



RESIST

 **Fraunhofer**
IEG

 **Fraunhofer**
IEE

 **Fraunhofer**
EMI

 **Fraunhofer**
IOSB

 **Fraunhofer**
ISE

GEFÖRDERT VOM



 Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Resiliente Stromnetze für die Energiewende - Projekttreffen 26.11.2024

RESIST Workshop/Verbundtreffen 26.11.2024

Agenda

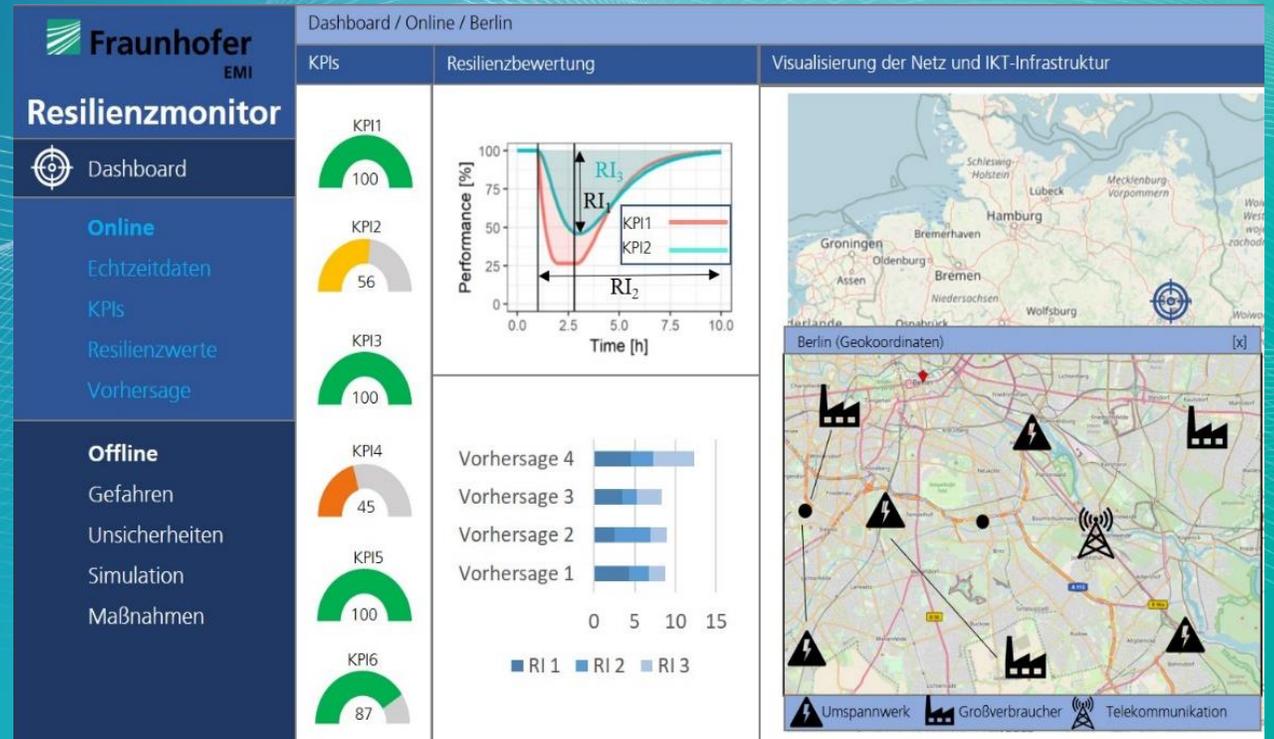
- 09:00 Uhr **Begrüßung/Vorstellung Agenda + Vorstellungsrunde**
- 09:15 Uhr **Best of RESIST: Wichtigste Ergebnisse und Erkenntnisse**
- 10:45 Uhr **Kaffeepause**
- 11:00 Uhr **„Realitätscheck: Resilienz der Stromnetze, Chancen, Herausforderungen und regulatorische Rahmenbedingungen“**
 - Impulsvortrag: *Dipl. Ing. Phillip Jahnke (Partner Counsel BBH Consulting AG)*
 - Diskussion
- 12:00 Uhr **Mittagspause**
- 12:45 Uhr **„Digitalisierung und Datenanalyse: was für Informationen wünschen sich verschiedene Stromnetzakteure?“**
 - Impulsvortrag: *M.Sc. Manuel Wickert (Abteilungsleiter: Energieinformatik und Informationssysteme, Fraunhofer IEE)*
 - Diskussion
- 14:00 Uhr **Kaffeepause**
- 14:15 Uhr **„Aktuelle Erkenntnisse und Erfahrungen im Hinblick auf Stromnetzstörungen: Wie steht es aktuell mit der Resilienz im Katastrophenfall? “**
 - Impulsvortrag I: *„Power Grid Resilience - Lessons Learned from Ukraine“*. *Dr. Andreas Gödecke (Chief Business Officer, eleks GmbH)*
 - Impulsvortrag II: *„Gekoppelte Simulationen sozio-technischer Systeme: Analyse kaskadierender Störungen und Auswirkungen auf Infrastruktur und Bevölkerung“*. *Dr. Till Martini (Projektleiter, Fraunhofer Zentrum SIRIOS)*
 - Diskussion
- 15:50 Uhr **Verabschiedung**



RESIST

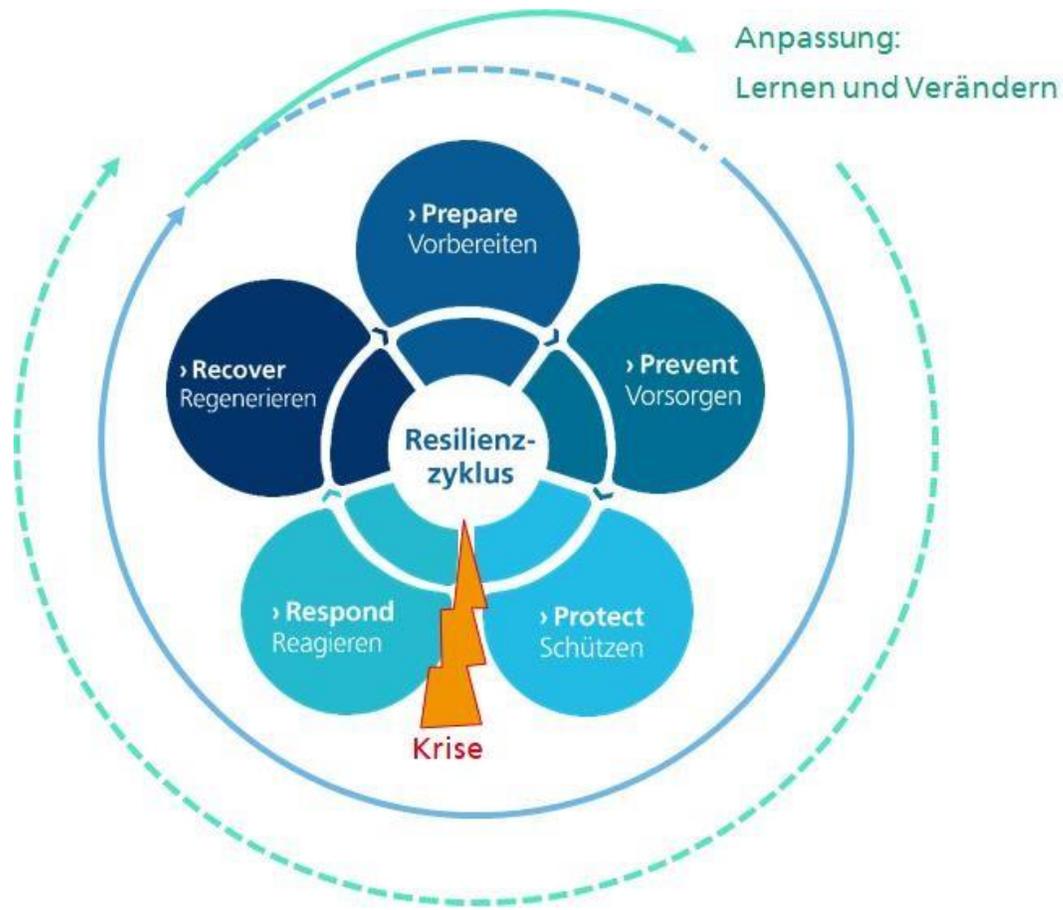
Resiliente Stromnetze für die Energiewende

Projektziele und Resultate - Projekttreffen 26.11.2024



Was bestimmt die Resilienz eines Systems?

Resilienzdimensionen und Resilienzyklus



Dimensionen der Resilienz:

- Eigenschaften: *Robustheit, Redundanz, Einfallsreichtum, Schnelligkeit*
- Sektoren: *sozial, organisatorisch, technisch, ökonomisch*
- Phasen: *Vorbereiten, vorsorgen, schützen, reagieren, regenerieren, lernen und verändern.*

Resilientes Stromnetz:

Stromversorgung bleibt auch bei massiven Störungen und unerwarteten Ereignissen dauerhaft verfügbar.

Aktuelle Entwicklungen erfordern Steigerung der Resilienz der Stromversorgung

RESIST Projektmotivation

Resilientes Stromnetz:

Stromversorgung bleibt auch bei massiven Störungen und unerwarteten Ereignissen dauerhaft verfügbar.

Bis heute:

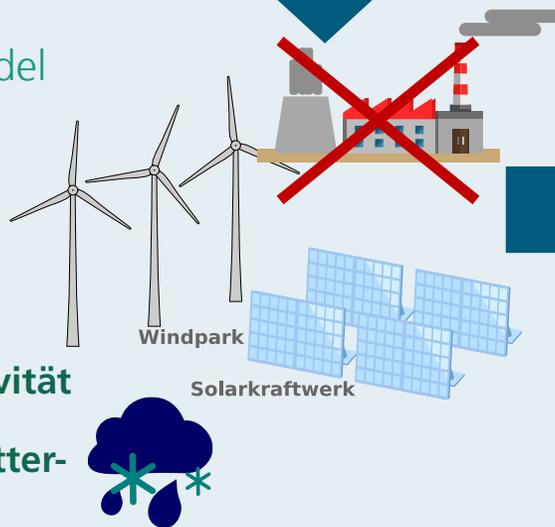
- **Konventionelle Stabilitätsgaranten**
Große Kraftwerke (Kohle, Kernkraft)
unterstützen Robustheit der
Stromversorgung



Aktuelle Entwicklungen:

durch Energiewende und Klimawandel

- **Wegfall großer Kraftwerke**
- **Dezentralisierung der Erzeuger**
- **Zunehmende Digitalisierung**
- **Steigende Komplexität/ Konnektivität**
- **Klimawandel verstärkt Extremwetterereignisse**



Wachsende Verwundbarkeiten

- Robustheitseinbußen durch wegfallende Trägheit
- Mehr Extremwetterereignisse
- Gesteigerte Vulnerabilität durch Cyberangriffe
- Höhere Systemkomplexität begünstigt Kaskadeneffekte

Resilienzsteigerung: Neue Möglichkeiten

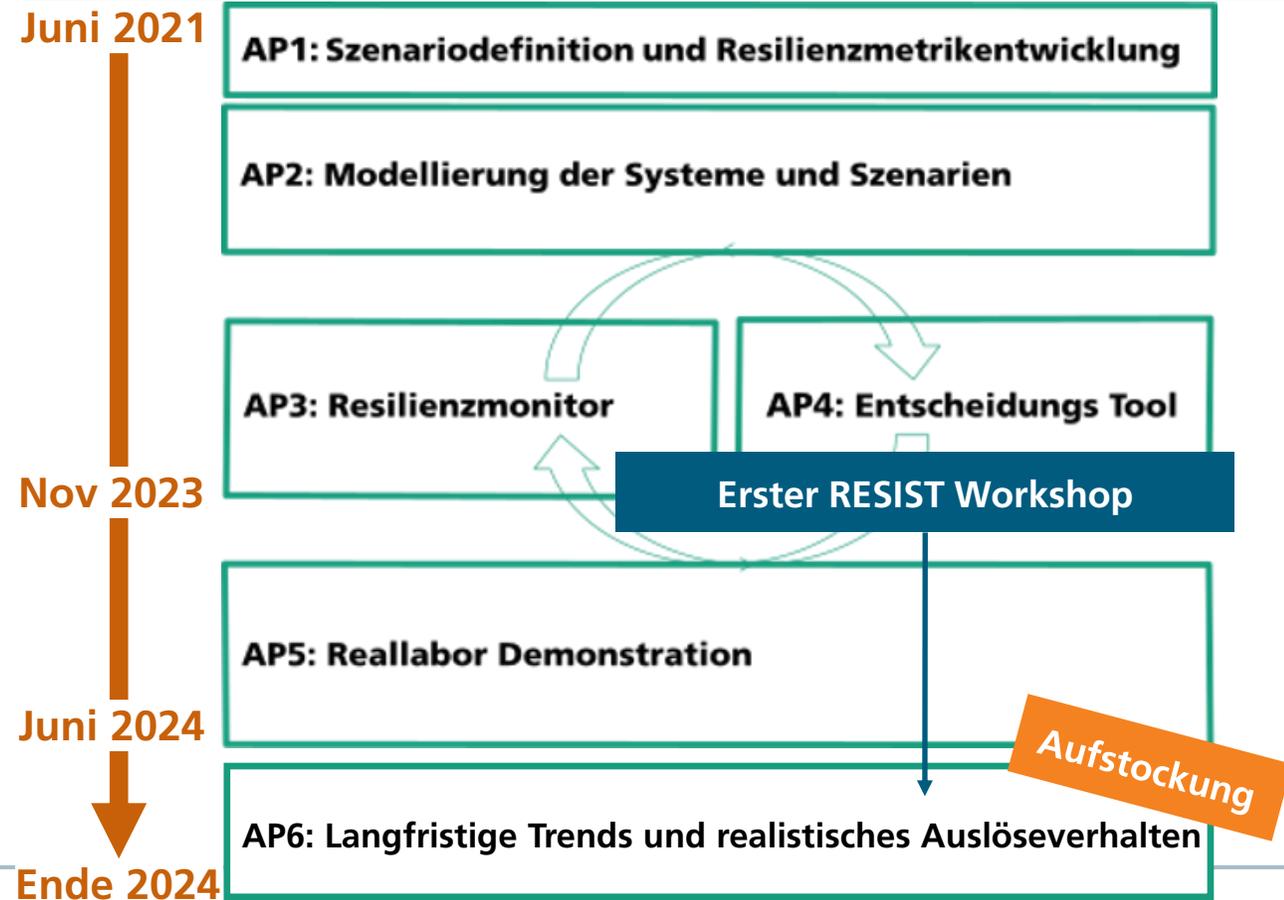
- Umfassendere Kenntnisse über den Systemzustand
- Schnelleres Reagieren und agileres Operieren
- Wachsende Möglichkeiten zu lokaler Selbstversorgung

RESIST ebnet den Weg zur *resilient-by-design* Stromversorgung

RESIST Projektmotivation

- Methoden zur **Quantifizierung und Echtzeiterfassung der Resilienz** des Stromnetzes
- **Prognosefähigkeit für die Gesamt-Resilienz** bezüglich **strukturellen Veränderungen** im Netz
- Konzeptionelle und technische **Handlungsoptionen** zur **kurz- und langfristigen Steigerung der Resilienz**
- Demonstration: Umsetzung im **Reallabor**.
- Aufstockung: Untersuchung **zusätzlicher Szenarien**.

Gesamtstruktur des Projektverlaufs



Drei plus zwei Störungsszenarien stehen im Projekt RESIST im Fokus

Projekt RESIST Gesamtüberblick

- Naturkatastrophe



EINGESCHNEIT: Schneechaos

- Technischer Defekt

Rauch im Umspannwerk, defekte Verteilerkästen
Zigtausende Frankfurter und Offenbacher ohne Strom
Aktualisiert am 27.10.21 um 08:43 Uhr



- Cyber-Angriff



- Alterungseffekte



- Gasmangellage, Klimaentwicklungen



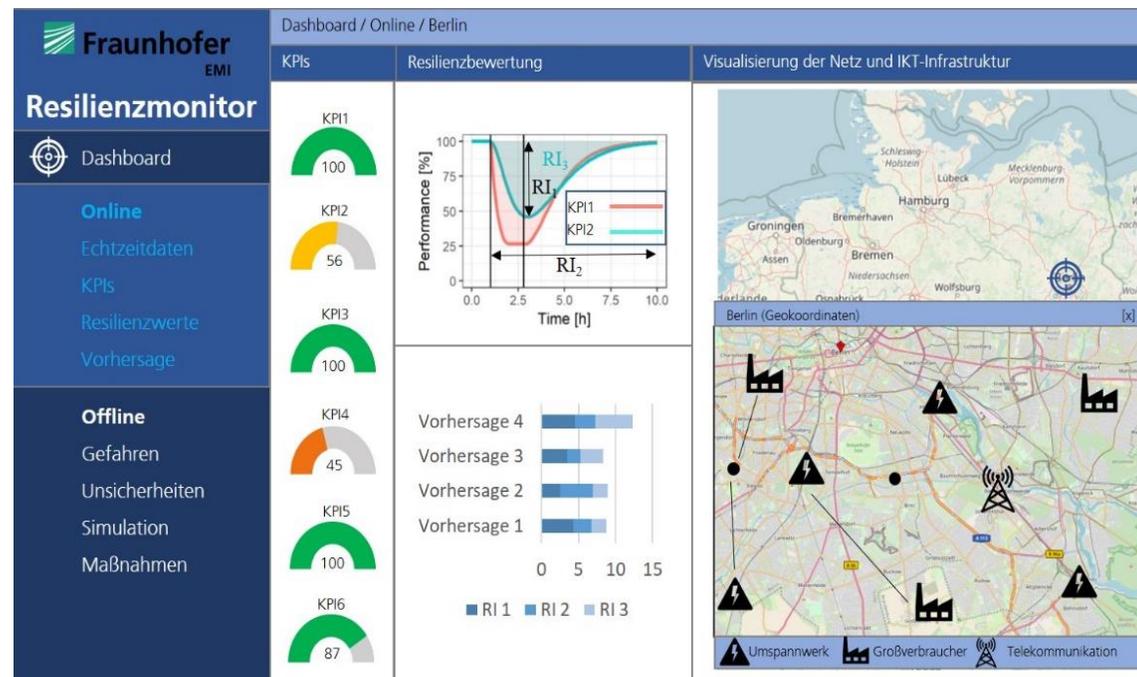
Aufstockung

Zwei Kernpunkte des Resilienzmanagement verbinden die RESIST Erkenntnisse

Projekt RESIST Gesamtüberblick

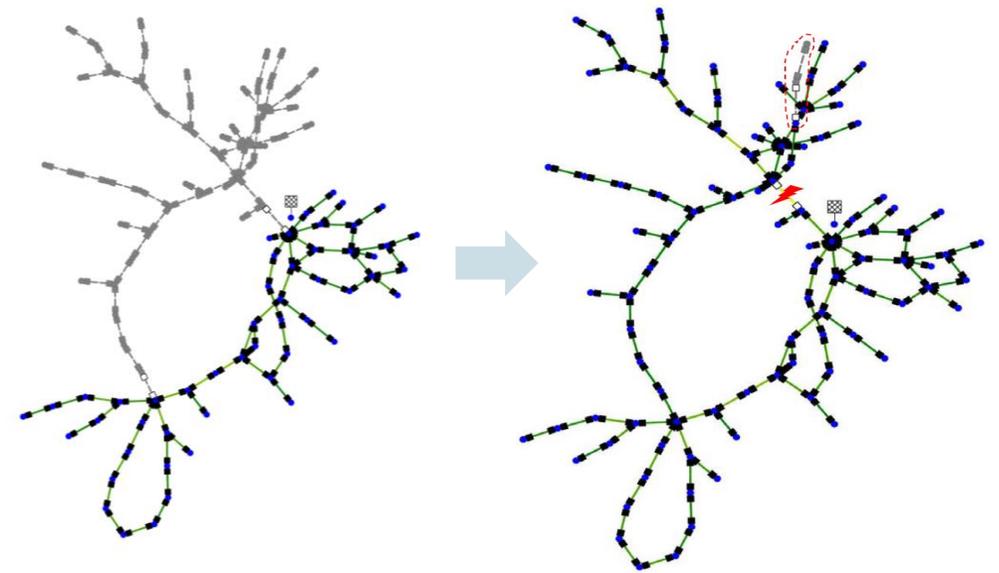
R-Monitor

- Resilienz-Echtzeitüberwachung für alle in RESIST betrachteten Technologiebereiche.



Strategietool

- Strategische, resiliente Netzplanung basierend auf Erkenntnissen aus RESIST



Resilienzmanagement trifft auf Benchmark-Technologien der Stromversorgung

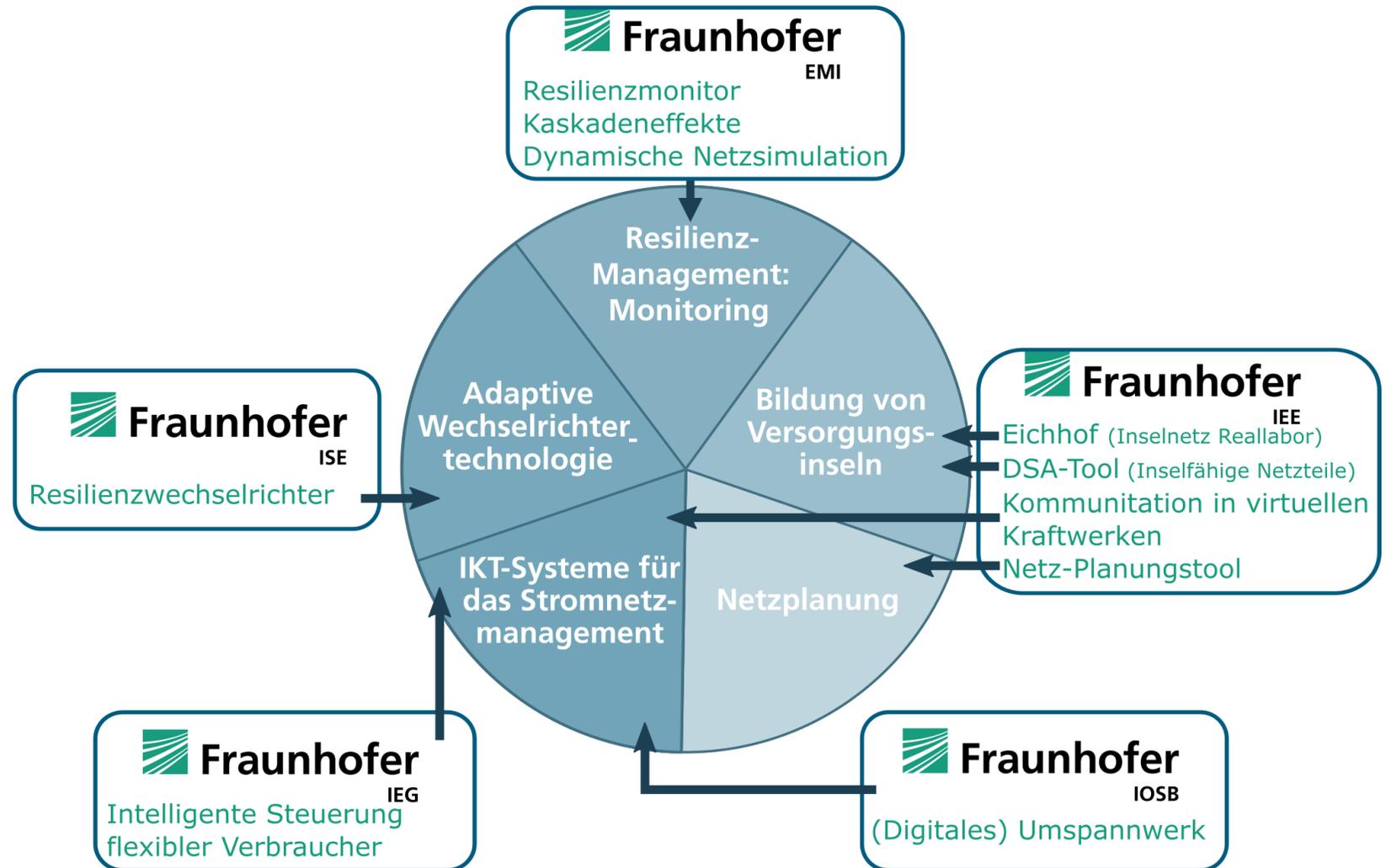
RESIST Projektpartner: Kompetenz und Themenübersicht

Benchmark-Technologie

Weiterentwicklung der Technologien in der Stromversorgung durch Simulationen sowie Hardware

Resilienzmanagement

Strategien des Resilienz-Managements werden angewendet um Resilienz in der Stromversorgung strukturiert und umfassend abzubilden und umzusetzen.



