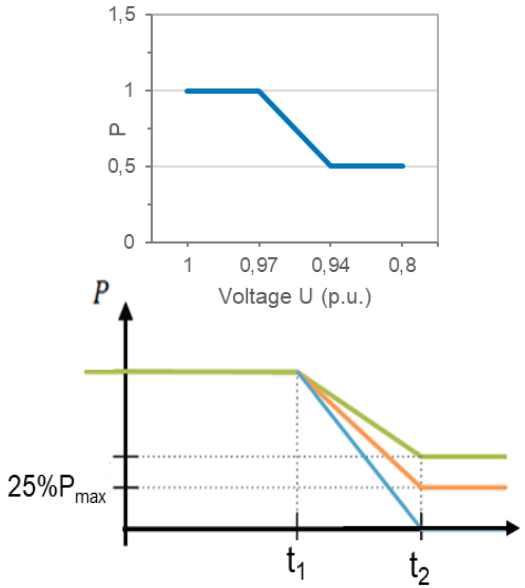
Lokale Regelung als Fallback hilft, Belastungsgrenzen auch ohne IKT einzuhalten:

Untersuchung verschiedener Szenarien in Stromnetzen, die zu Netzüberlastungen führen können

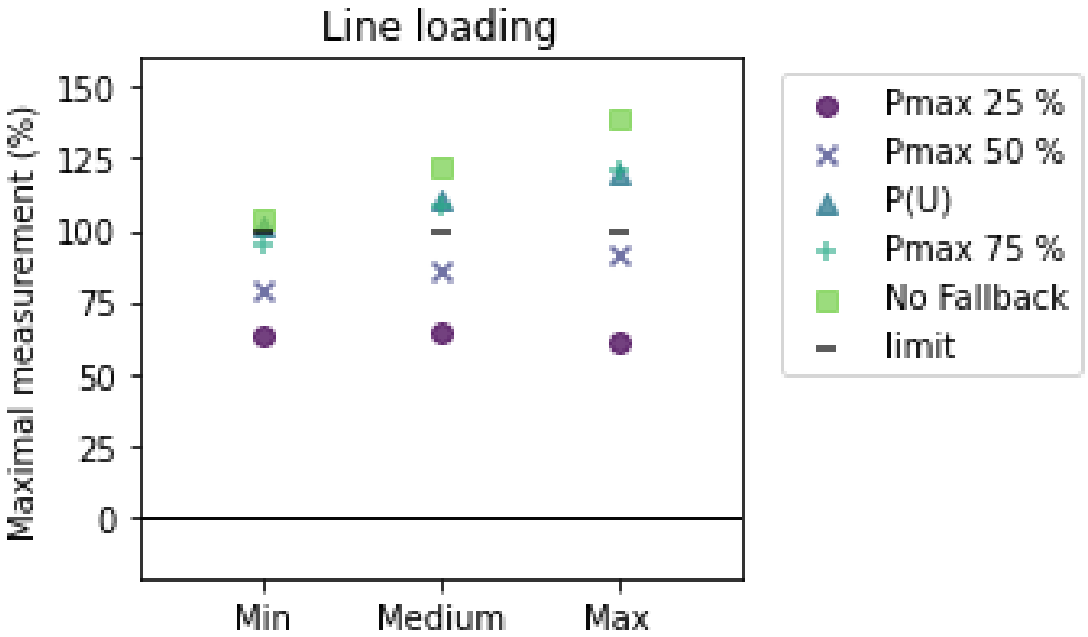


Untersuchung verschiedener Fallback-Möglichkeiten