Einige Ergebnisse aus RESIST stehen bereits zur Verfügung

Projektveröffentlichungen

Overload Protection Scheme to Reduce Cascading Outages Considering Thermal Line Limits; Gourab Banerjee et al. (2024) <https://ieeexplore.ieee.org/document/10694594>

Modeling Impact Of Power Outages On Interdependent Critical Infrastructure; Benjamin Lickert et al. (2024) [modeling-impact-of-power-outages-on-interdependent-critical-infrastructure.pdf](https://www.esrel2024.com/modeling-impact-of-power-outages-on-interdependent-critical-infrastructure.pdf) (esrel2024.com)

Improving Power System Resilience Based on Grid-Forming Converter Control and Real-Time Monitoring; Ungerland Jakob et al. (2023) <https://ieeexplore.ieee.org/document/10380816>

Resilience-Driven Strategic Grid Planning with an Overload Protection Scheme Reducing Cascading Outages; Gourab Banerjee et al. (2023) <https://ieeexplore.ieee.org/document/10172935>

Transformation in substation automation: Cyber-Resilient Digital Substations (CyReDS) in power grids; Dennis Rösch et al. (2023) <https://doi.org/10.1515/auto-2023-0075>

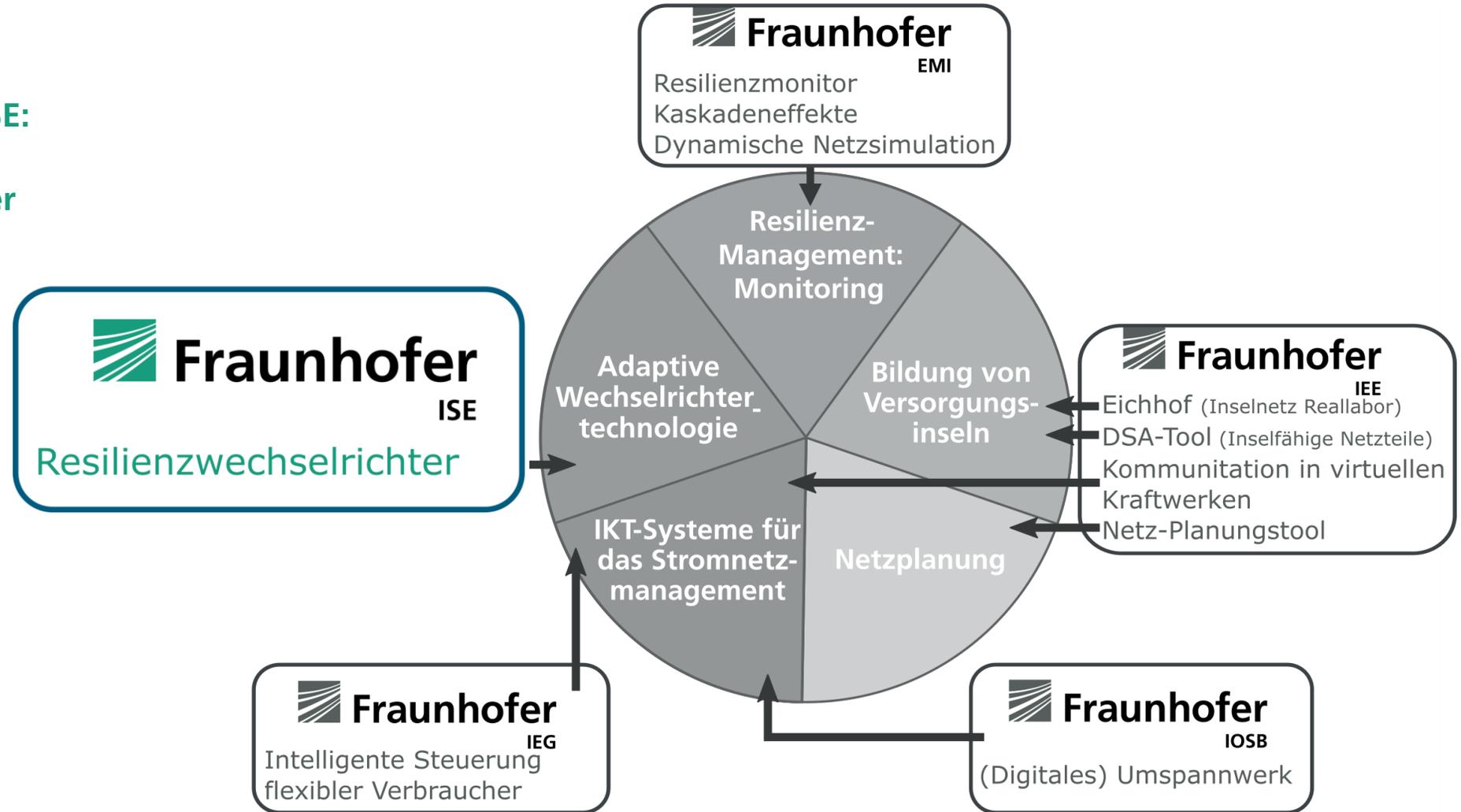
Initial Framework for a Generalized and Quantitative Resilience Evaluation of an Evolving Power Supply System; Kris Schroven et al. (2023) [ESREL 2023, Southampton, UK](https://www.esrel2023.com/) (rpsonline.com.sg)

Übersicht Ergebnisse ISE:

Resilienz Wechselrichter

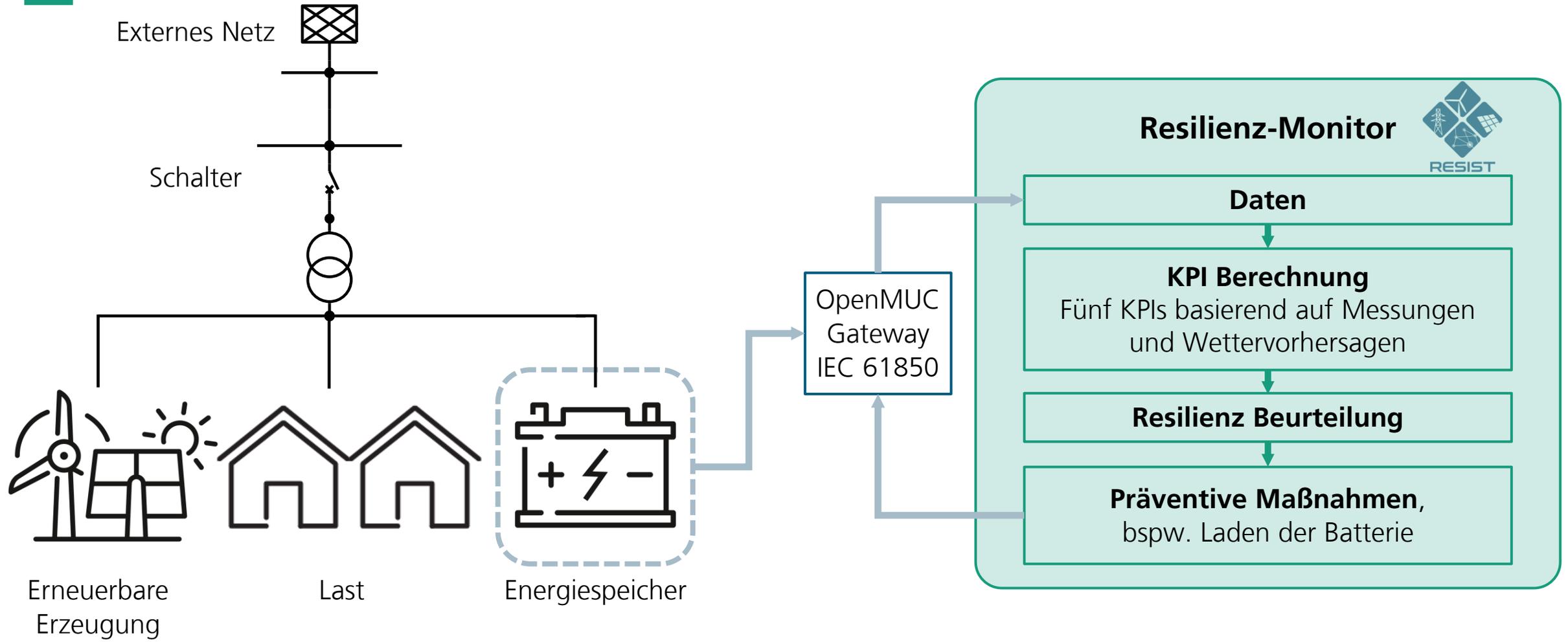
Typhoon HIL
Netzmodell

Kommunikation zum
Resilienz-Monitor



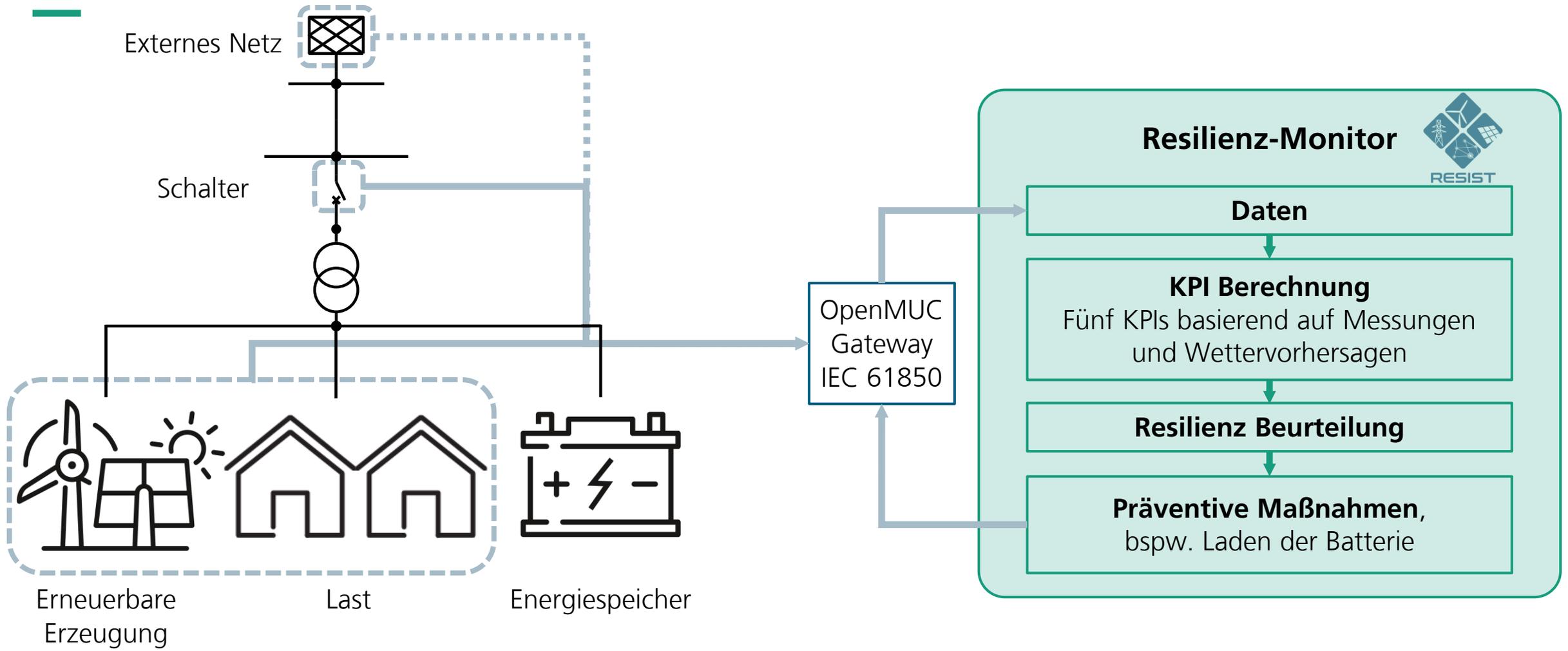
ISE

Interaktionen zwischen Resilienz-Monitor und HIL-Netzsimulation



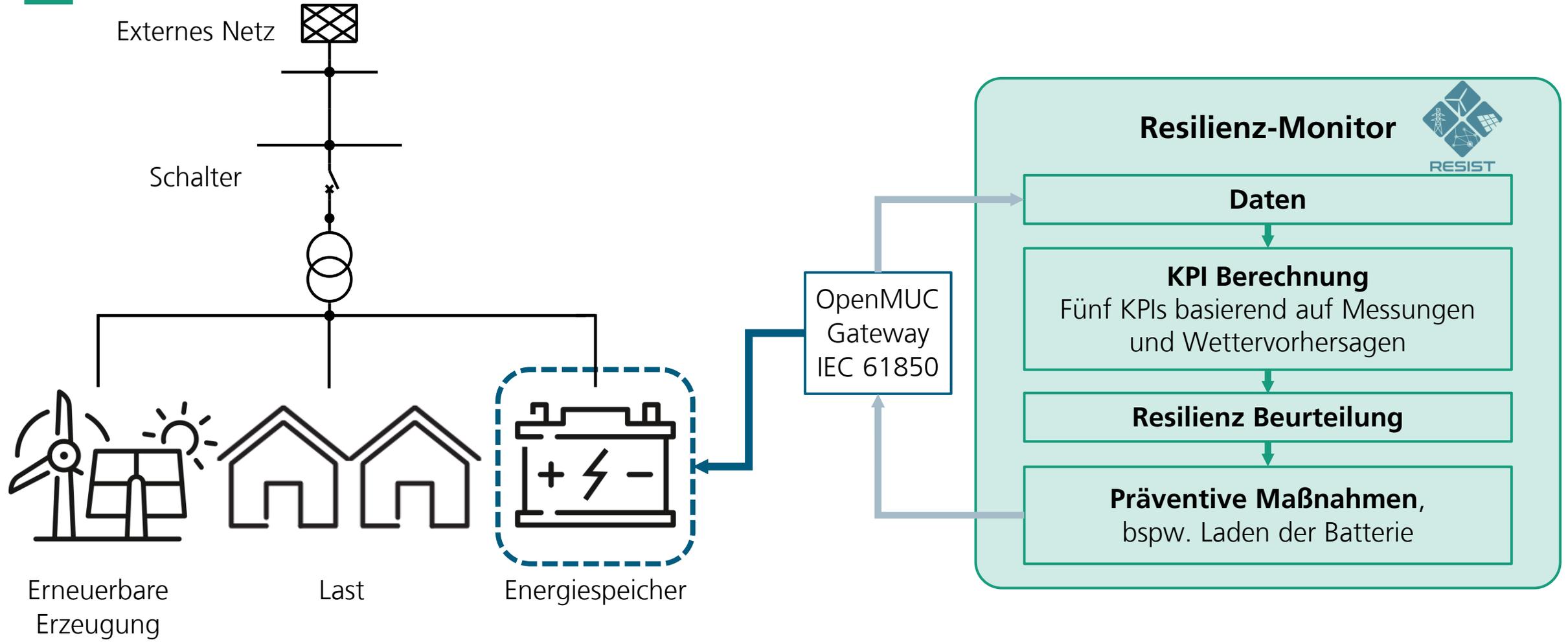
ISE

Interaktionen zwischen Resilienz-Monitor und HIL-Netzsimulation

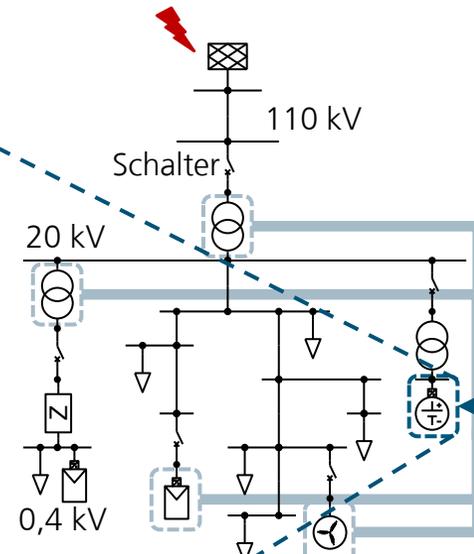
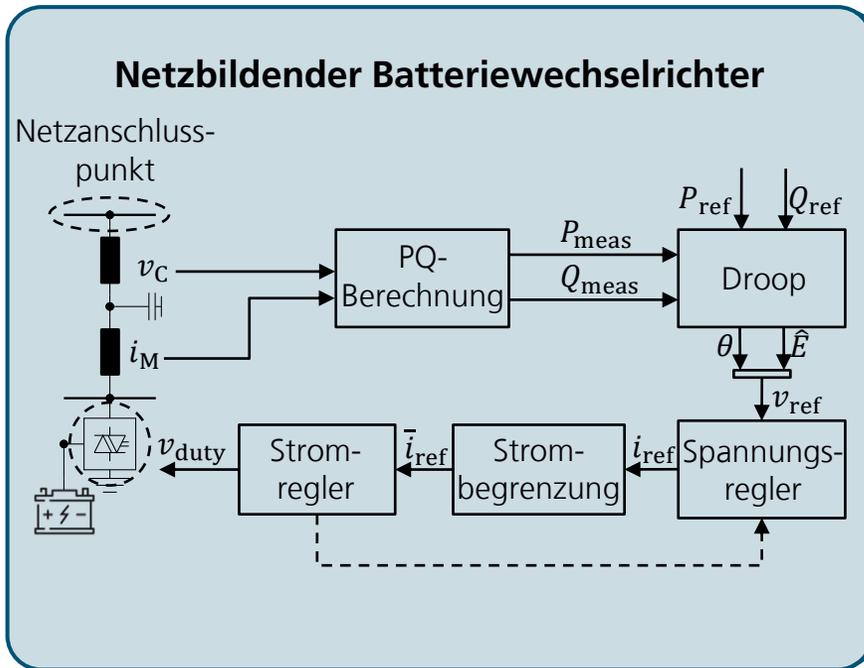


ISE

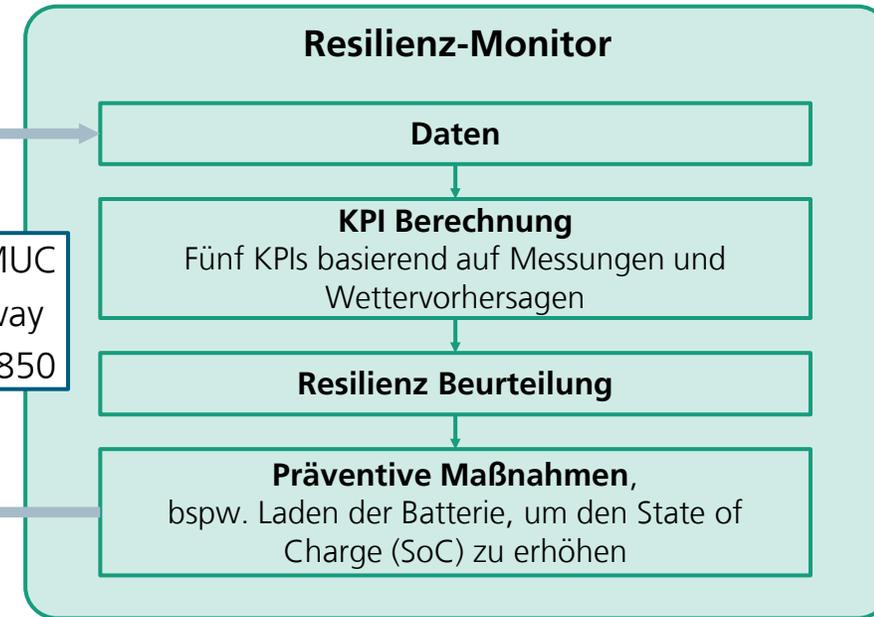
Interaktionen zwischen Resilienz-Monitor und HIL-Netzsimulation