- **P(U)**
- **Statische Leistungsreduktion**



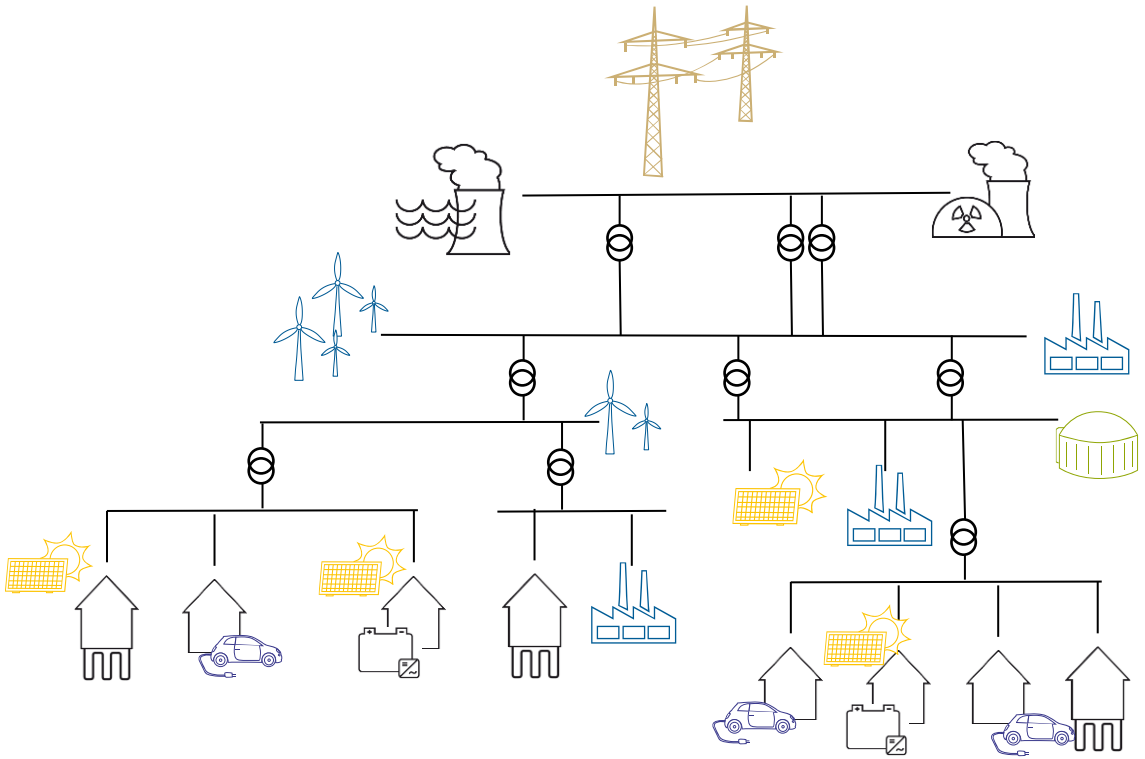
Mit geeigneter Parametrisierung kann eine Notlaufeigenschaft erreicht werden

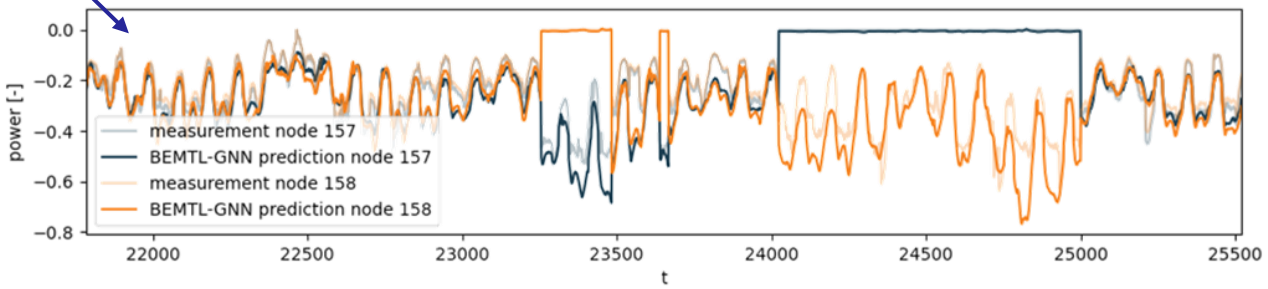


Vorhersagen als Grundlage resilienter Energiesysteme - Herausforderungen und Lösungen

Fraunhofer IEE

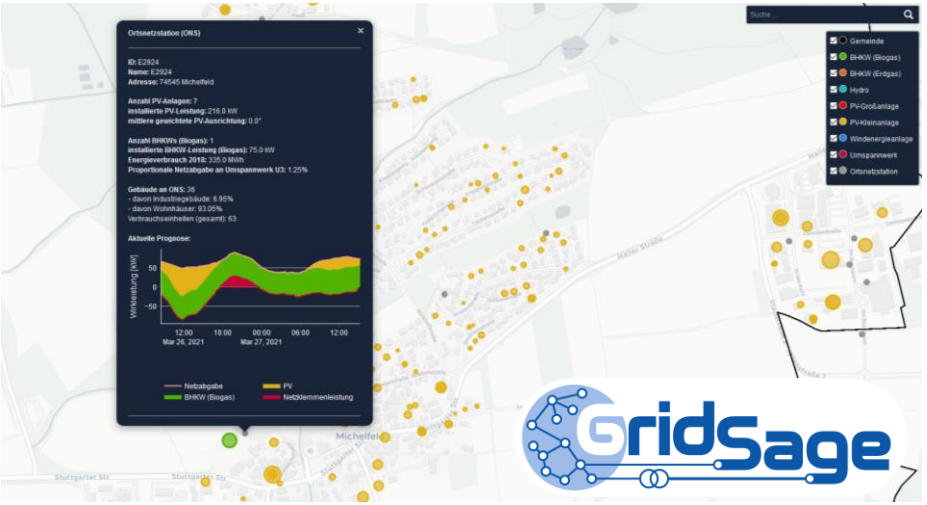
- **Skalierende Prognosen**
  - Prognosen für mehrere 100.000 Einheiten (PV, Wind, Elektroautos, Wärmepumpen etc.)
  - Automatisch an Bilanzkreis angepasste Prognosen
- **Präzise Prognosen für Erzeuger, Verbraucher, …**
  - Moderne maschinelle Lernverfahren
  - Kontinuierliches Selbstlernen (z.B. Transfer-Lernen)
  - Wechselwirkungen der Einheiten, Berücksichtigung von Netzschaltungen (Graph-Neural Networks)
- **Meteorologisch mögliche Erzeugung & Zeiten von Abregelungen und Eigenverbrauch**
- **Zuordnung Anlagen zu Stromnetzknoten**
- **Saisonale Vorhersagen: Netzbetriebsplanung**

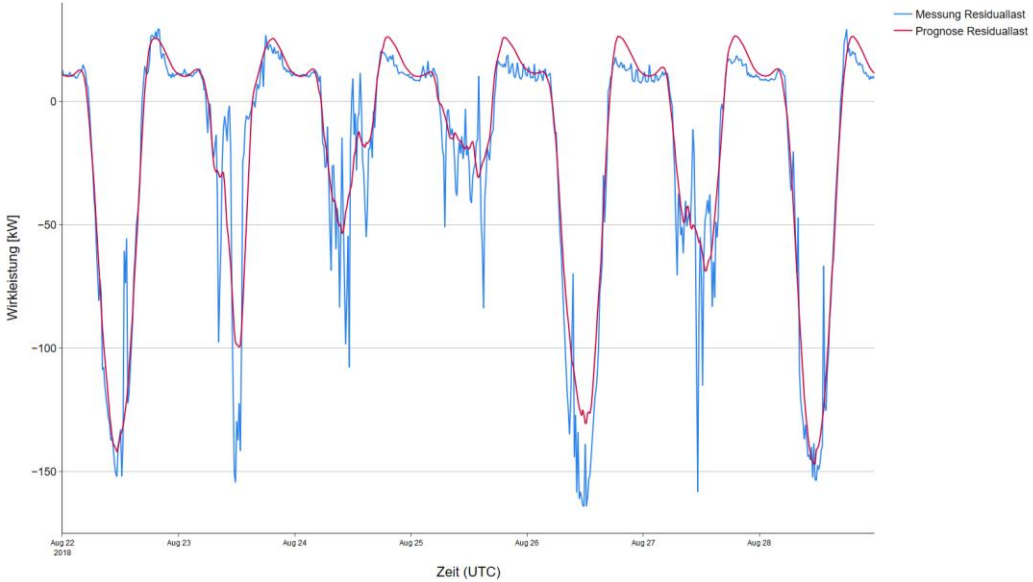




Prognosen für Verteilnetzbetrieb

- **KI-Prognoselösung „GridSage“ des ZSW liefert VNBs hochauflösende Prognosen für Erzeugungsanlagen und prognostiziert Netzabgaben und Klemmenleistungen an Netzverknüpfungspunkten**
- **Prognosen gelangen durch einen sicheren Kommunikationsweg direkt in die Leitwarte**
- **In Forschungsprojekten entwickelte Algorithmen erlauben einen umfassenden Blick in Verteilnetze auch ohne digitalisierte Netzpläne**
- **Prognosen aus GridSage erlauben die Abbildung realer Netzgebiete in Form von digitalen Zwillingen**
- **Durch den Einsatz von Prognosen werden Verteilnetze transparent.**