Echtzeitfähige Hardware-in-the-Loop
 Simulationsumgebung im Digital Grid Lab

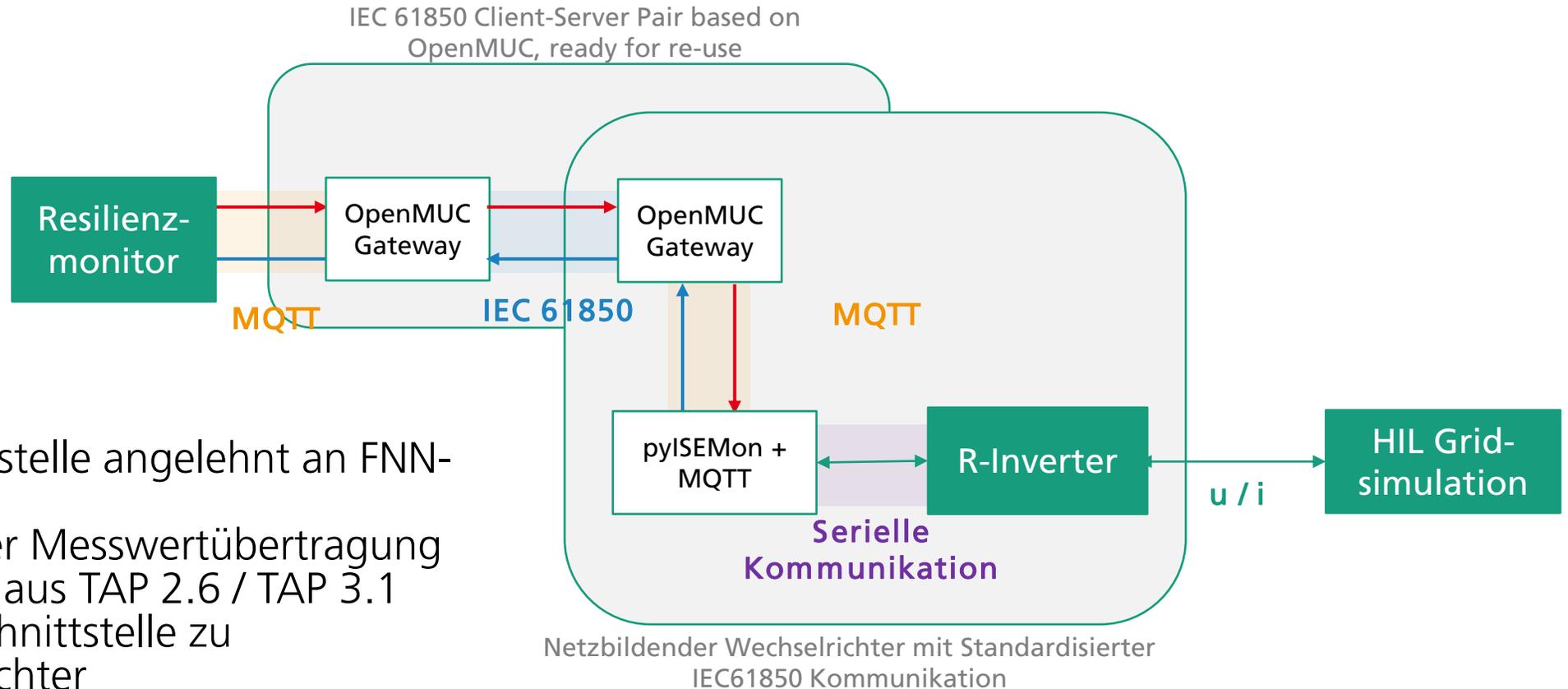


OpenMUC
 Gateway
 IEC 61850



ISE

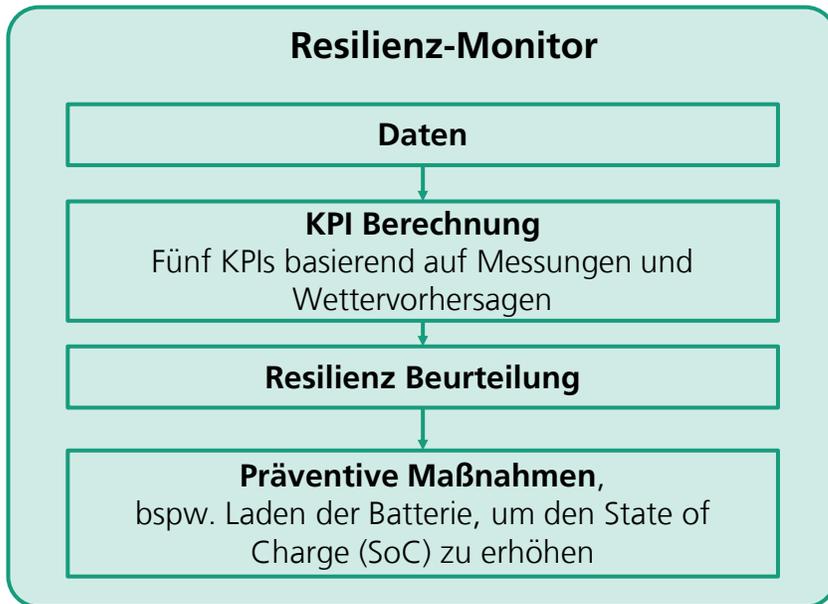
IEC61850 Kommunikation zwischen Resilienz-Monitor und -Wechselrichter



- 61850 Schnittstelle angelehnt an FNN-Steuerbox
- Umsetzung der Messwertübertragung nach Konzept aus TAP 2.6 / TAP 3.1
 - Python Schnittstelle zu Wechselrichter
 - Push Messwerte über lokalen MQTT

ISE

Steuerung durch den Resilienz-Monitor



Relevante KPI:

- **KPI 1: Störungsgefahr** Unwetterwarnungen
- **KPI 2: Systemstress** Stabilität der Insel (Frequenz, Spannung, ...)
- **KPI 3: Leistungsbilanz Insel** $P_{Batterie} + P_{EE} - P_{Last}$
- **KPI 4: Lebensdauer Insel** Versorgungszeitraum (Ladezustand Batterie)
- **KPI 5: Versorgte Verbraucher** Anzahl der versorgten Haushalte / Lasten

Sobald KPI 1 oder KPI 4 geringe Werte aufweisen sendet der Resilienz-Monitor ein entsprechendes Signal und lädt die Batterie

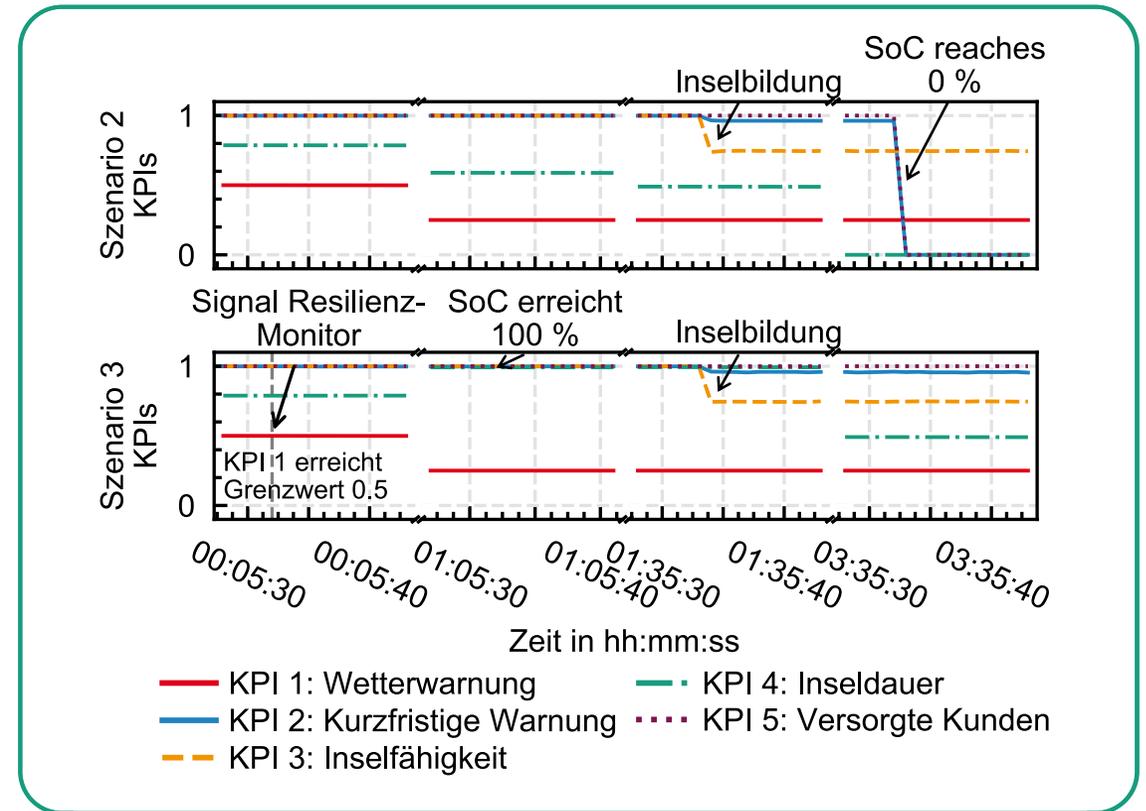
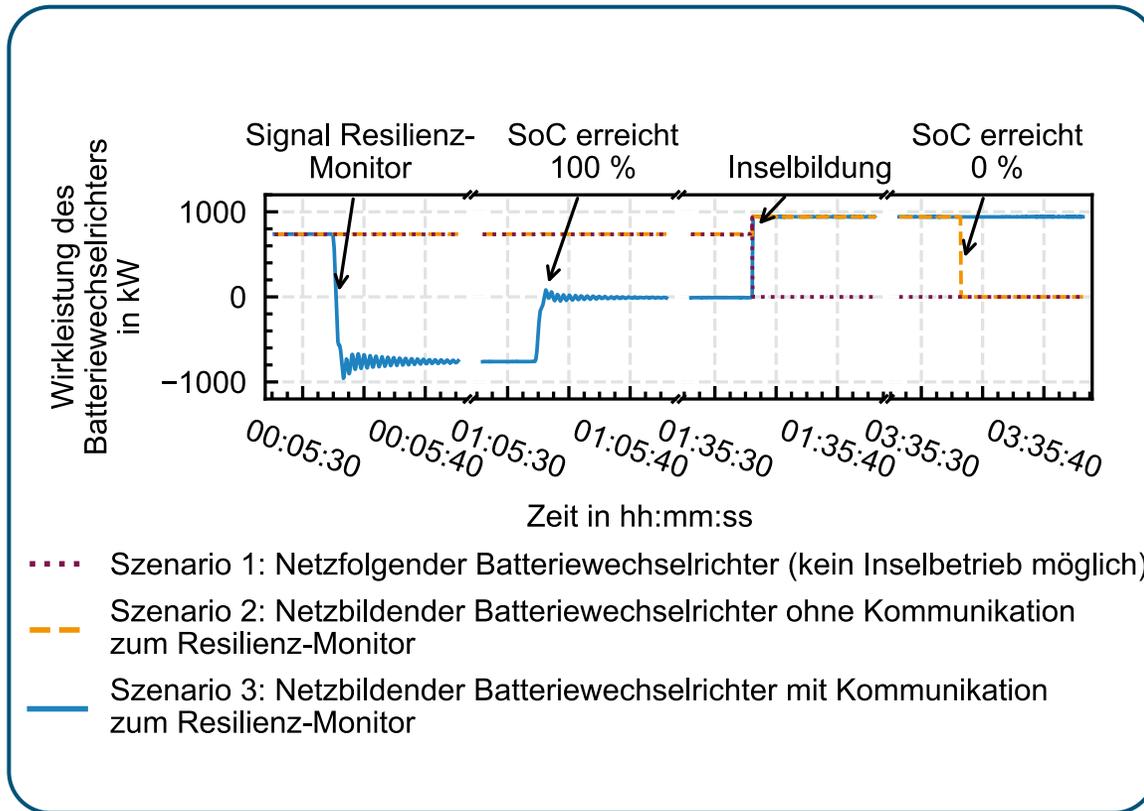


Netzinsel bei Naturkatastrophe

Kommunikation zwischen Resilienz-Monitor und netzbildendem Batteriewechselrichter

Referenz: Blackout in Münster 2005 – ein Schneesturm führt zu einem **Kurzschluss** im Hochspannungsnetz

→ **Abschaltung** eines 20 kV Netzes

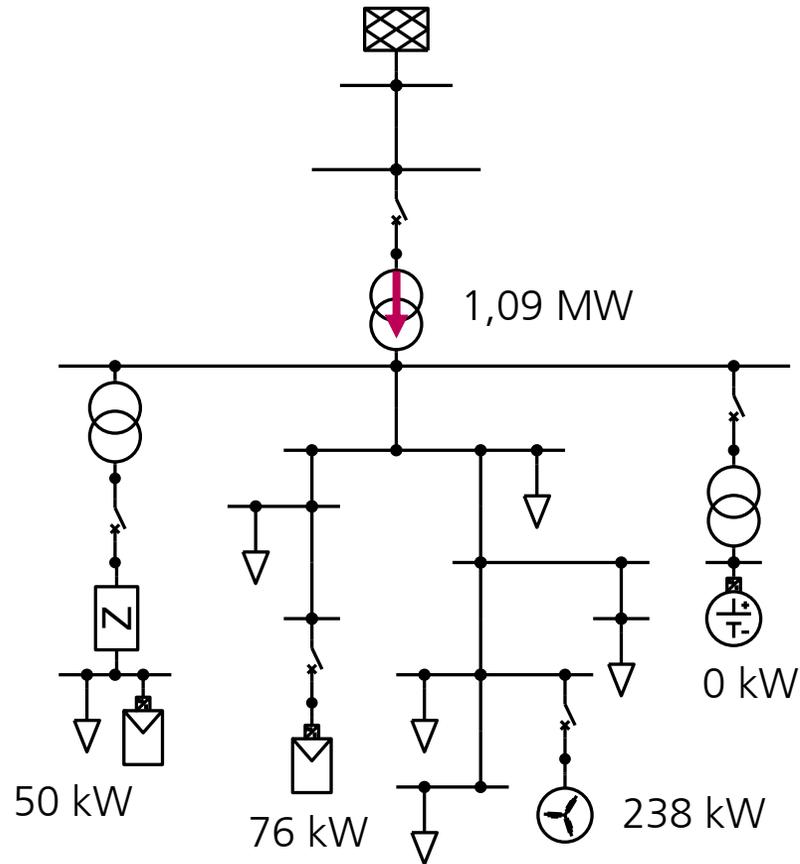


ISE

Durchführung der Tests zur Funktionsweise des Resilienzmonitors und -Wechselrichters

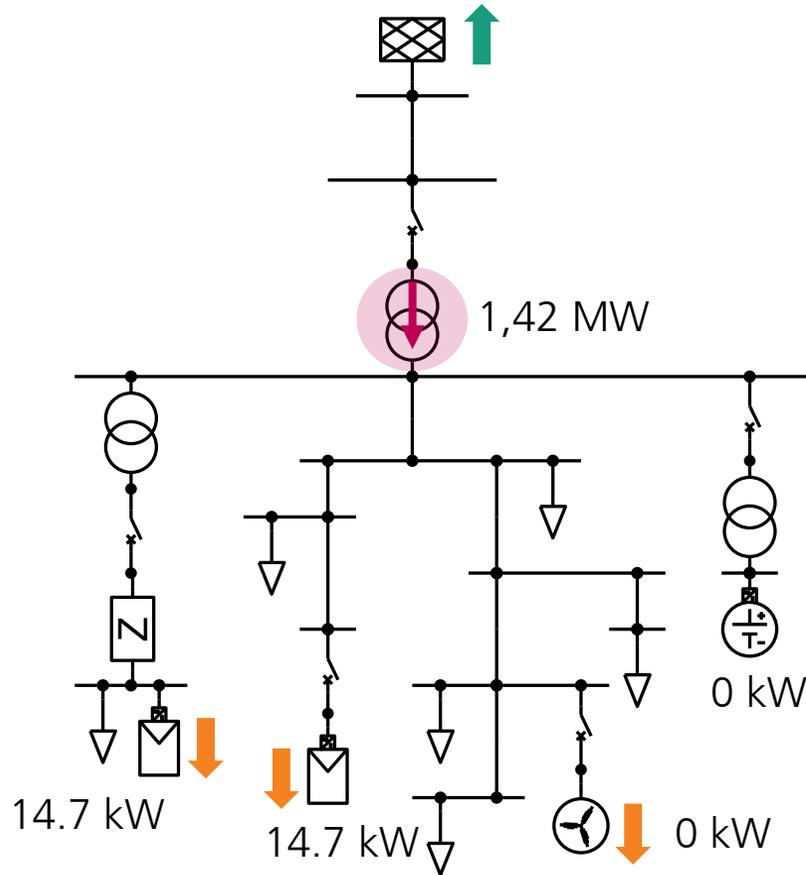
Unterschiedliche Stör-Szenarien

„Base Case“



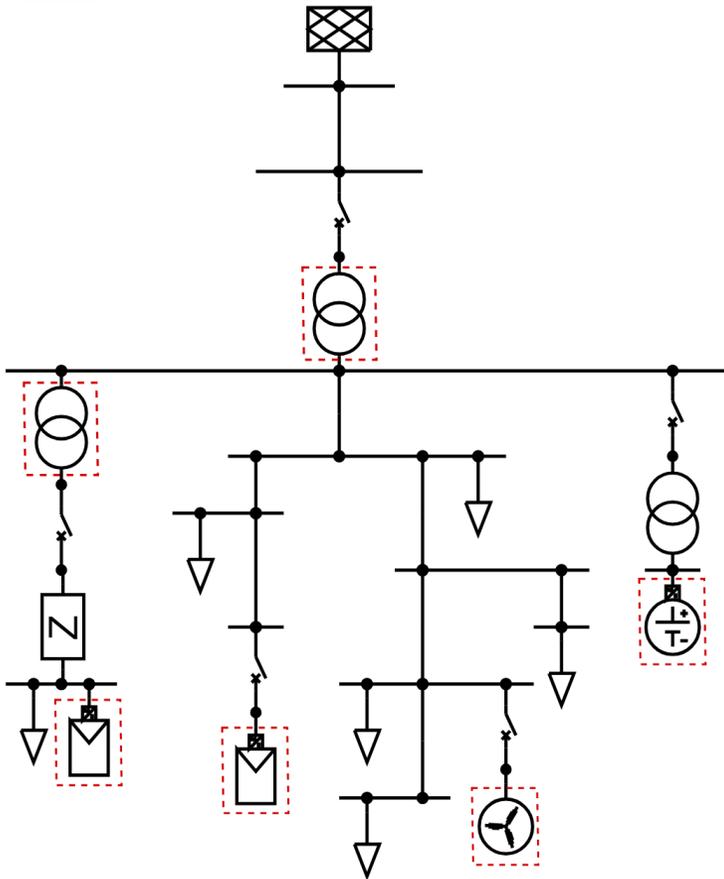
Unterschiedliche Stör-Szenarien

„Bad Weather“

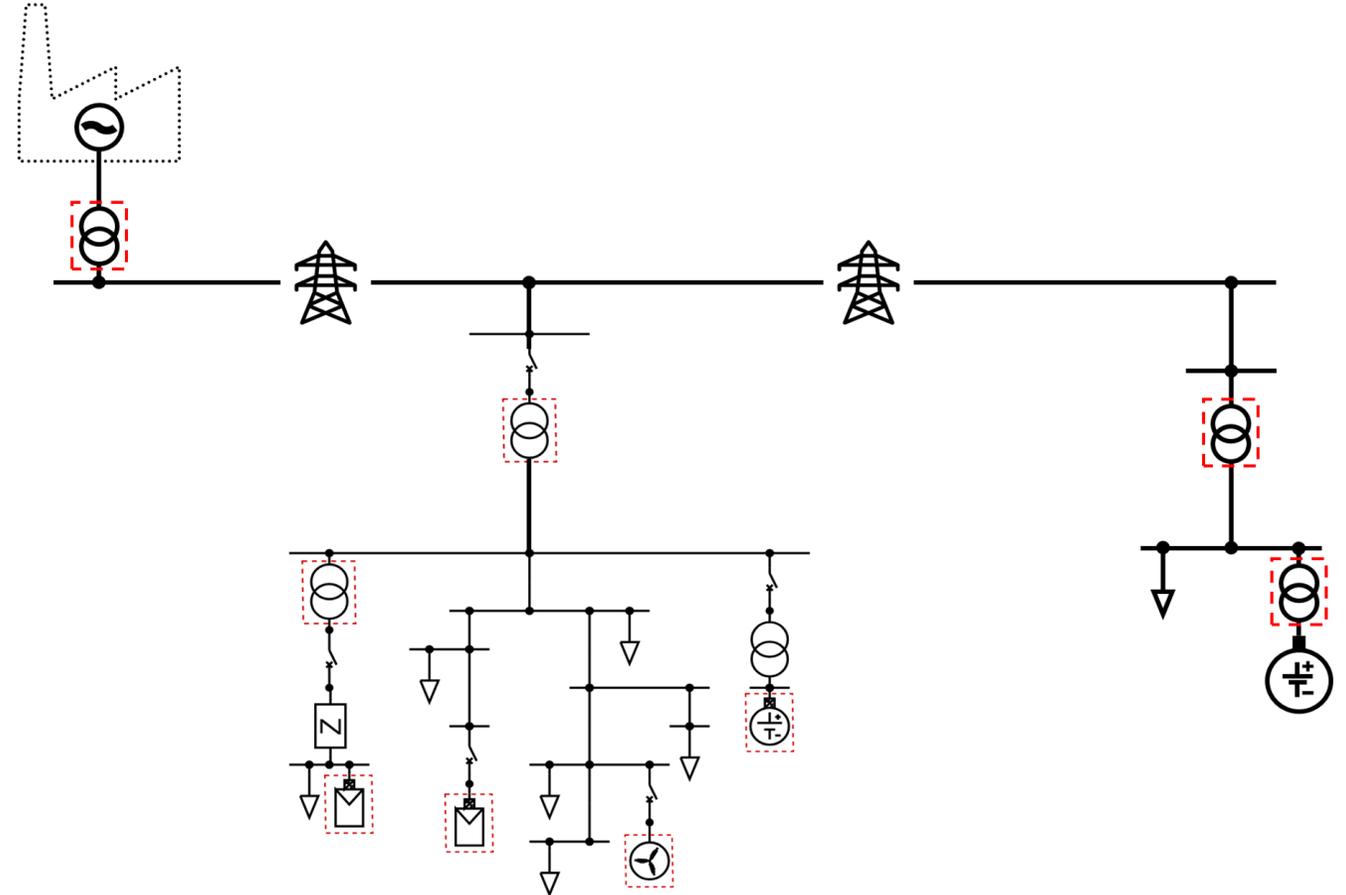
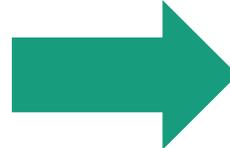


ISE

Erweiterung des modellierten Stromnetzes



Altes Netzmodell (MV und LV)



Neues Netzmodell (HV, MV und LV)