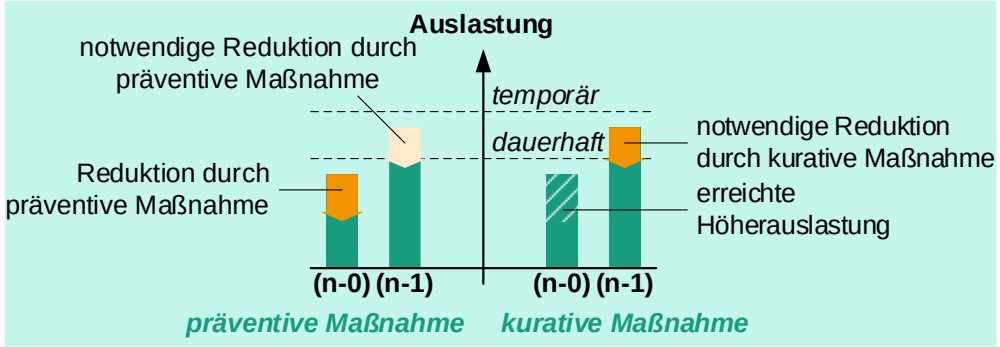


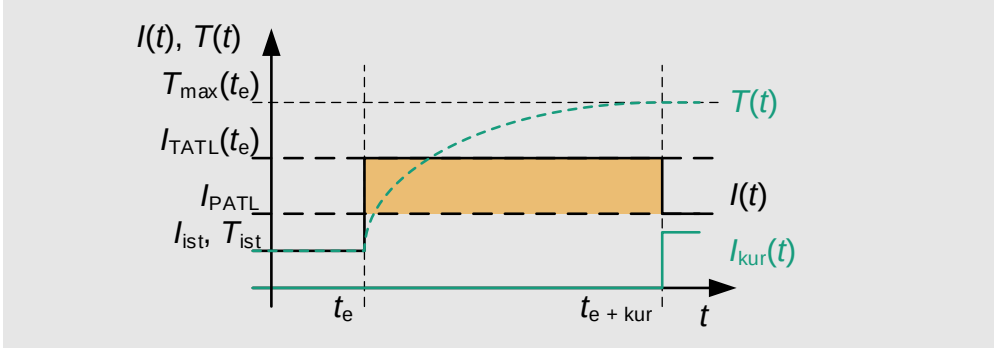
Abbildungen:
oben: GridSage-Prognose Dashboard;
unten: Klemmenleistungsprognosen („Residuallast“) an einem Mittelspannungstransformator für eine ausgewählte Woche

Kurative Systemführung als Möglichkeit zur sicheren Höherauslastung der Stromnetze

Fraunhofer IEE

- **Erhöhung der nutzbaren Übertragungskapazität**
  - Vordefinierte kurative Arbeitspunktänderung
  - Aktivierung im Rahmen der Netzbetriebsplanung
  - Auslösung bei/nach Eintritt des Ereignisses im Bereich von Sekunden bis wenigen Minuten
- **Dimensionierung der kurativen Maßnahme**
  - Nutzung von Temperaturreserven im Normalbetreib für temporäre Höherauslastung
  - Dauer bis zur Wirksamkeit der kurativen Maßnahme begrenzt zulässige Höherauslastung





- **Entwickeltes Framework zur optimalen Ermittlung des notwendigen präventiven und kurativen Einsatzes im operativen Engpassmanagement**

Ausgewählte Veröffentlichungen	weitergehende Arbeiten und Infos
– Dissertation D. Mende	– InnoSys 2030
– Beitrag ew	– Beitrag Cigré
– Beitrag EPEC	– Beitrag ISGT

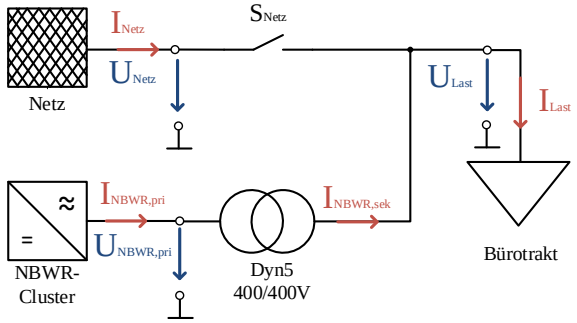
Feldtest von netzbildenden Umrichtern am Fraunhofer ISE Projekt VerbundnetzStabil

Teilziele:

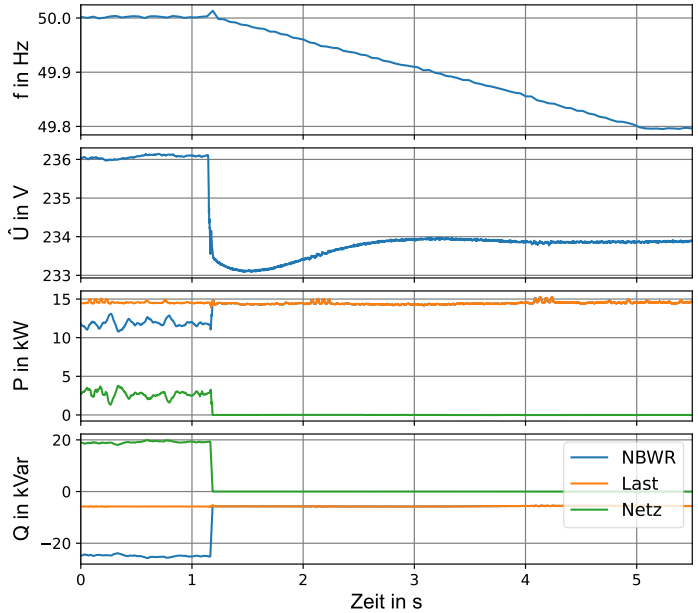
- Erforschung und Entwicklung eines spannungseinprägenden Regelungskonzeptes
- Implementierung auf einer marktbasierten Wechselrichter-Hardware
- Abschluss des Forschungsprojektes bildete die **Feldmessung**

Versuchsablauf:

I. NBWR-Cluster im Netzparallelbetrieb
II. Netzauftrennung
III. NBWR-Cluster im Inselbetrieb
IV. Resynchronisation



Ergebnisse: **Instantane Übernahme der Last**



- Bereitstellung von Momentanreserve / Trägheit
- Bereitstellung von Primäregelleistung bei netzkritischen Situationen (ohne Reglerumschaltung)
- Instantane Stromreaktion auf Netzänderungen