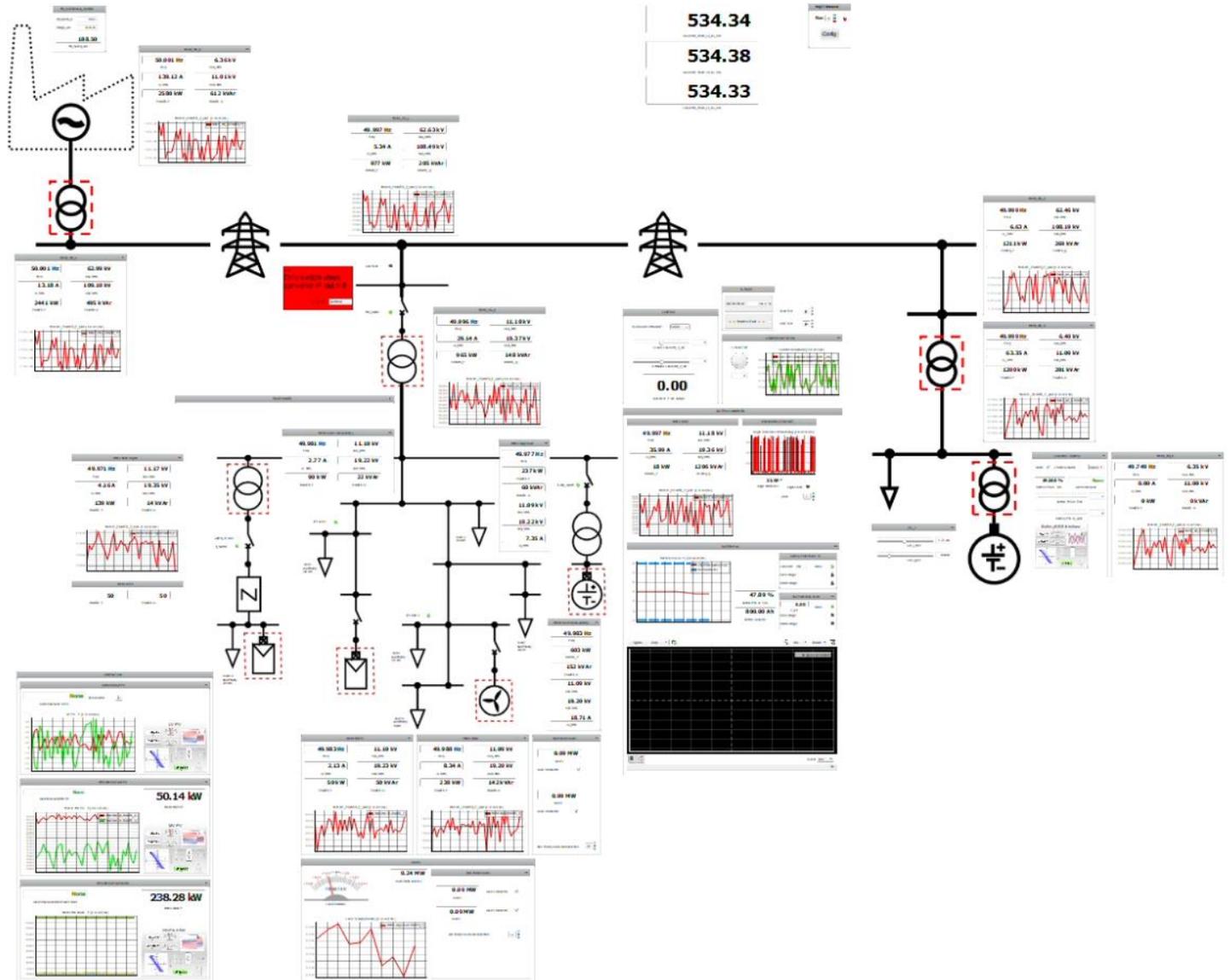
ISE

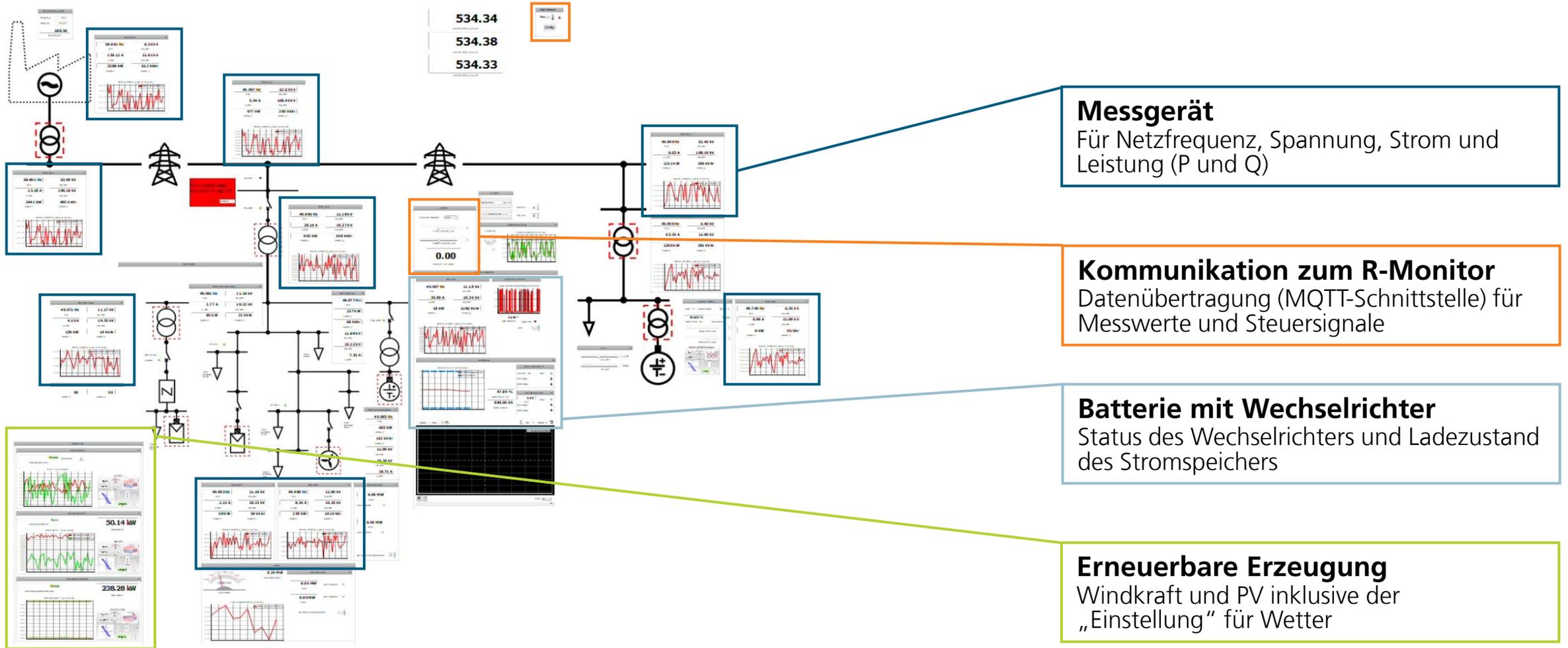
SCADA Interface

Das SCADA Interface der Netzsimulation in der HIL-Software

(Supervisory Control and Data Acquisition)

(Hardware-in-the-Loop)



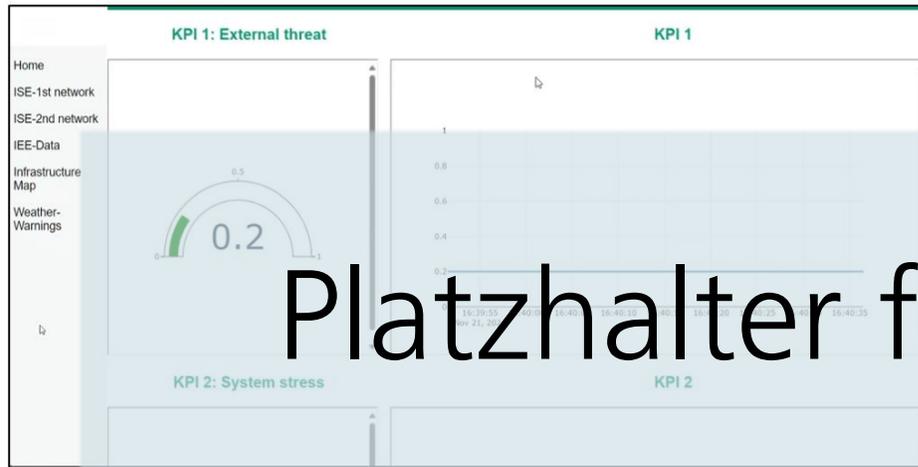


Test des Resilienz-Monitors in Echtzeit

Kommunikation zwischen Resilienz-Monitor und netzbildendem Batteriewechselrichter

ISE & EMI

Video Szenario 1 – Laden der Batterie (90s)



EMI – Resilienz-Monitor

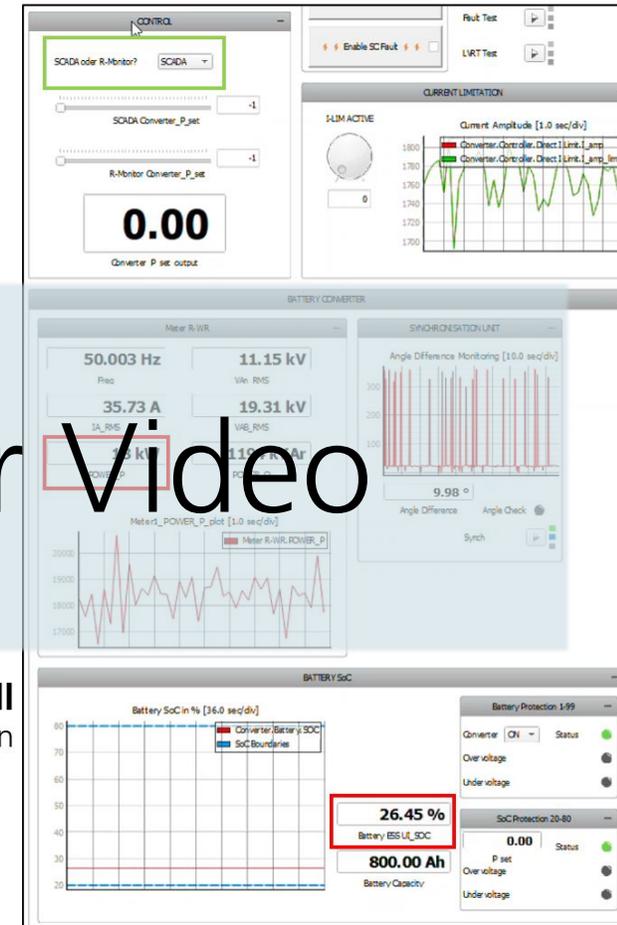
Durch das Aufladen der Batterie werden mehrere KPI verbessert

- Zunächst konstante KPI
- Einbruch bei einschalten der Batterie
- Steigen der KPI mit steigendem Ladezustand

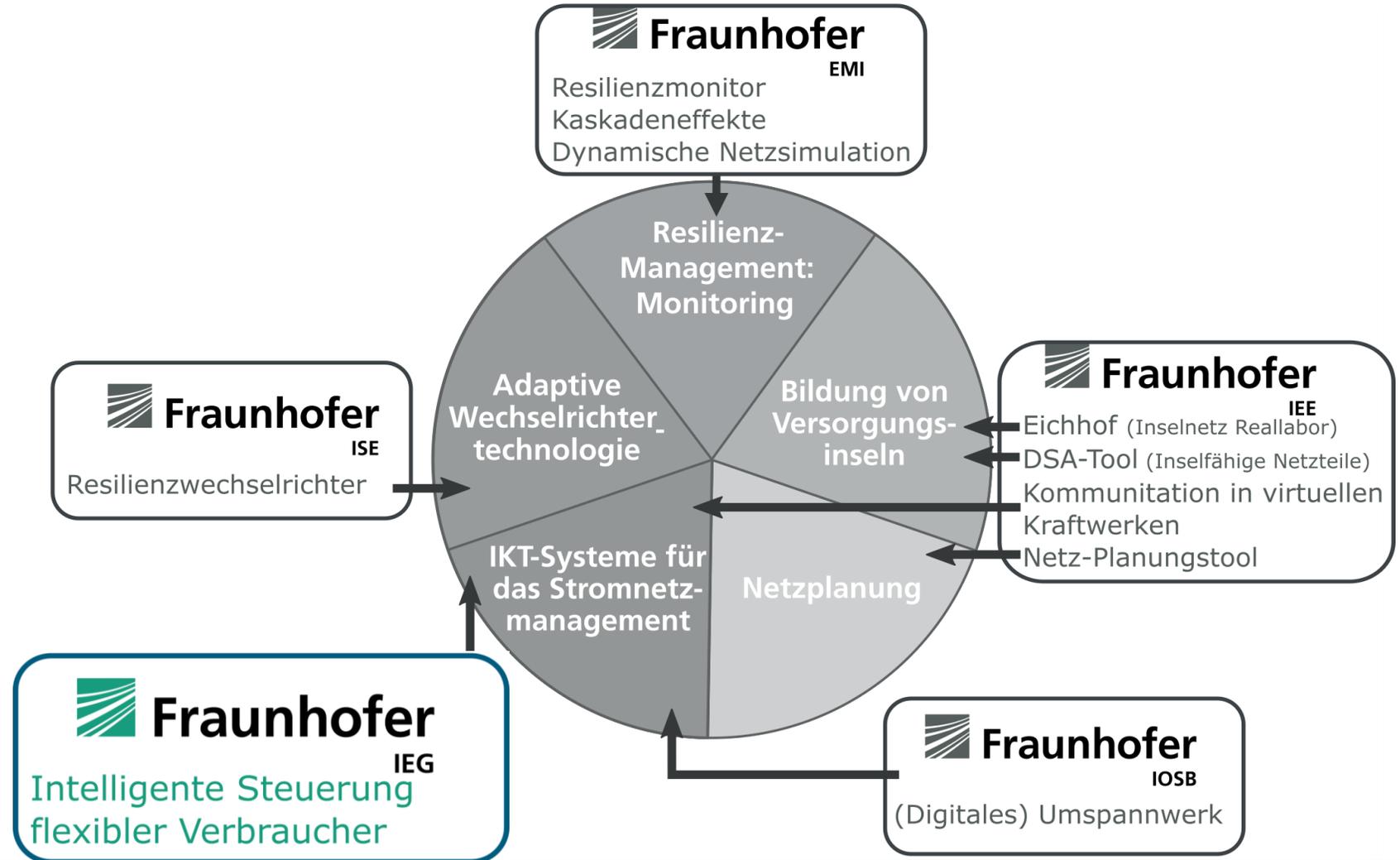
ISE – Netzmodell

Die Batterie wird aufgeladen

- Die Kontrolle wird an den Resilienz-Monitor übergeben
- Die Batterie wird geladen und der Ladezustand (SOC) steigt



Übersicht Ergebnisse IEG:

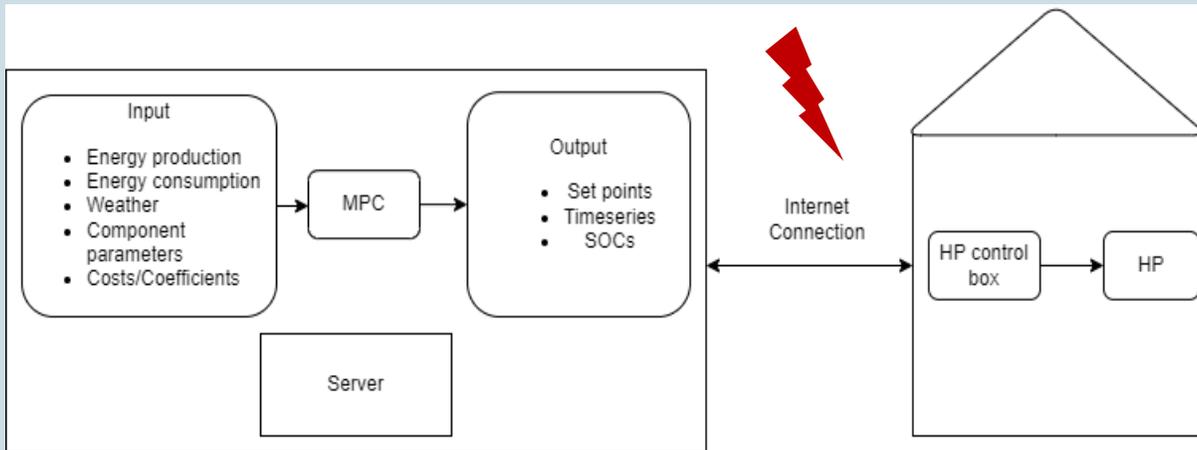


KI-basierte Notregelung für smarte Wärmepumpen

Ausfall der Serververbindung

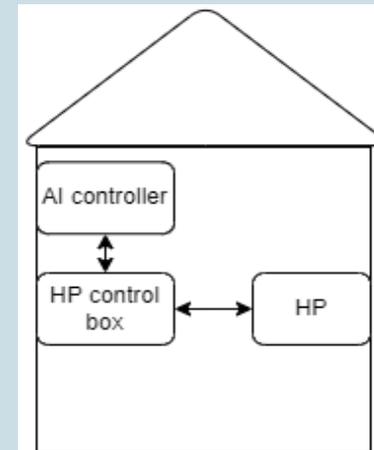
Wärmepumpenregler OptFlex

Szenario: Angriff oder Ausfall der IKT-Infrastruktur:



Severbasierte, optimierte Wärmepumpenregelung einer WP

Vorgeschlagene Lösung: KI-basierte Wärmepumpenregler



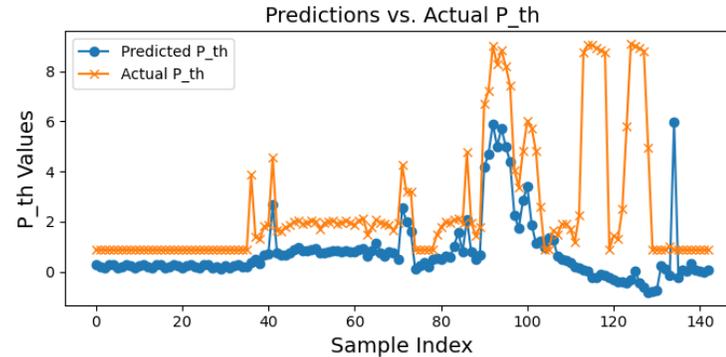
KI-basierte WP-Steuerung

KI-basierte Notregelung für smarte Wärmepumpen

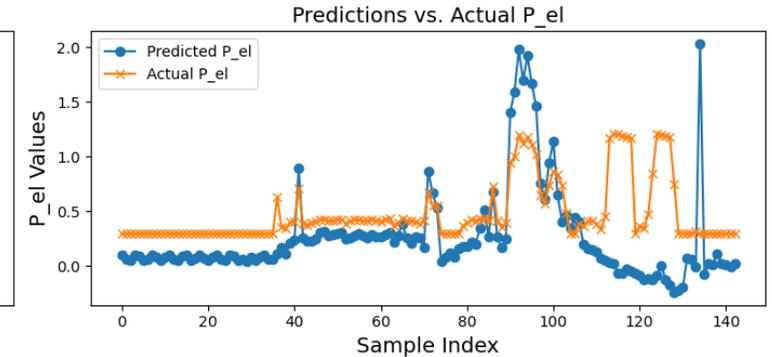
Vergleich **KI-Regelung** mit **OptFlex** einer Zeitreihe der Leistung (kW) der WP für einen Tag im April

Vergleich der verbrauchten Gesamtenergie von Wärme und Strom, wie auch die Gesamtenergie (Wärme und Strom) der Wärmepumpe für die **KI-Regelung** und **OptFlex**.

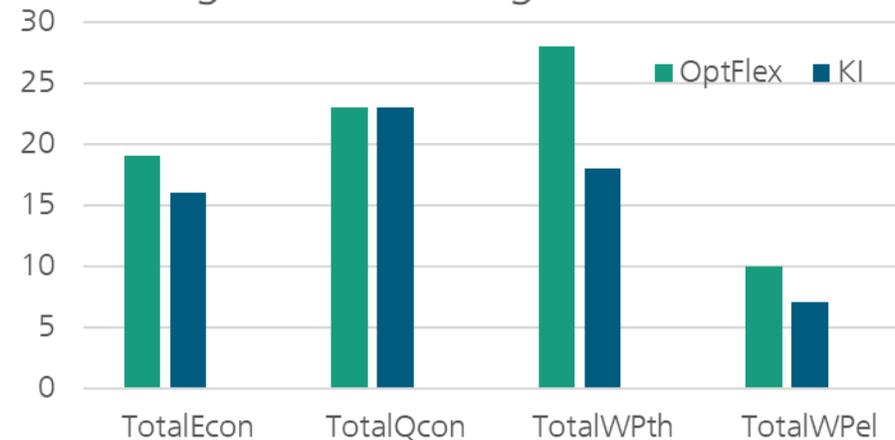
Thermische Leistung der WP



Elektrische Leistung der WP

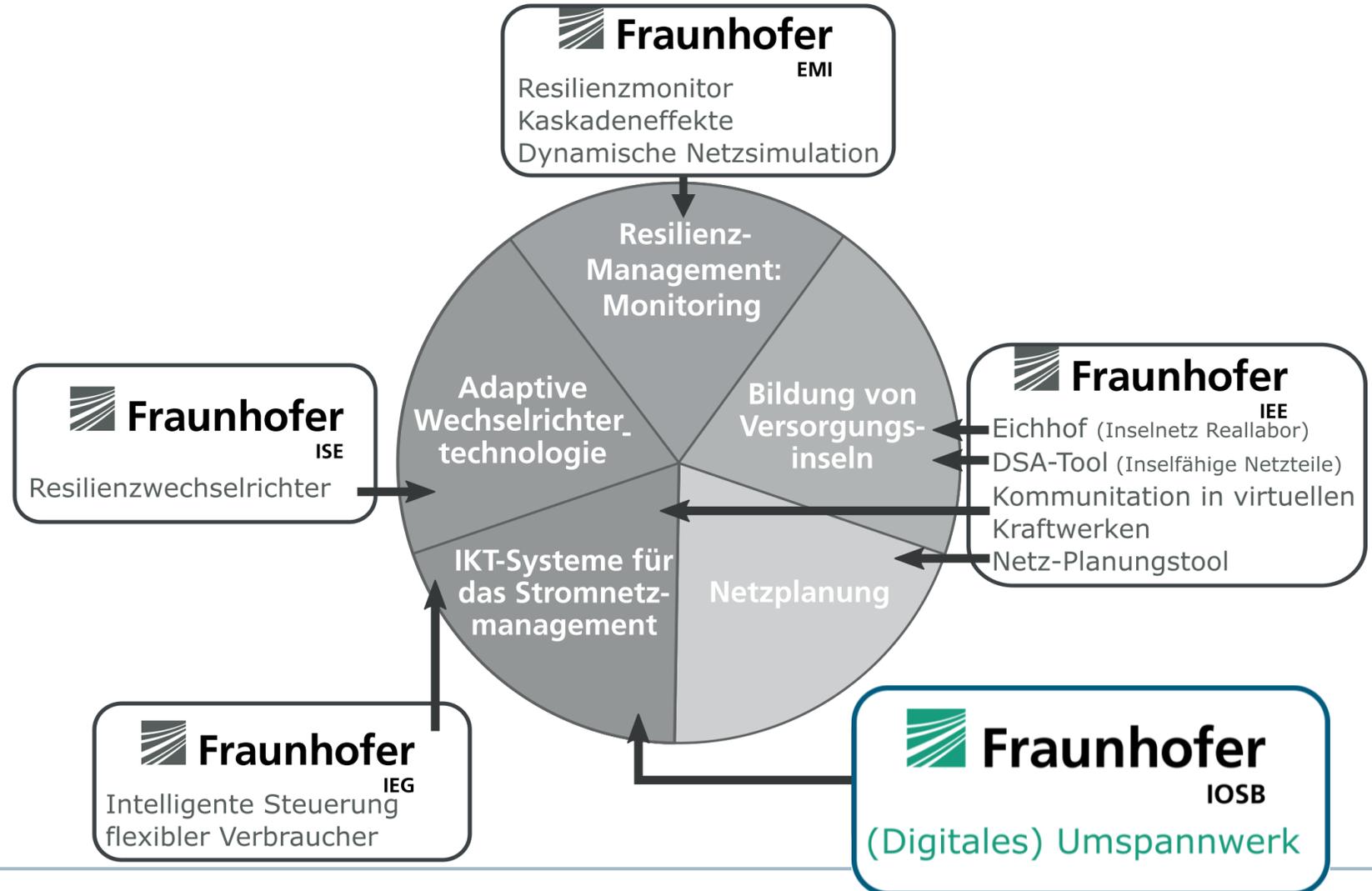


Vergleich der Energieverbräuche



Übersicht Ergebnisse IOSB-AST:

- Co-Simulation von Umspannwerken
- Virtualisierung von Anlagen und IT-Angriffserkennung
- Aufbau Cyber-Resilienz-Monitoring

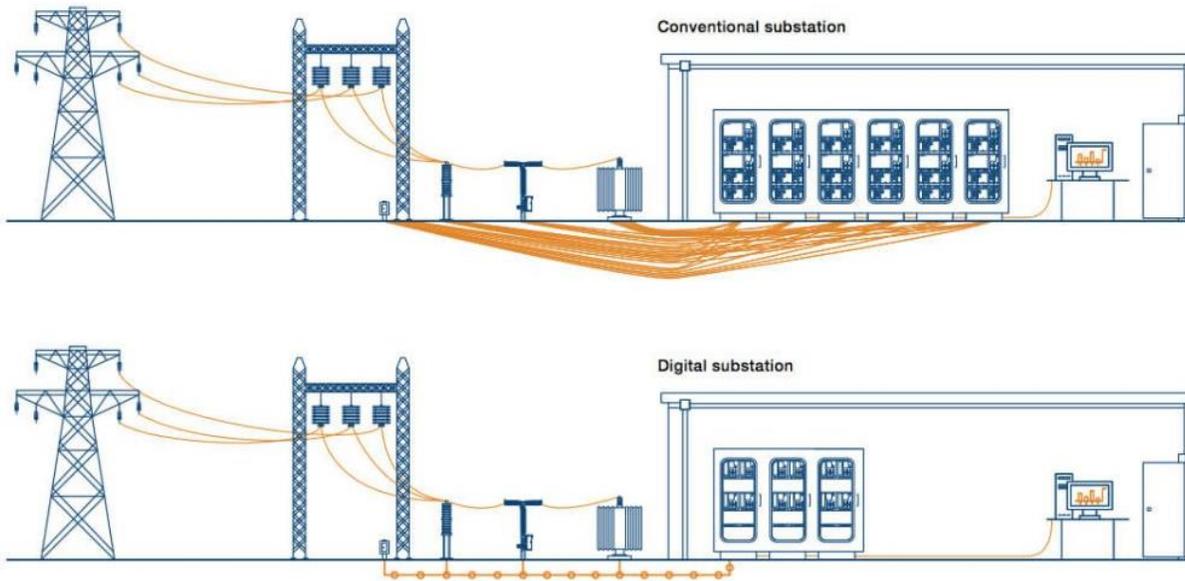


IOSB-AST

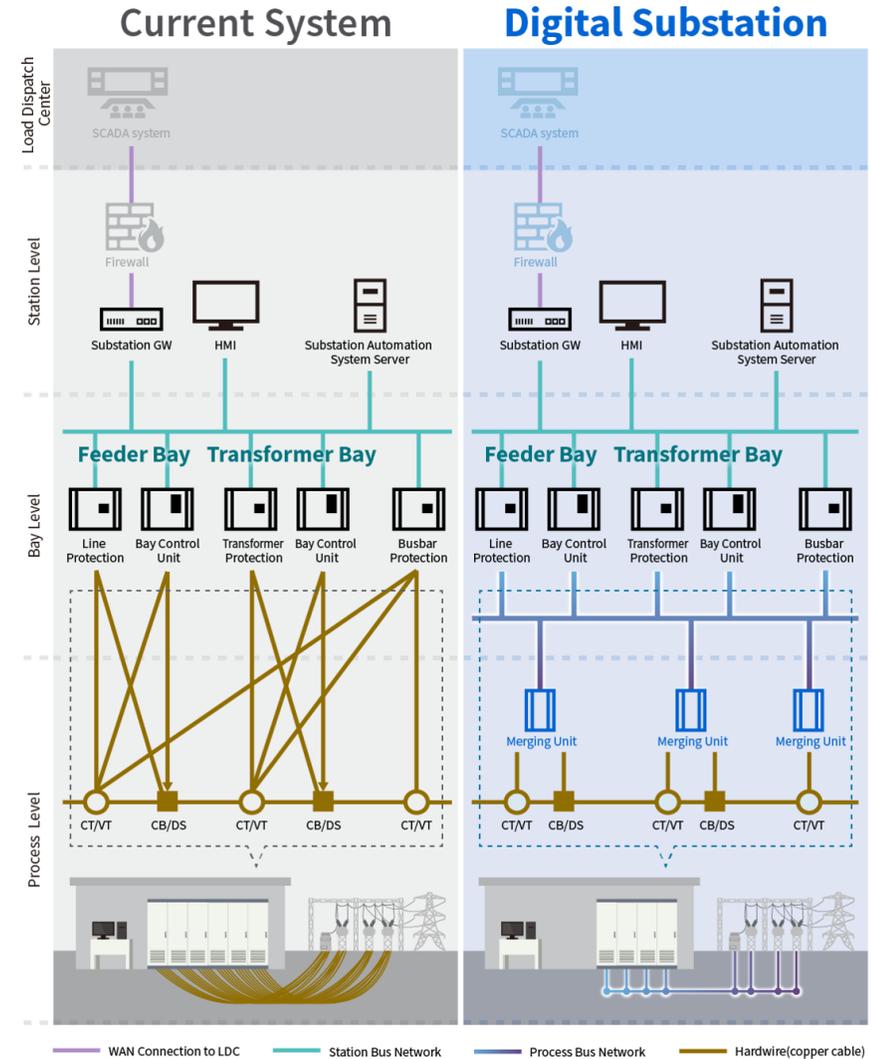
Resilienz-Monitoring in digitalen Umspannwerken

Umspannwerke im Wandel

- Einführung von digitalen Prozessbussen, IEC 61850 Kommunikation
- Einsatz von IEDs (Intelligent Electronic Devices)



- Gesteigerte Vulnerabilität durch Cyberangriffe → **Cyber-Resilienz-Monitoring**



IOSB-AST

Digitale Station - Co-Simulation eines Umspannwerkes

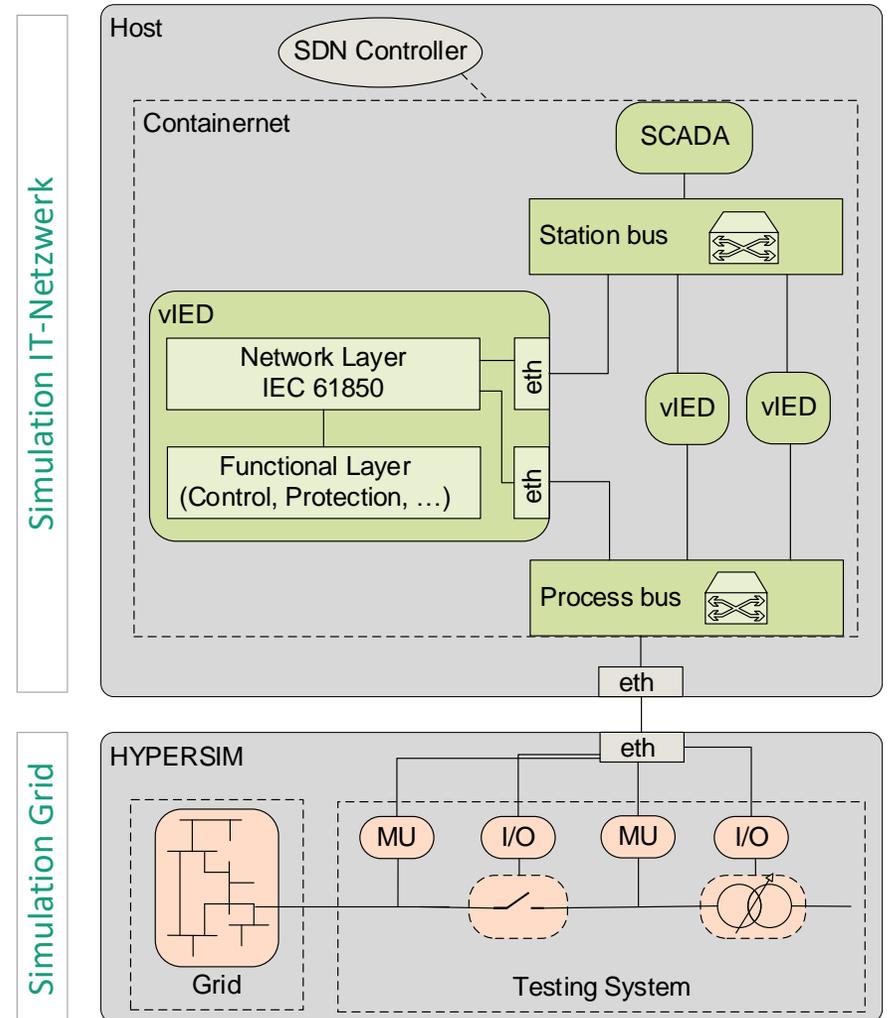
Entwicklung einer virtuellen Digitalen Station

- Umsetzung als **Co-Simulation** (Grid + IT)
 - **Grid**: Simulation elektr. Netze (Hypersim, RT-Sim)
 - **IT**: IT-Netzwerk-Simulation (Containernet)
 - Abbildung der Komponenten der **Stationsautomatisierung als virtuelle Instanzen**
 - Nutzung **von Container-basierter Virtualisierung**
 - Integration von **IEC 61850** Netzwerkschicht und Funktionsschicht

Notwendigkeit der virtuellen Abbildung sämtlicher Komponenten inkl. Kommunikations-Stack

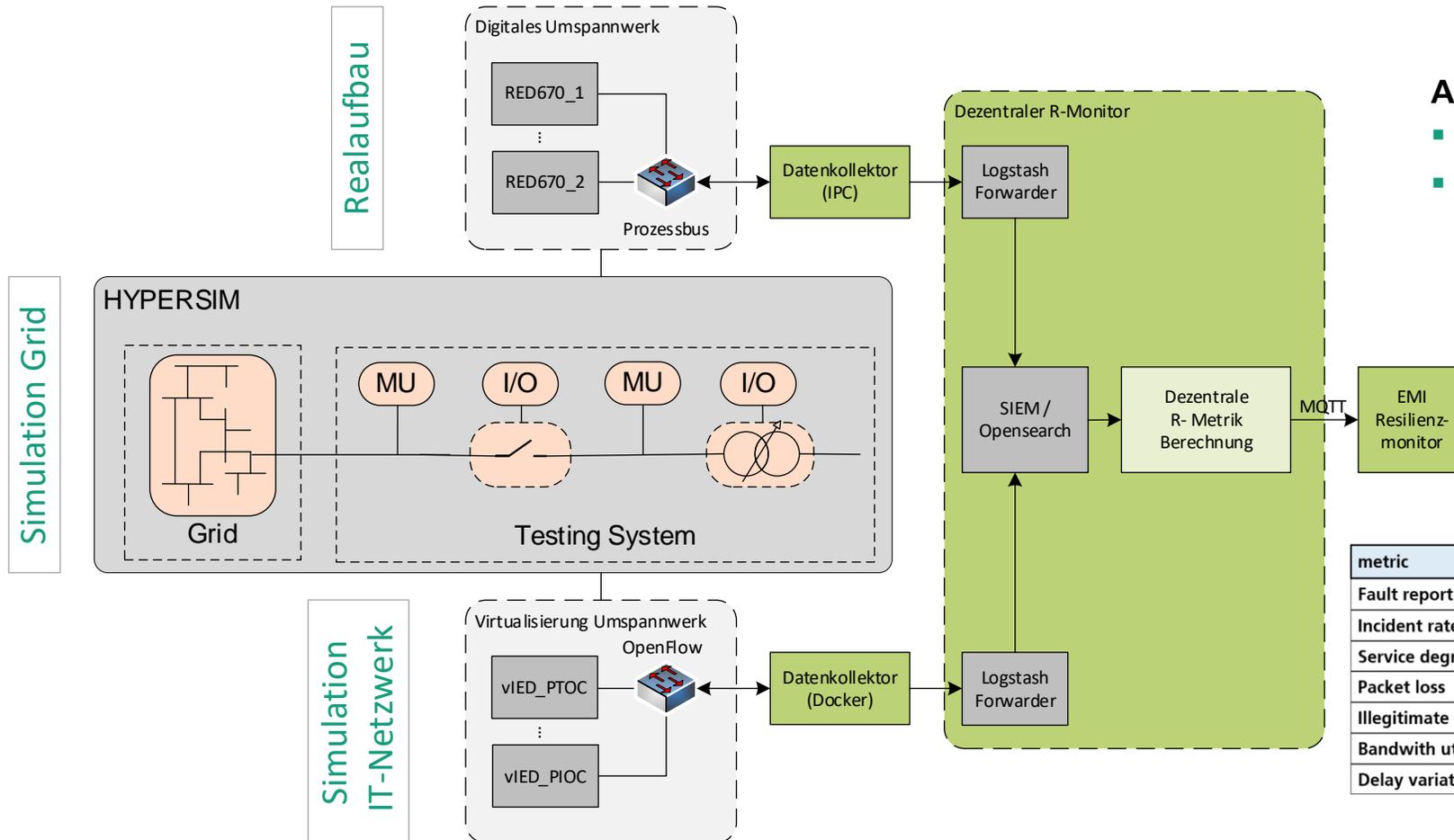
→ **Bereitstellung von Informationen (z. B. Netzwerkverkehr) zur dezentralen Ermittlung von Cyber-Resilienz-Metriken**

- Datenmenge und Art der Daten erfordern dezentrale Verarbeitung und Interpretation



IOSB-AST

Cyber-Resilienz-Monitoring (CyReM) in digitalen Umspannwerken



Aufbau dezentraler Resilienzmonitor

- Implementierung von Prozessbus-Datenkollektoren
- Verwendete Datenquellen:
 - NIDS – Network Intrusions
 - Zabbix – Network-Monitoring
 - Zeek – Network Security Monitoring
 - Geräteslogs – Syslog Forwarder

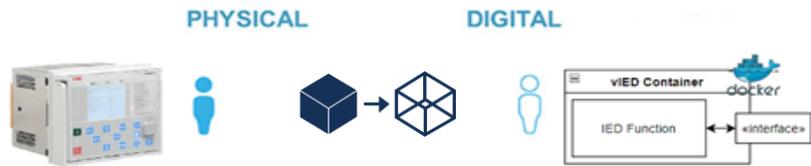
metric	example	green	yellow	red	type
Fault report rate	4%	<10%	10-30%	>30%	deviation from baseline
Incident rate	2/y	0/y	1-2/y	>2/y	threshold value
Service degradation	20min	<2min	2-10min	>10min	threshold value
Packet loss	0%	<1%	1-3%	>3%	threshold value
Illegitimate network traffic	14%	<5%	5-15%	>15%	percentage value
Bandwidth utilization (diff)	8%	<10%	10-25%	>25%	deviation from baseline
Delay variation (Jitter + Latenz)	2ms	<1ms	1-3ms	>3ms	threshold value

IOSB-AST

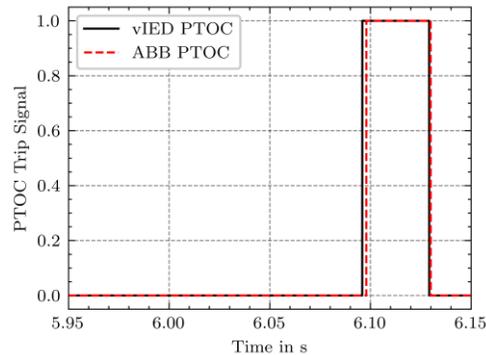
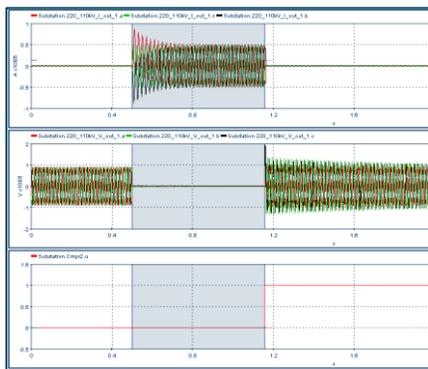
Virtualisierung und Angriffserkennung: Resilienzmetriken bei IT-Angriffen

Virtualisierung von IEDs

- Umsetzung der IED-Funktion als **Docker Container**
- Nutzung der **libIEC61850** zur Umsetzung der Kommunikationskanäle

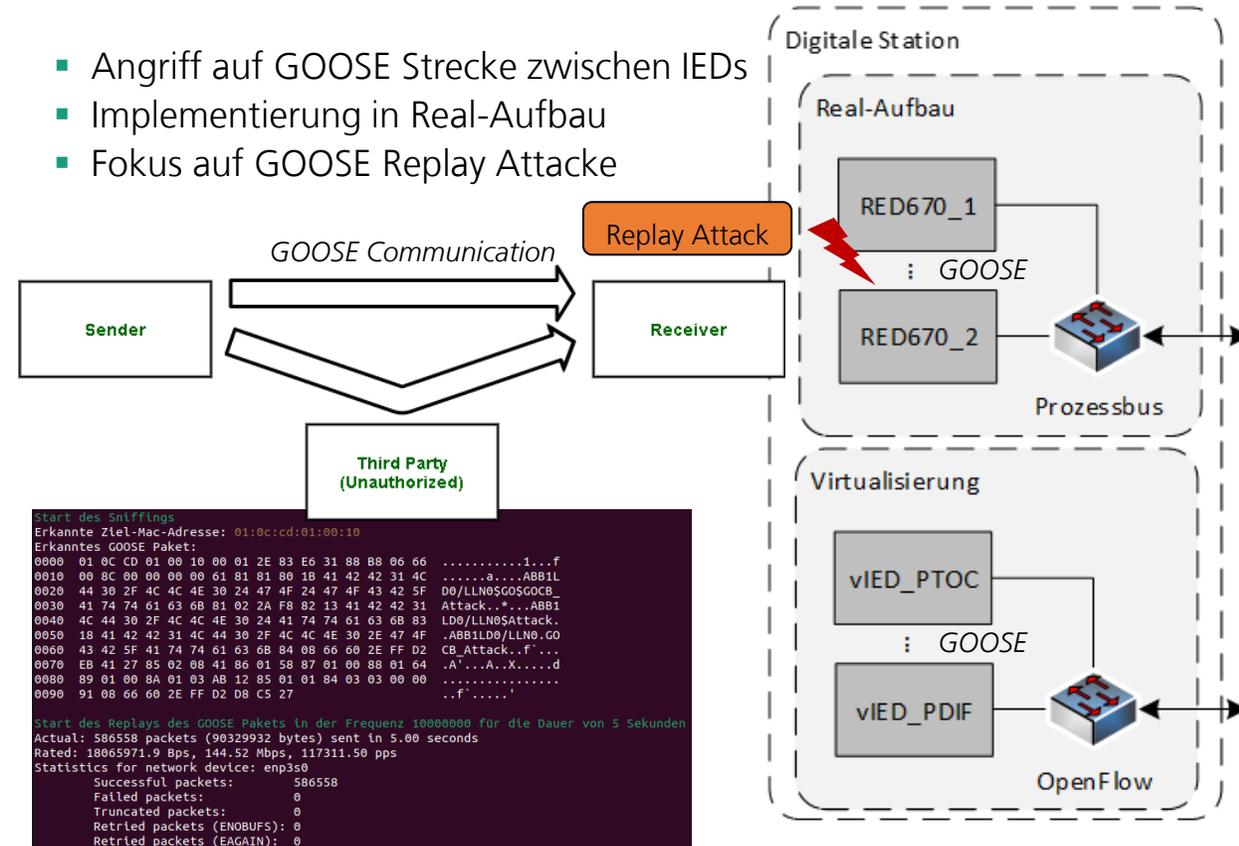


- Kopplung mit **Echtzeit Simulator** von Opal-RT
- Fokus auf Überstromschutz (51P/50P PTOC/PIOC)



Schadenszenario IT-Angriff Prozessbus

- Angriff auf GOOSE Strecke zwischen IEDs
- Implementierung in Real-Aufbau
- Fokus auf GOOSE Replay Attacke



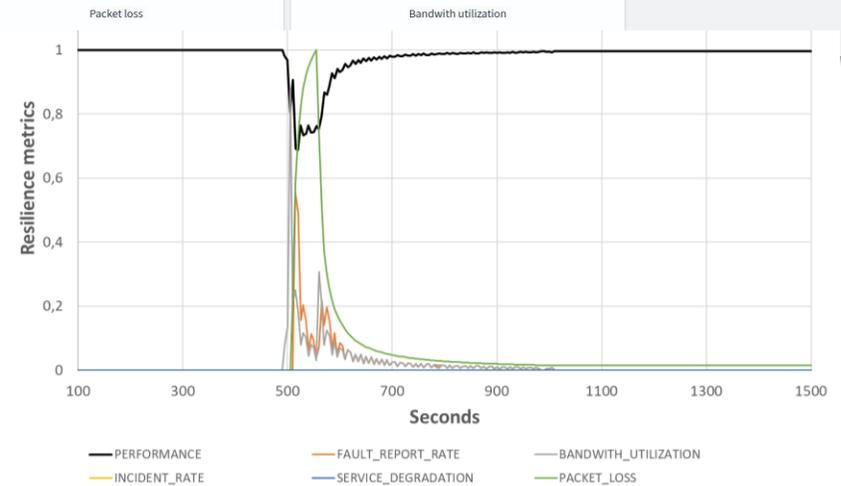
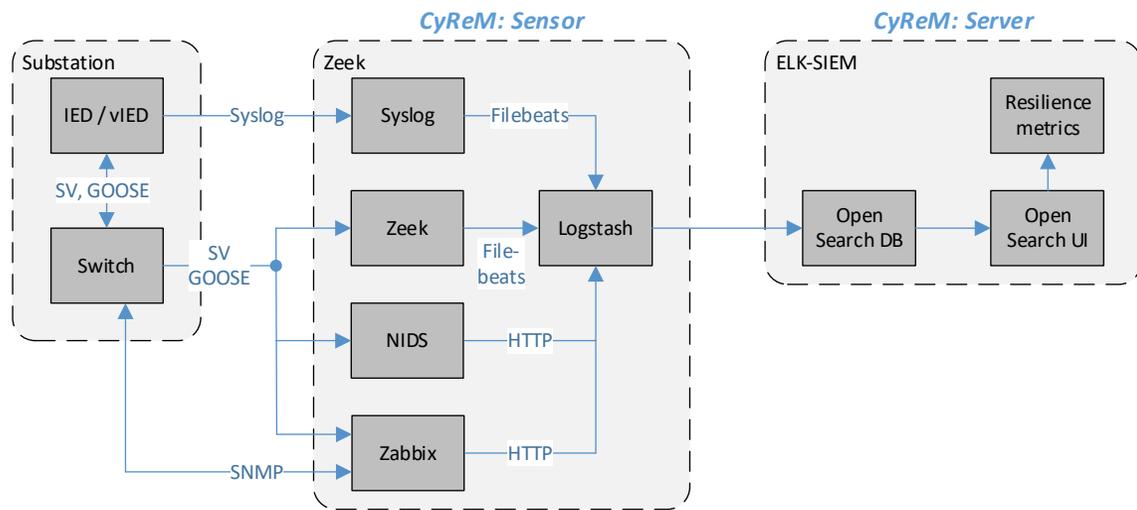
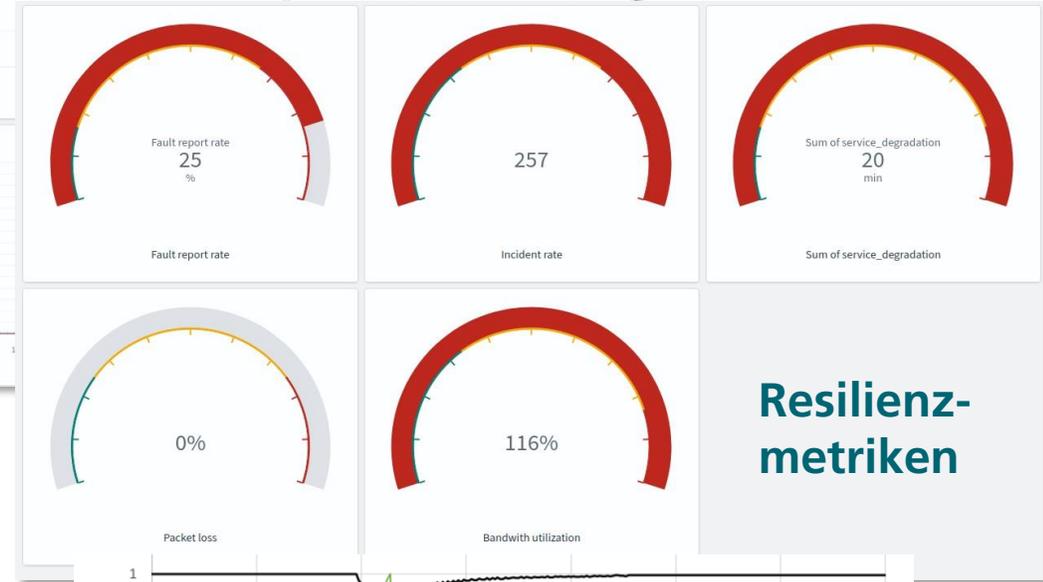
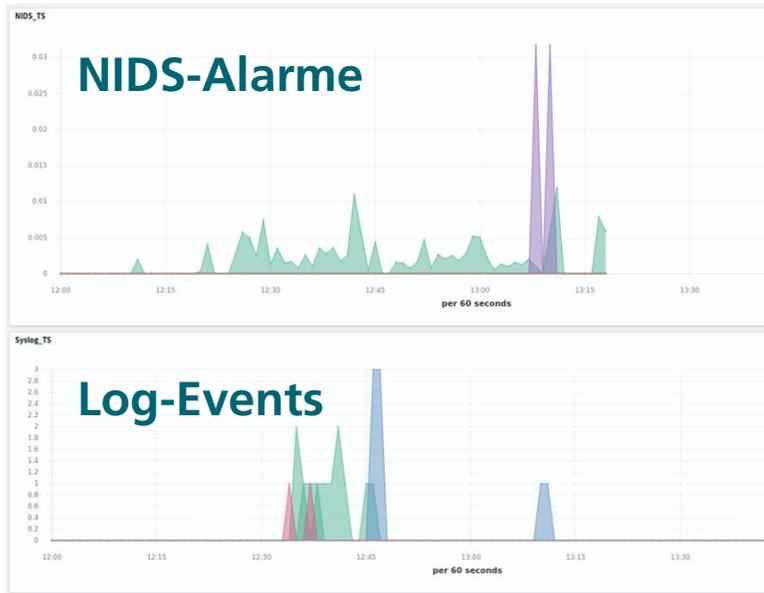
```

Test_DemoRules
C:\Users\keu\.conda\envs\python37\python.exe "D:/Projekte/FHG_KP_RESIST/08 Software/01 Python/ast.resis

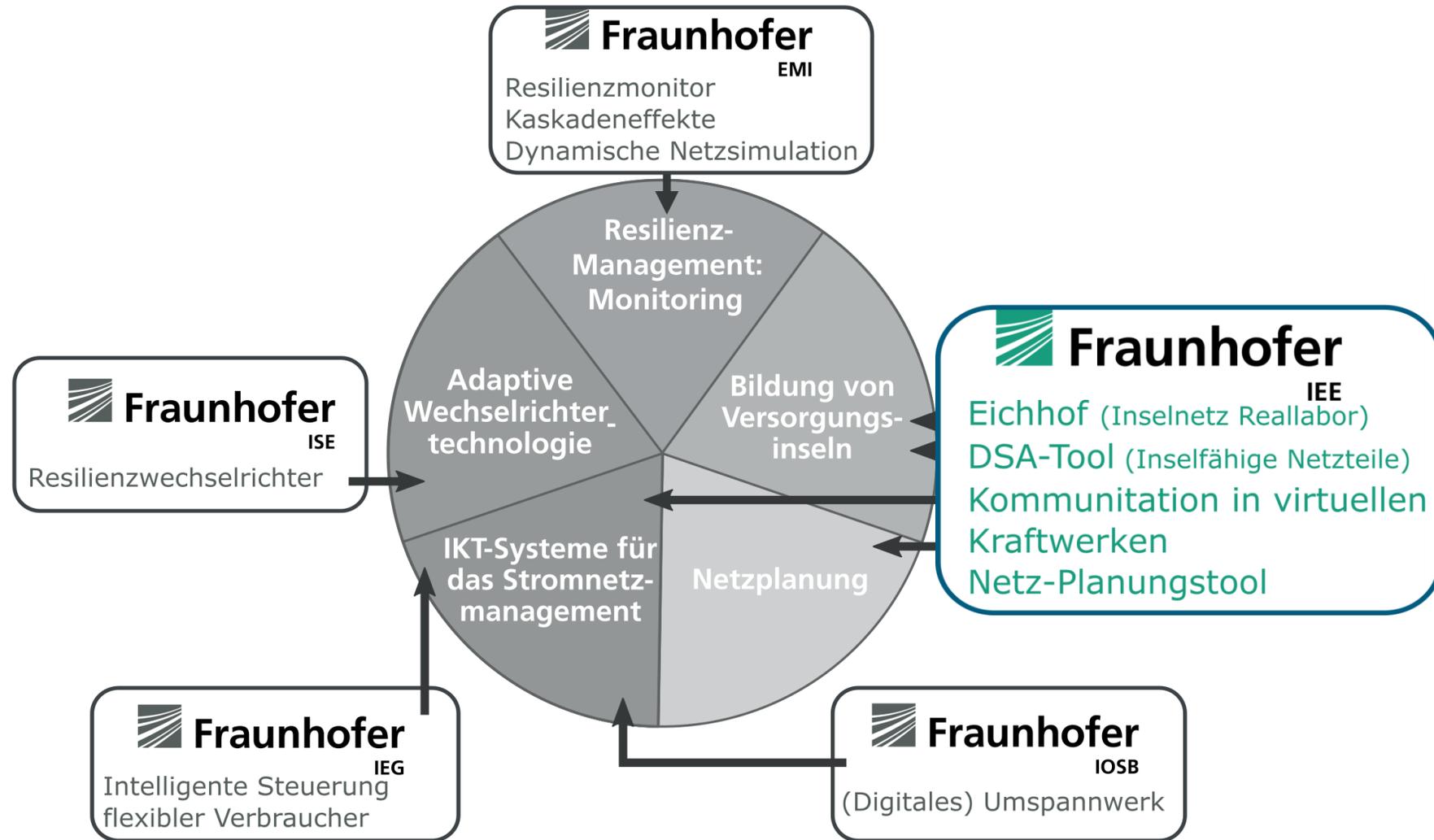
*****
Start demo: decentral NIDS for IEC 61850
Capturing: wireshark_eth1_20231129112715_attacked.pcapng
Packets: 225616
*****

```

Traffic Auswertung (NIDS)

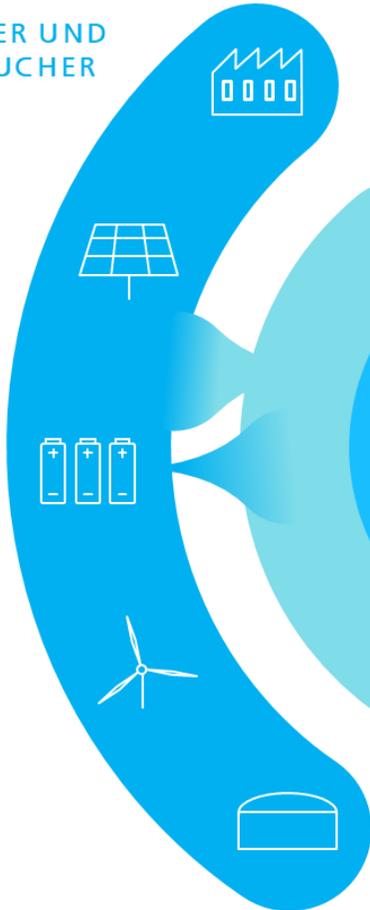


Ergebnisse IEE:



Virtuelles Kraftwerk

ERZEUGER UND
VERBRAUCHER



FEATURES
Aggregation
Visualisierung
Monitoring
Steuerung

ENERGY
CONNECT

IEC 104
OPC XML DA
PROFIBUS
Modbus, etc.
INTERFACES

EXTERNE
DATEN



Erzeugungsprognosen

Lastprognosen

TSO-Signale

Marktpreise

ZUSÄTZLICHE
MEHRWERTDIENSTE



Spotmarkt

Regelreserve

Blindleistung

Engpassmanagement

Virtuelles Kraftwerk

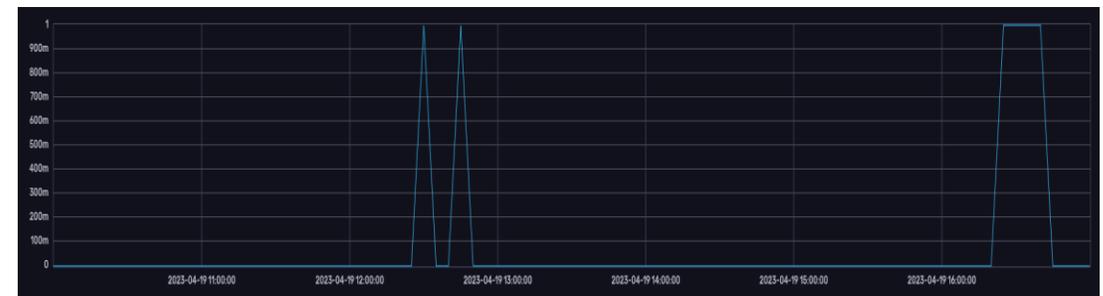
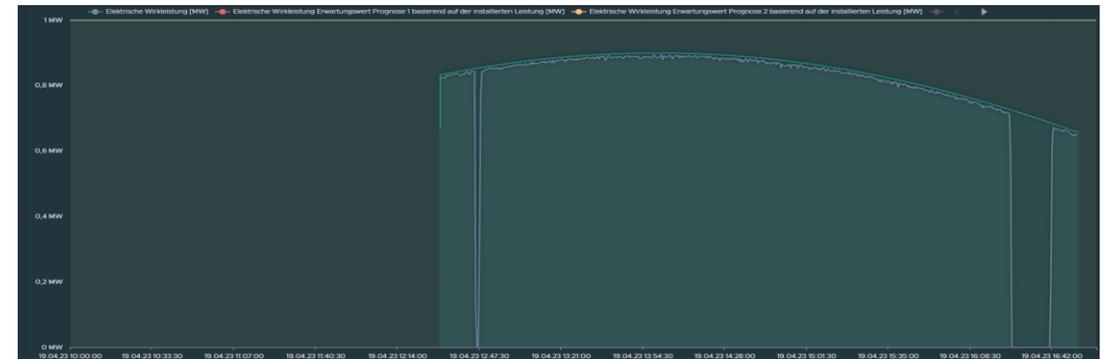
Kommunikation zwischen Resilienz-Monitor und virtuellem Kraftwerk

- **Erweiterung von Energy Connect um KPIs zur Resilienzbewertung**

- Anlagen mit fehlgeschlagener Steuerung
- Anlagen mit Störung in der Kommunikationsverbindung
- Kommunikationsverbindungen mit Störung
- Installierte elektrische Wirkleistung unter Störung
- Anlagen mit invalider elektrischer Wirkleistung
- Lebensdauer Indikatoren (DLCs)

- **Integration von ML basiertes Monitoring einzelner Energieerzeuger**

- Basiert auf Normalverhaltensmodellen
- Erkennt Anomalieen im Verhalten der Anlagen, diese können auf technische Störungen hinweisen



Virtuelles Kraftwerk

Kommunikation zwischen Resilienz-Monitor und virtuellem Kraftwerk

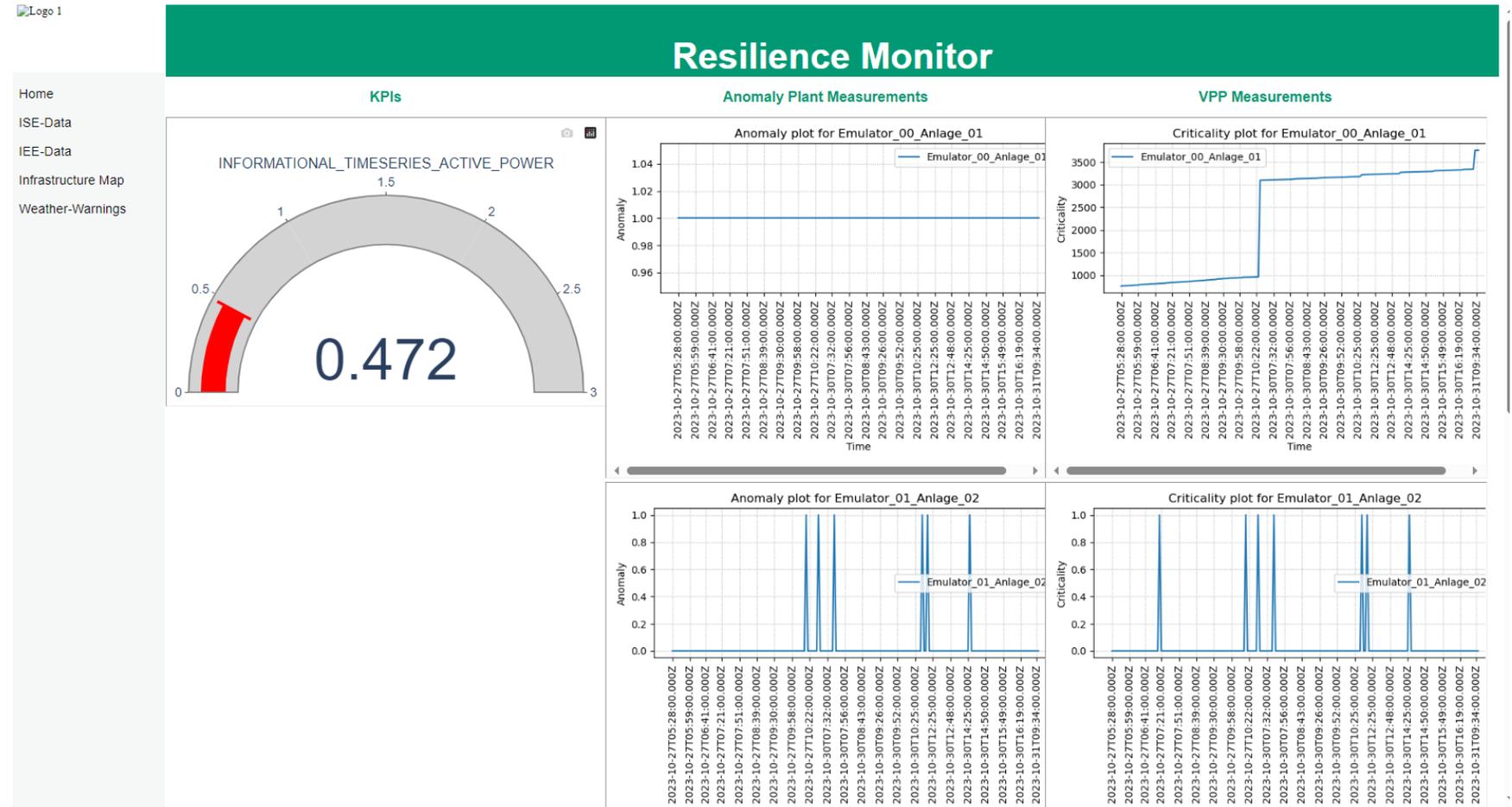
Erste Auswertungen konnten an den Resilienzmonitor übertragen werden

Positiv:

- Anomalieerkennung funktioniert und zeigt erste Anomalien für die Emulierten Anlagen

Herausforderung:

- Trainierten Modelle müssen auf möglichst normalem Verhalten lernen
- Falsch/Positiv – Rate ist ansonsten zu hoch

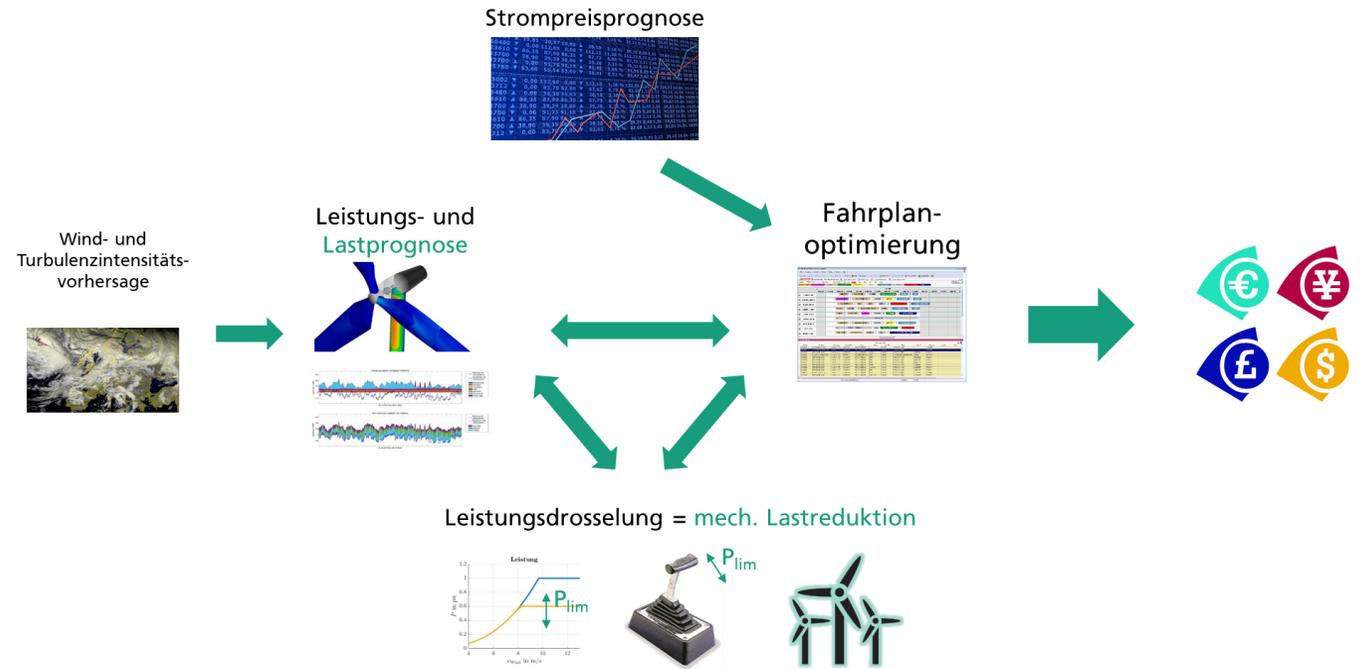
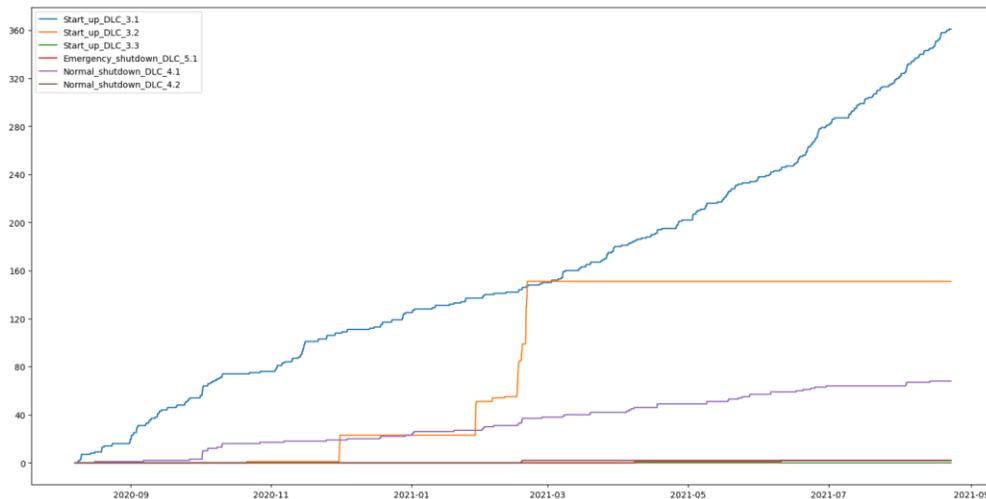