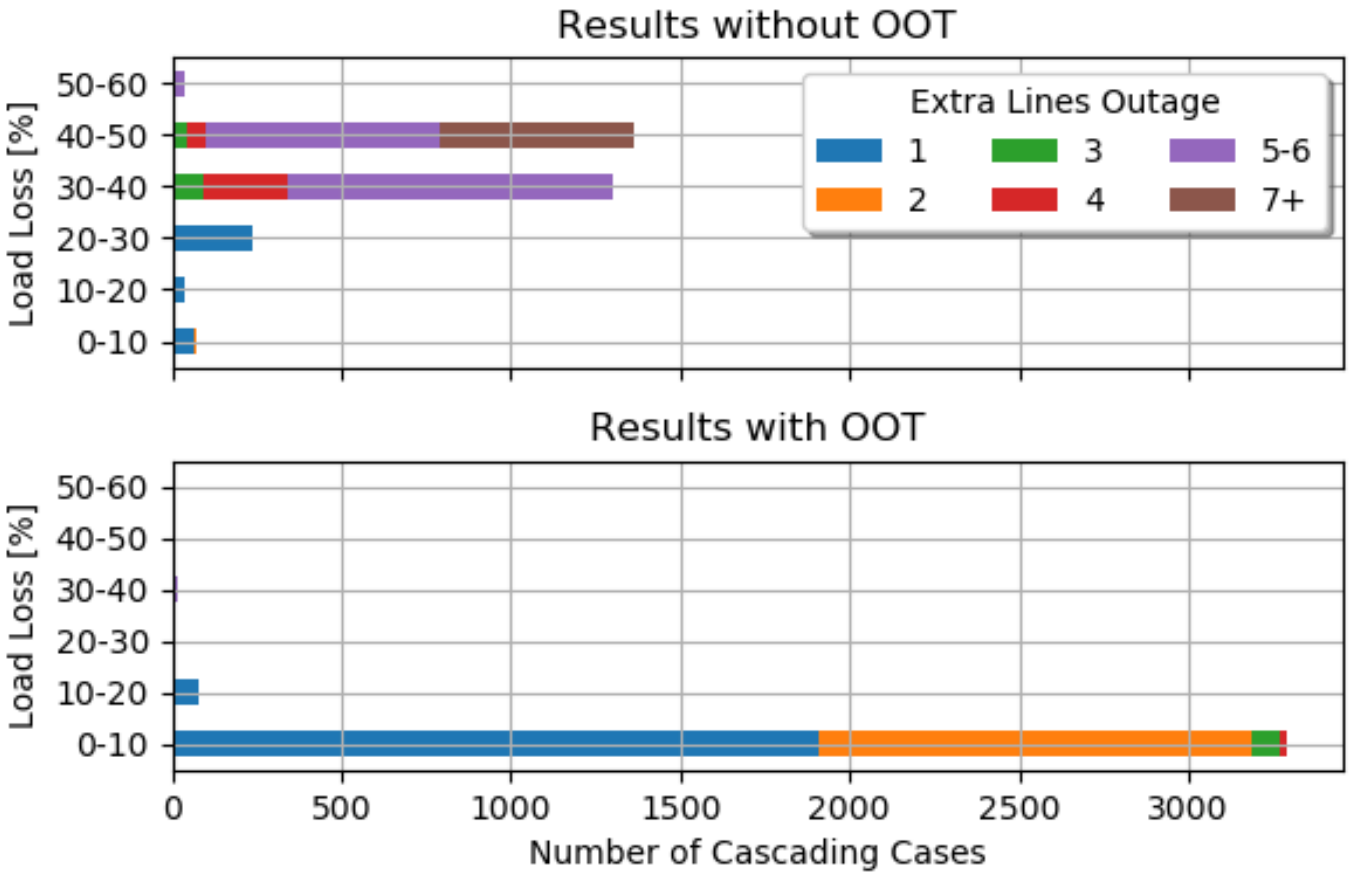
Die netzbildenden Wechselrichter sind in der Lage den Bürotrakt unterbrechungsfrei zu versorgen

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
FKZ: 0350015

Projekt RESIST: Strategisches Planungstool für Resilienz in der Netzplanung

- Identifikation kritischer Komponenten
- Beurteilung der Auswirkungen von Mehrfachfehlern und Kommunikationsausfällen
- Optimierung des Schutzsystems zur Schadensminimierung bei kaskadierenden Ausfällen

→ durch den Optimierungsalgorithmus OOT kann bei Mehrfachfehlern die verlorene Last deutlich reduziert werden

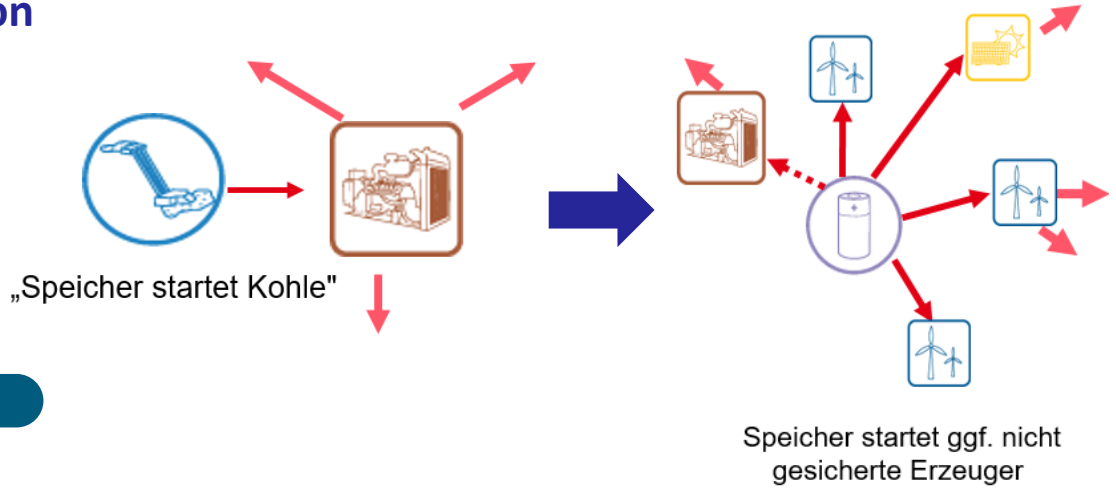


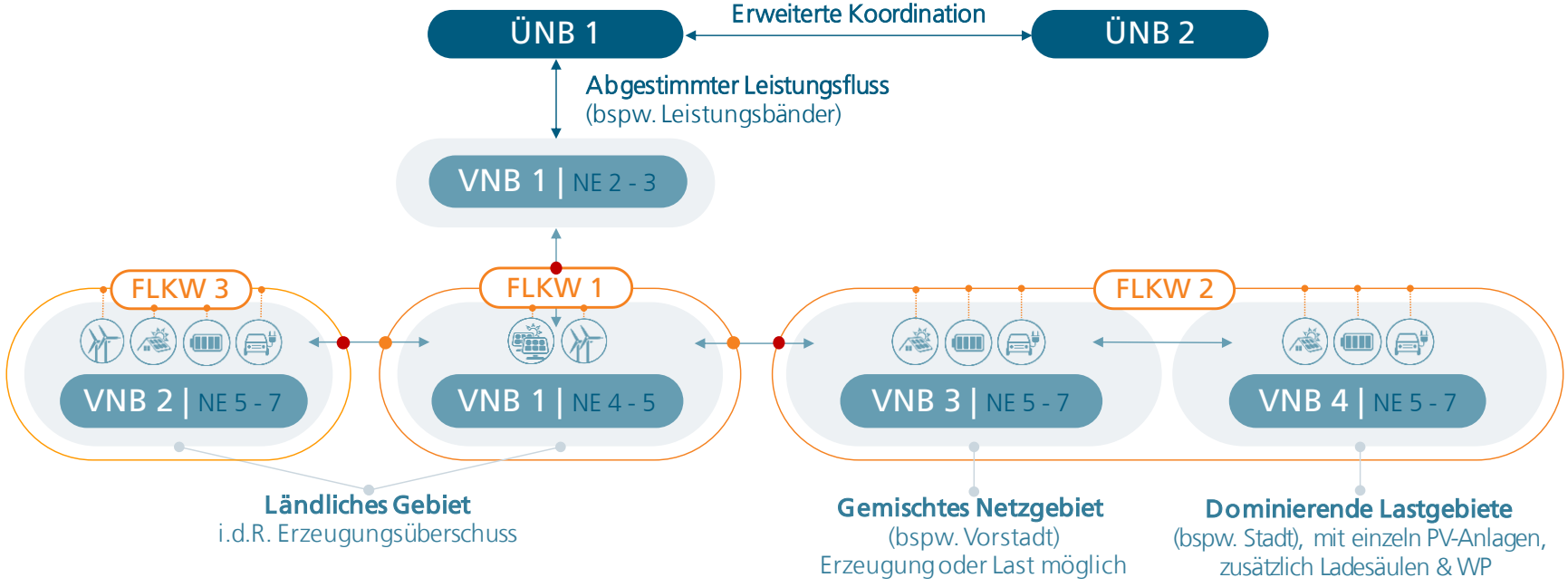
Quelle: G. Banerjee, J. Dollichon, C. Hachmann, D. Mende, J. Lipphardt and M. Braun, "Resilience-Driven Strategic Grid Planning with an Overload Protection Scheme Reducing Cascading Outages,"ETG Kongress 2023, Kassel