Virtuelles Kraftwerk

Kommunikation zwischen Resilienz-Monitor und virtuellem Kraftwerk

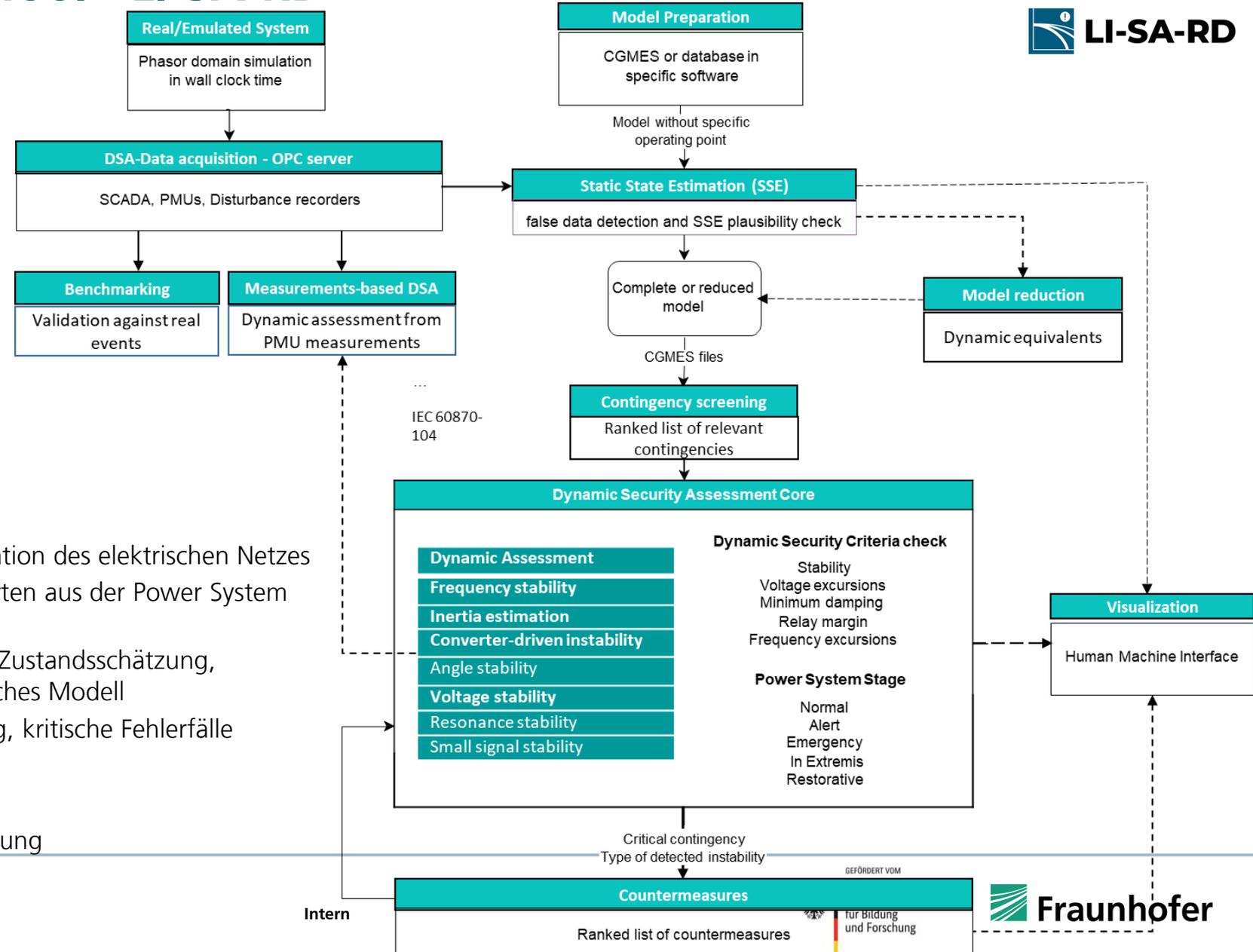
DLC's als Lebensdauerindikatoren:

- Ermöglicht die Ableitung von Restnutzungsdauern
- Sowie alternativer Regelstrategien (z.B. OTELLO-Projekt)



Das Fraunhofer IEE DSA-Tool - LI-SA-RD

- Modular aufgebautes System für die Forschung und Entwicklung der Verfahren für die dynamische Sicherheitsbewertung in stromrichter-dominierten Netzen
- Dynamische Netzsicherheitsanalysen inklusive RMS-Simulationen und stabilisierende Maßnahmen können für den Einsatz in der Systemführung erforscht und entwickelt werden
- Online Analyse der Systemstabilität
- Vorschläge für stabilisierende Maßnahmen



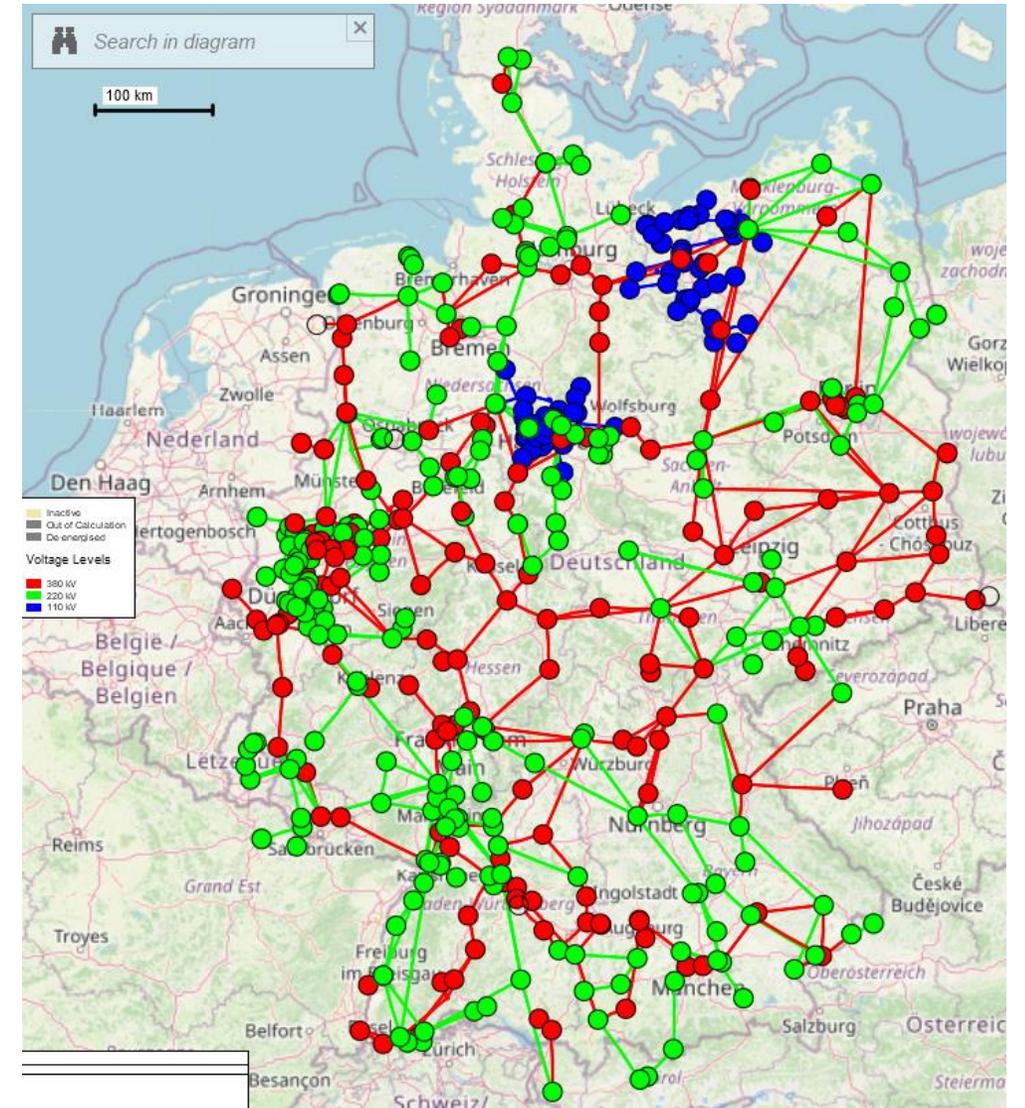
Aufbau

- Power System Emulation: Echtzeit-RMS Simulation des elektrischen Netzes
- DSA-Data Acquisition: Erfassung von Messwerten aus der Power System Emulation oder aus dem realen Netz
- Model preparation + SSE + Model reduction : Zustandsschätzung, Erstellung Lastflussmodell, Erstellung dynamisches Modell
- Contingency screening - Instabilitätserkennung, kritische Fehlerfälle
- D.S.A. Core: Netzsicherheitsbewertung
- Countermeasures: stabilisierende Maßnahmen
- Visualisation: Steuerung und Systemüberwachung

LI-SA-RD/RESIST Transmission network

- Das SIMBENCH [1] Übertragungsnetzmodell wurde implementiert und dynamisiert
- SIMBENCH dataset: 1-EHV-HV-mixed-all-0-sw.
 - 380 kV
 - 220 kV
 - 110 kV
 - 20 kV (und 400 V auch verfügbar)

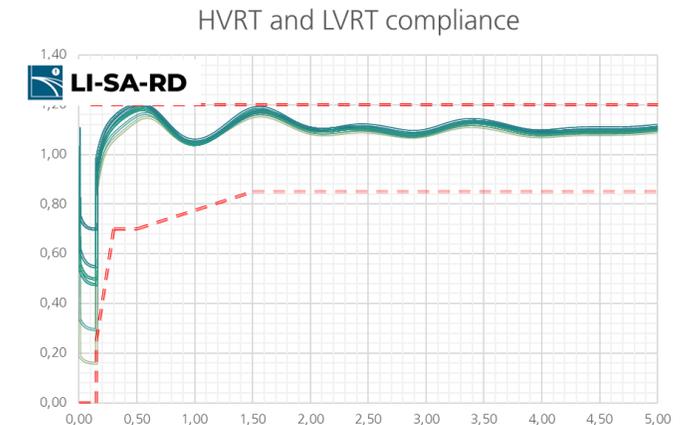
[1] <https://simbench.de/en/>



LI-SA-RD Stabilitätsindikatoren

- Im Rahmen des RESIST-Projekts wurden Tools für die Berechnung folgender Stabilitätsindikatoren implementiert [1], [2]
 - **Generator Angle Index (GAI):** der höchste Rotorwinkel unter den n_g Generatoren des Systems im Verhältnis zu einem maximal zulässigen Wert δ_{adm}
 - **Static Voltage Index (SVI):** Die maximale Spannungsabweichung unter den n_b Bussen des Systems im Verhältnis zu einem maximal zulässigen Wert Δv_{adm} .
 - **Damping Index (DI):** Die minimale Dämpfung ξ der M Systemmodi.
 - **Dynamic Generator Angle Index (DGAI):** Der maximale Rotorwinkel, der von den n_g SGs nach einem transienten Ereignis erreicht wird und bestimmt, wie nah die SGs daran sind, die Synchronität zu verlieren.
 - **Dynamic Voltage Index (DVI):** Analysiert die Überspannung nach einem transienten Ereignis.
 - **Critical Clearing Time (CCT):** Maximale Fehlererklärungszeit, bevor ein Generator die Synchronität verliert.
 - **Low Voltage Ride Through Konformität (LVRT):** Überprüft die LVRT-Konformität gemäß [2]
 - **High Voltage Ride Through Konformität (HVRT):** Überprüft die HVRT-Konformität gemäß [2]
 - **Loss of synchronism (Pole-slip):** Überprüft, ob SGs aufgrund von Kurzschlüssen die Synchronität verlieren.
 - **Voltage Sensitivity Index (VSI):** Überprüft die Änderung in U an den Übertragungsknoten, die durch $n-1$ Störungen oder geplante Schaltungen verursacht wird.
 - **Angle Sensitivity Index (ASI):** Überprüft die Änderung des Generatorwinkels, die durch $n-1$ Störungen oder geplante Schaltungen verursacht wird.

Details wurden in folgender Datei integriert: [Sammlung Störfälle Trigger Konzept EMI.xlsx](#)



[1] Stability and operation limits of power systems with high penetration of power electronics. Electrical Power and Energy Systems 138 (2022) 107728, 2021.

[2] FNN, VDE-AR-N 4130, Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Höchstspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Höchstspannung), 2018

LI-SA-RD Stromrichter-bedingte Instabilität

- Zusätzlich zu klassischen Stabilitätsphänomenen haben verschiedene Arten von Instabilitäten, die durch die Regelung von Wechselrichtern induziert werden, in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen [1].
- Besonders die Converter Driven Instability (CDI) hat die Aufmerksamkeit der Übertragungsnetzbetreiber (TSOs) auf sich gezogen, da sie sich in Form von ungedämpften Schwingungen in realen Systemen äußert, insbesondere während des Betriebs in schwachen Netzen.
- Die Bandbreite des Phasenreglers (PLL) wurde als primärer beitragender Faktor zu dieser Instabilität identifiziert.
- Die im Rahmen des RESIST-Projekts entwickelten DSA-Methoden berücksichtigen ebenfalls dieses Phänomen.
- Untersuchungen wurden zunächst am IEEE Nordic-System durchgeführt, bevor das SimBench EHV-Netzwerk betrachtet wurde.

[1] N. Hatziargyriou et al., "Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies," IEEE PES Technical Report PES-TR77, 2020.

LI-SA-RD Stromrichter-bedingte Instabilität

Bandbreite = 11.2 Hz

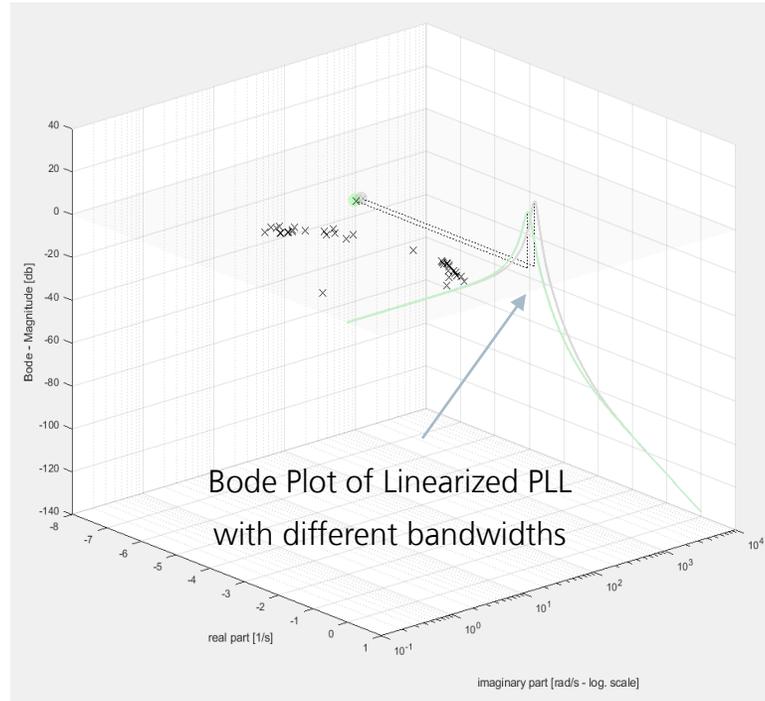
Bandbreite = 9 Hz

Bandbreite = 5.7 Hz

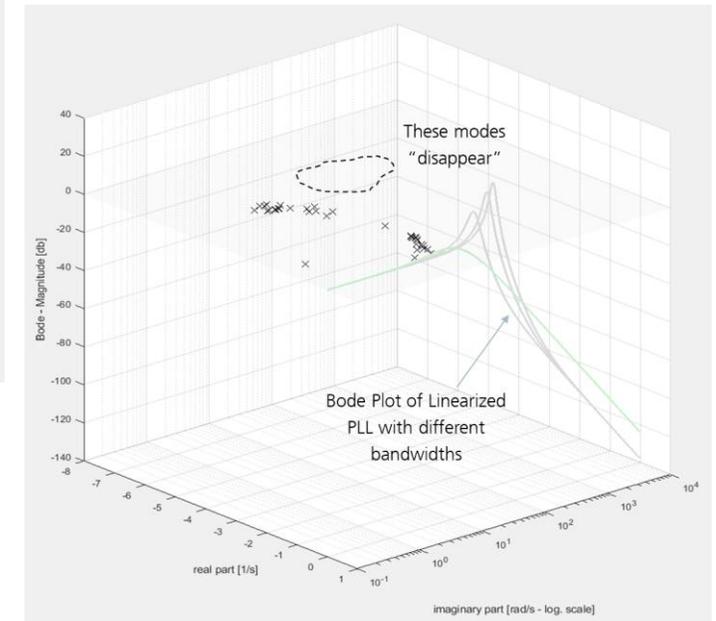
Bandbreite = 3.9 Hz

- Ähnlich wie bei einer GFM-Regelung.

- Die Reduzierung der PLL-Bandbreite "glättet" das Bode-Diagramm;
- Für eine Bandbreite von 9 Hz ist es deutlich zu erkennen, dass potenzielle Schwingungen stattfinden könnten.

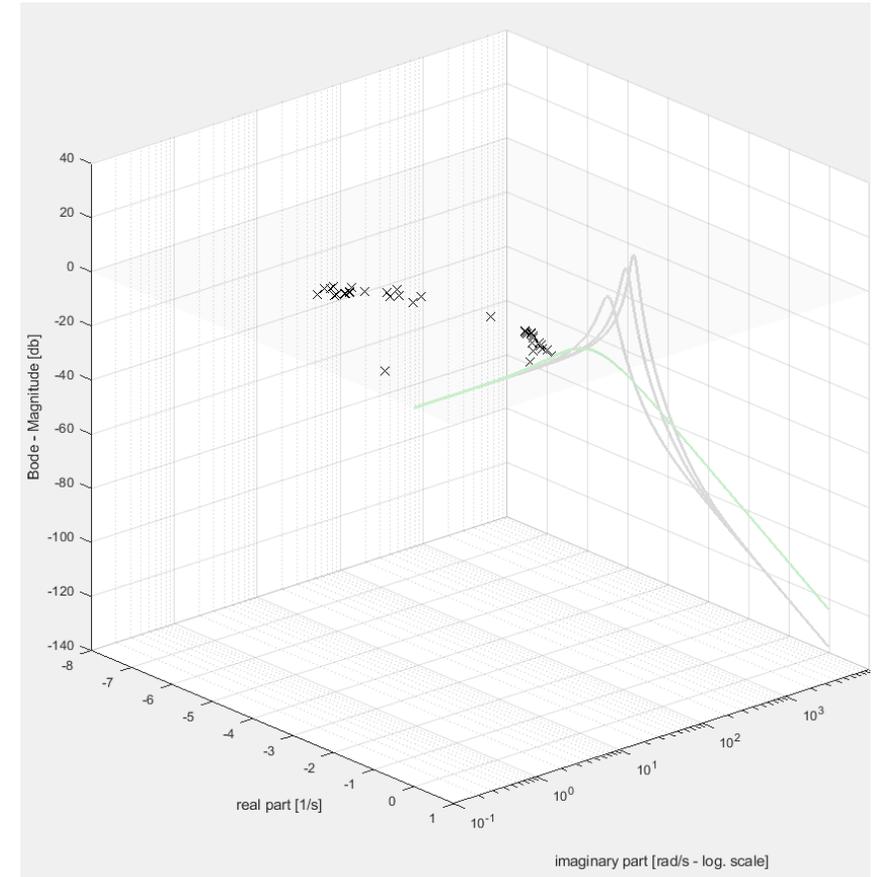


Veröffentlichung im Review: L. David Pabón Ospina and D. Ramasubramanian, "Grid-Forming and Grid-Following inverters: a dynamic performance evaluation using RMS, EMT and small-signal analysis," CIGRE Science & Engineering Journal, unpublished.



IEE-DSA-Arbeiten

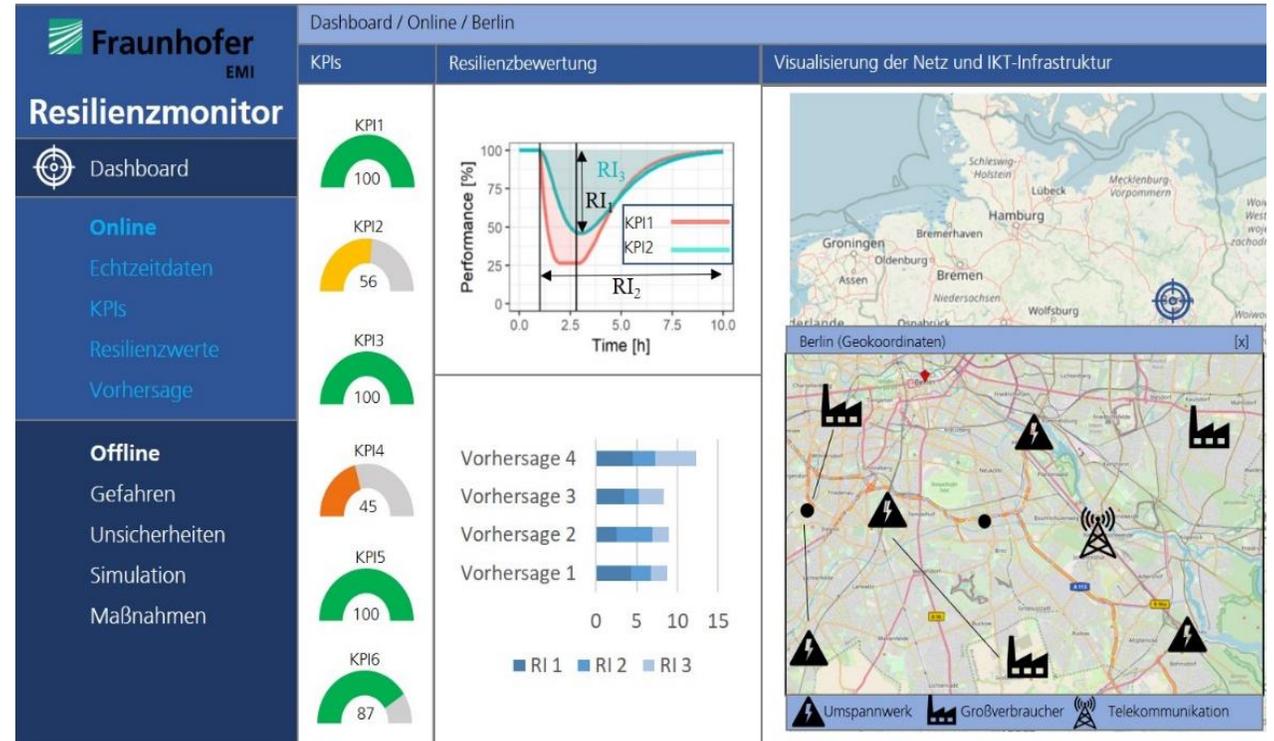
- Eine erste Version des dynamisierten SimBench EHV-Netzwerks wurde entwickelt und implementiert.
- Mehrere Stabilitätsindikatoren für die DSA wurden vorgeschlagen und implementiert.
- Die Skripte, die die Methoden zur Analyse der Stromrichter-bedingten Instabilität beinhalten, wurden im Rahmen der RESIST-Aktivitäten entwickelt.
 - Sie wurden in einfacheren Testsystemen getestet, wo das Erreichen niedriger Short-Circuit-Ratio (SCR)-Werte einfacher ist.
 - Sobald diese Methoden vollständig sind, werden sie im SimBench EHV-Netzwerk implementiert.
 - Wenn oszillierende Modi mit Frequenzen, die typisch für Stromrichter-bedingte Instabilität sind, und geringer Dämpfung (z. B. Dämpfungsverhältnis $< 10\%$) erkannt werden, kann ein Alarm an den Resilienzmonitor gesendet werden.
- Typische stabilisierende Maßnahmen umfassen:
 - Reduzierung der Generatorleistung.
 - Senkung der PLL-Bandbreite (NB: dies ist möglicherweise nicht als betriebliche Gegenmaßnahme umsetzbar und ist besser als präventive Maßnahme in der Planungsphase geeignet).
 - Netzausbau.