Netzwiederaufbau aus dem Verteilnetz unterstützt

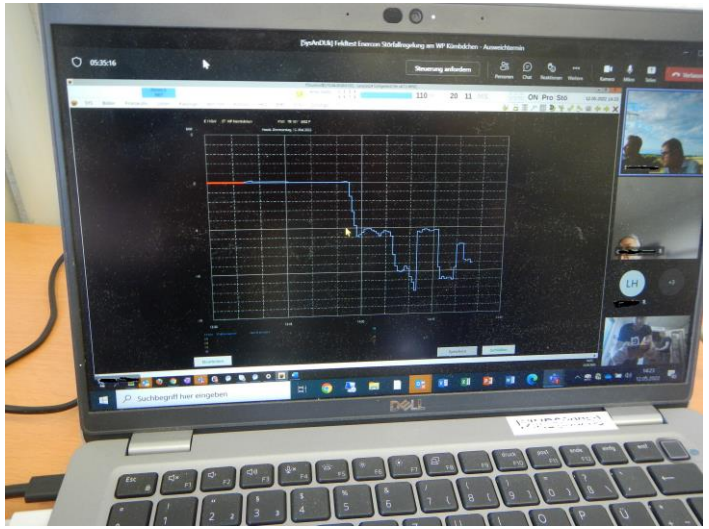
Fraunhofer IEE

- **Aktuelle Netzwiederaufbaupläne basieren auf dem Einsatz von Großkraftwerken im Übertragungsnetz**
- **Dezentralisierung → VNB stärker in den Prozess einbinden → Koordination größerer Anlagenzahl notwendig**
- **Projekt SysAnDUk zeigt wie abgestimmter Leistungsfluss aus Flächenkraftwerk bereitgestellt wird**





● FLKW Kontrollpunkt

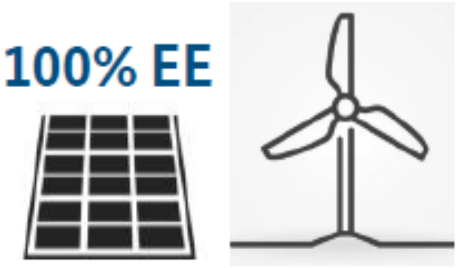


Projektwebsite: https://www.iee.fraunhofer.de/de/projekte/suche/laufende/SysAnDUk.html
Anforderungen durch die ÜNB: Weißbuch Netz- und Versorgungswiederaufbau 2030

Resilienz Themenauswahl

Roadmap Systemstabilität: Ziel

- Übergeordnetes Ziel: sicherer und robuster Systembetrieb bei 100% EE
- Roadmap: Fahrplan wie wir das erreichen



WAS? Herausforderungen/ Handlungsbedarf identifizieren

WER? Verantwortlichkeiten und Prozesse benennen

WANN? Zeitschiene, auch Basis für Umsetzung/Monitoring

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

11.09.2023 | Folie 11

Quelle: A. Folz (BMWK)

Roadmap Systemstabilität: Erarbeitung

Breiter Stakeholder-Prozess (seit Herbst 2022)

- Verbände, Netz- und Anlagenbetreiber, FNN, DKE, Wissenschaft; BNetzA/BMWK
- insgesamt über 150 Personen aus mehr als 80 Institutionen

Erarbeitung Roadmap mit aktiver Akteursbeteiligung

- 4 thematische Arbeitsgruppen mit 11 Untergruppen
- Beirat
- insgesamt über 70 Sitzungen
- Themenfelder strukturiert untersucht, aufbereitet und diskutiert, konkrete Textbeiträge geliefert, dann zu Roadmap zusammengeführt

Unterstützung durch Auftragnehmer ef.Ruhr und dena

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

11.09.2023 | Folie 12

Quelle: A. Folz (BMWK)

Roadmap Systemstabilität

Aktueller Stand und weiteres Vorgehen:

- Entwurf der Roadmap Systemstabilität erarbeitet, Konsultation mit beteiligten Akteuren, dann Anpassung
- **Veröffentlichung Roadmap Systemstabilität: Ende 2023**
- **Umsetzung (alle Akteure) und Monitoring (BNetzA/BMWK)**, ggf. nachjustieren

→ **Roadmap-Prozess soll strategische und koordinierende Funktion einnehmen**

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

11.09.2023 | Folie 13

Quelle: A. Folz (BMWK)

Fazit: Resiliente Stromnetze

- Stromnetze sind KRITIS → Sicherheit & Stabilität & Resilienz !

- Vielfältige Aspekte:
  - Digitalisierung des Netzbetriebs → Automatisierung auf allen Netzebenen ! → IKT Resilienz !
  - Verbesserte Transparenz durch Zustandsbestimmung und Prognosen
  - Sicherer Betrieb an Systemgrenzen (kurative Maßnahmen)
  - Netzbildende Stromrichter prägen Systemstabilität (Momentanreserve, …)
  - Identifikation kritischer Komponenten und Auslegung Schutzeinstellungen auf Mehrfachfehler
  - Netz- und Versorgungswiederaufbau (inkl. Verteilnetzinseln)
  - …

- Roadmap Systemstabilität beschreibt wichtige nächste Umsetzungsschritte

→ Resilienz der Stromnetze fundamental für das Gelingen der Energiewende!