LI-SA-RD im Resilienzmonitor

Anwendung

- Dynamische Stabilitätsbewertung im Verbundnetz (dynamisierten Simbench HöS/HS/MS)
- Berechnung und Lieferung der Stabilitätsindikatoren
 - Generator Angle Index (GAI)
 - Static Voltage Index (SVI)
 - Damping Index (DI)
 - Dynamic Generator Angle Index (DGAI)
 - Dynamic Voltage Index (DVI)
 - Critical Clearing Time (CCT)
 - Low Voltage Ride Through compliance (LVRT)¹
 - High Voltage Ride Through compliance (HVRT)¹
 - Loss of synchronism (Pole-slip)
 - Voltage Sensitivity Index (VSI)
 - Angle Sensitivity Index (ASI)
- Berechnung und Lieferung der Alarmsignale bei der Erkennung Stromrichter-bedingter Instabilität



Schnittstelle für den Datenaustausch

- z.B. MQTT, KAFKA

¹ Laut FNN, VDE-AR-N 4130, Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Höchstspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Höchstspannung), 2018

Demonstrator Aufbau einer Versorgungsinsel / Resilienz-Modul im "Landwirtsch. Lernlabor" Eichhof, Bad Hersfeld / ländliche Notversorgung

Aufbau einer Versorgungsinsel (als Inselnetz-Reallabor)

Arbeitsschritte

- Hardware-Erweiterungen zur Umsetzung der Versorgungsinsel
 - Beschaffung und Installation (verzögert / in Umsetzung)
- Parallel: Modellbildung / Simulation des Betriebs der Insel
 - Verbrauch / Erzeugung bilanziert
 - Lastsprünge (u.a. durch Anfahren großer Lasten) untersucht und Maßnahmen vorgeschlagen (Lastmanagement, Einsatz BESS)
 - Schutzkoordination für Verbund- und Inselbetrieb

Untersuchungsszenario

- Netzausfall/Schwarzfall (Koordination / Warnung über Resilienzmonitor)
- Netztrennung an Trafostation & Umschalten auf Inselnetzbetrieb am netzbildenden BHKW
- Wiederanfahen / Hochfahren der Insel

Variante: Unterstützung durch Batterie-Speicher (BESS)



Quelle: Fraunhofer IEE, HBFZ Eichhof, B. Krautkremer

Überblick Versorgungsinsel Landwirtschaft

Strategietool

Bestimmung der Performanz von Netzen unter Extremereignissen

- Mehrfachausfälle
 - Mehrere verteilte Leitungen
 - Ganze Trasse
 - Ganzes Umspannwerk
- Kommunikationsausfall
 - Möglichkeit zu Enspeisemanagement/Redispatch fällt weg

- Ermittlung der Kritikalität von Komponenten

Bestimmung des Potenzials für Inselnetzbetrieb

- Teilnetzfähigkeit
- Nutzen vorhandener Speicher (ohne Beeinträchtigung des Geschäftsmodells)
- Mehrwert durch explizite Reserven

Kritikalitätsbewertung von Komponenten

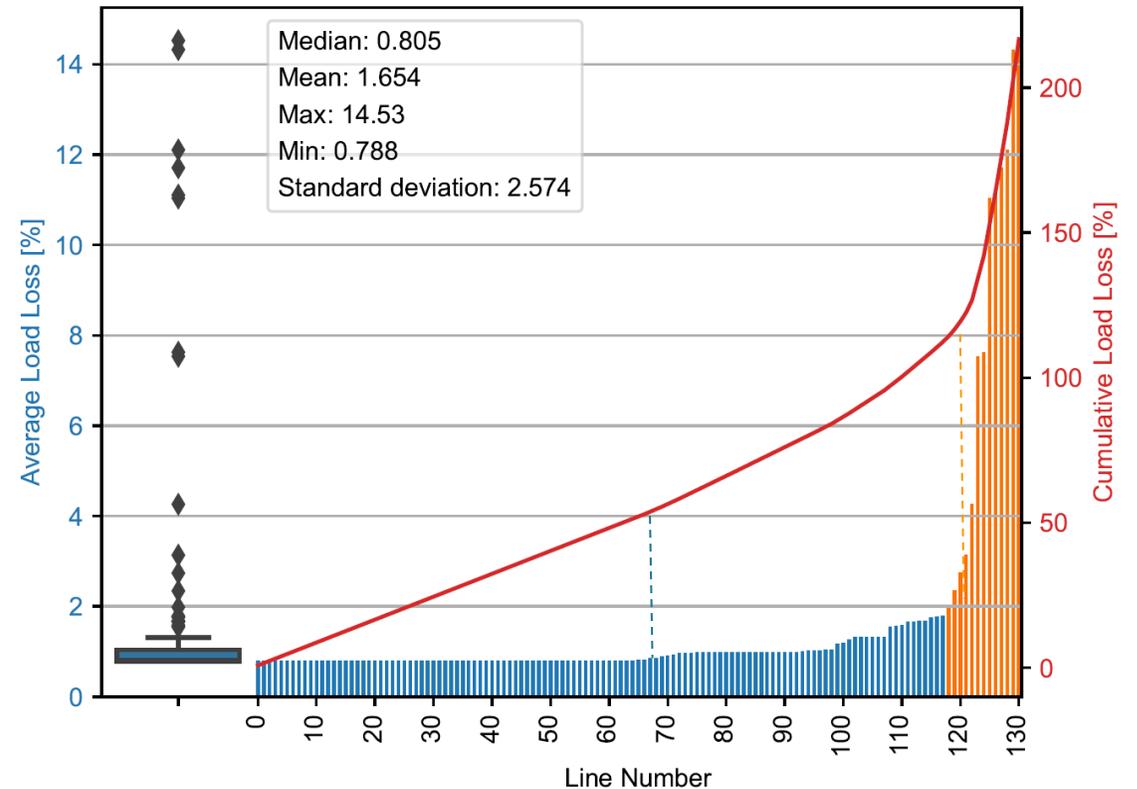
Beispiel: Leitungen bei Mehrfachausfall

Bewertung der Kritikalität von Leitungen anhand der durchschnittlichen Versorgungsunterbrechung bei Doppelfehlern, die einen Ausfall dieser Leitung enthalten:

- Die 50% "unwichtigsten" Leitungen sind bei etwa einem Viertel des gesamten erwarteten Ausfalls beteiligt
- Die Hälfte des erwarteten Ausfalls entfällt auf Kombinationen, die mindestens eine der 10% "wichtigsten" Leitungen beinhalten

Ausgehend für Bewertung nach Resilienzgewinn durch besonderen Schutz (Härtung, Wartung, Vegetationsmanagement): Gewichtung nach Leitungskilometern

Ansatz grundsätzlich übertragbar auf Ausfälle von Trassen, Umspannwerken etc.



Average load loss distribution and cumulative load loss

Kritikalitätsbewertung von Einspeisemanagement/Redispatch

Beispiel: Ausfall der Abregelbarkeit von Wind/PV

Annahmen:

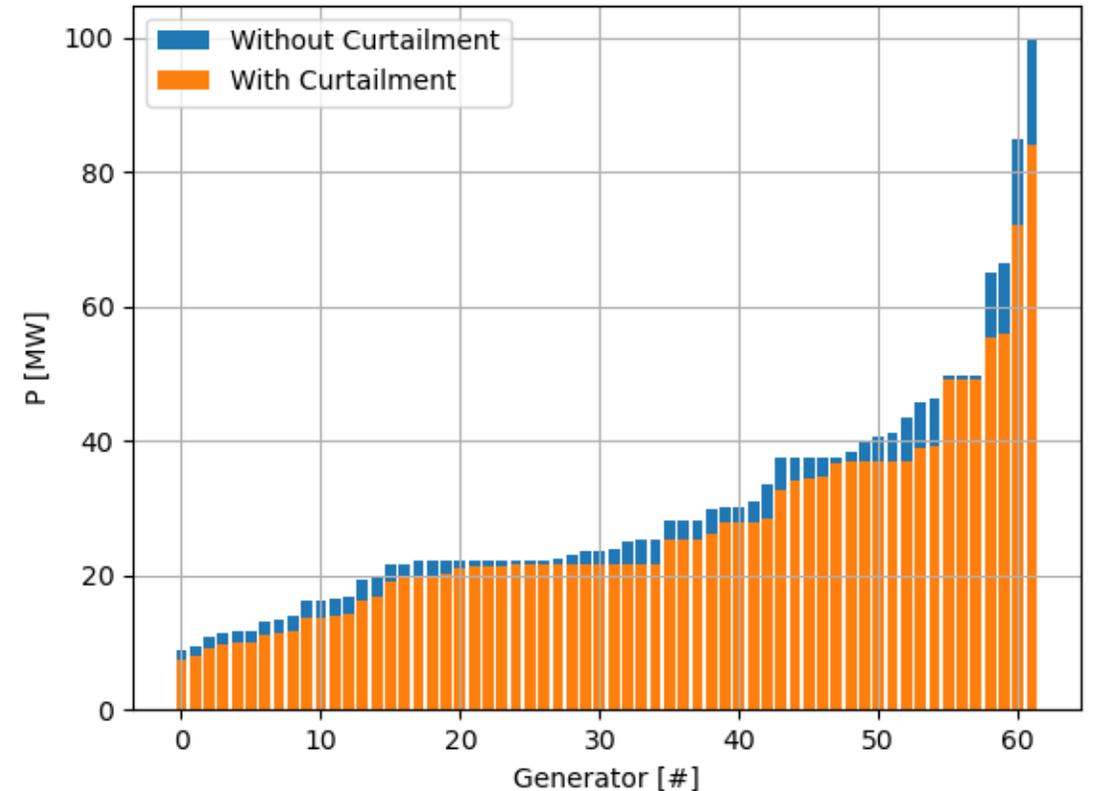
- Bei der Netzplanung wurde Spitzenkappung (nach 3%-Kriterium) berücksichtigt
- Planung wird anhand ermittelter Lastfälle durchgeführt, Reduktion der Rückspeisespitze von 1,85 GW auf 1,66 GW
- Zu einem auslegungsrelevanten fällt diese Eingriffsmöglichkeit weg

Datengrundlage:

- HV-Netz und Zeitreihen aus SimBench

Ausstehend für Bewertung nach Resilienzgewinn durch besonderen Schutz (Härtung, Wartung, Vegetationsmanagement): Gewichtung nach Leitungskilometern

Differenzierung nach Kommunikationstechnologie und/oder Anlagen möglich



Generatorleistung im Beispielfall

Kritikalitätsbewertung von Einspeisemanagement/Redispatch

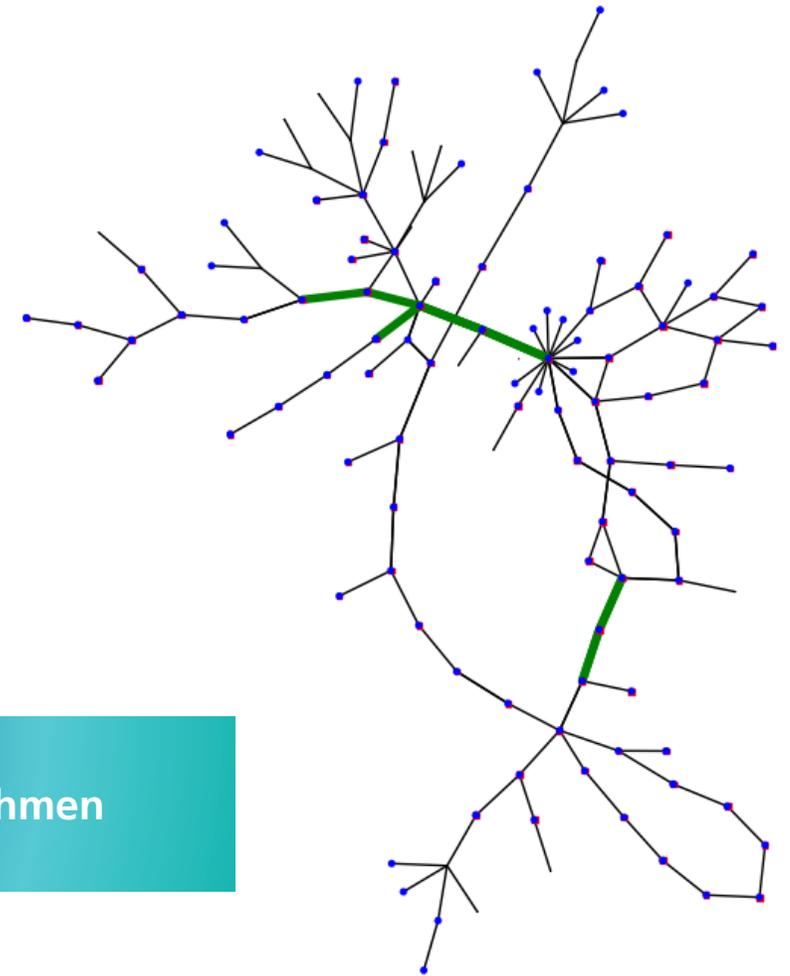
Beispiel: Ausfall der Abregelbarkeit von Wind/PV

Ausgangssituation

- Das Netz wurde ursprünglich ausgelegt für ~500 MW Last und Erzeugung
- Im Szenario wirken max. 709 MW Last und 1853 MW Einspeisung bzw. 1664 MW unter Berücksichtigung von SpiKa
- Zur Netzplanung werden vereinfachend nur Verstärkungsmaßnahmen modelliert (keine gänzlich neuen Trassenverläufe oder alternative Umspanner zur NE1)

Ergebnis

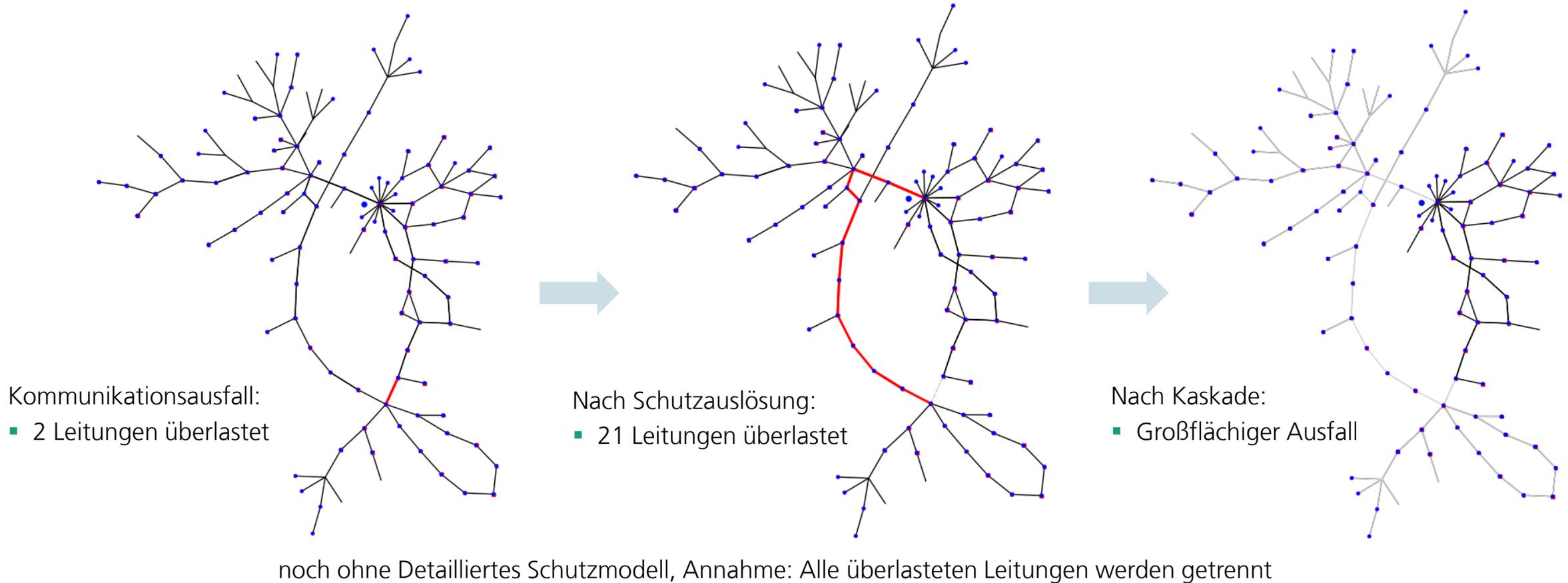
- Verstärkung von 13 Leitungen auf 64 km bei 1182 km Netzlänge (in Grafik grün markiert)



Ermittelte Ausbaumaßnahmen

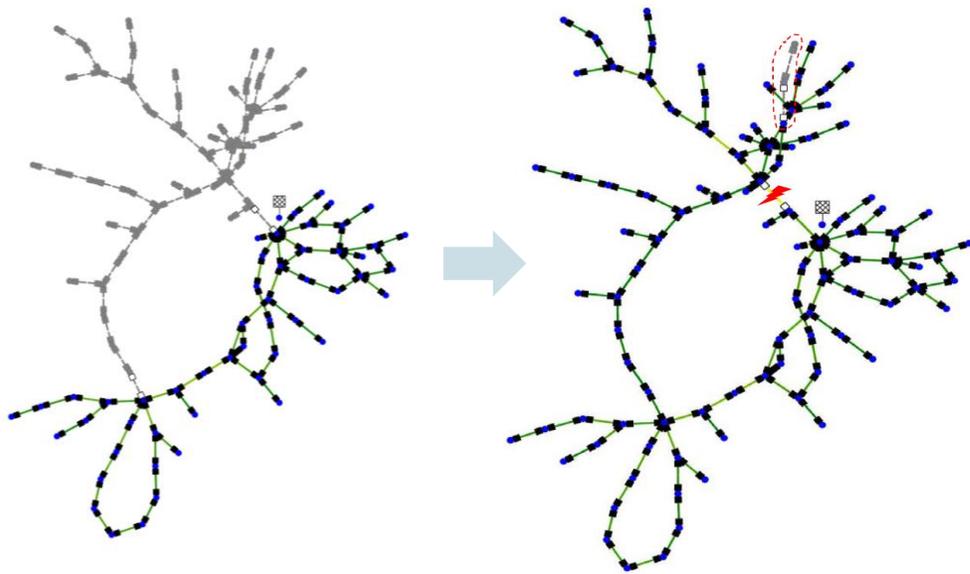
Kritikalitätsbewertung von Einspeisemanagement/Redispatch

Beispiel für Kommunikationsausfall zu einspeisestarkem Zeitpunkt: Kaskade von Überlastungen



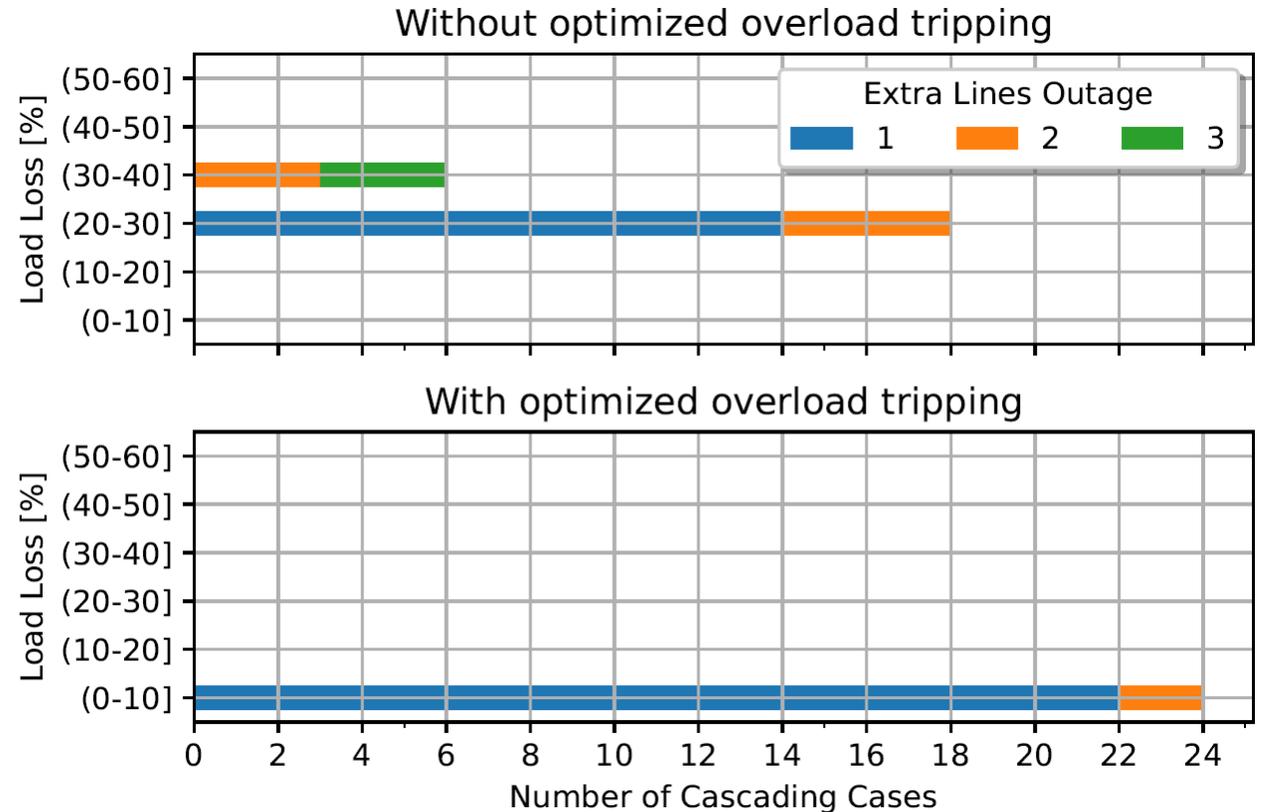
Fallstudie: Schadensbegrenzung bei kaskadierender Schutzauslösung

Results: With the Proposed Solution



Verbesserung des Lastverlustes:

Im Beispiel bleiben statt 34% bei unkontrollierter Kaskade noch 2.4% unversorgte Last

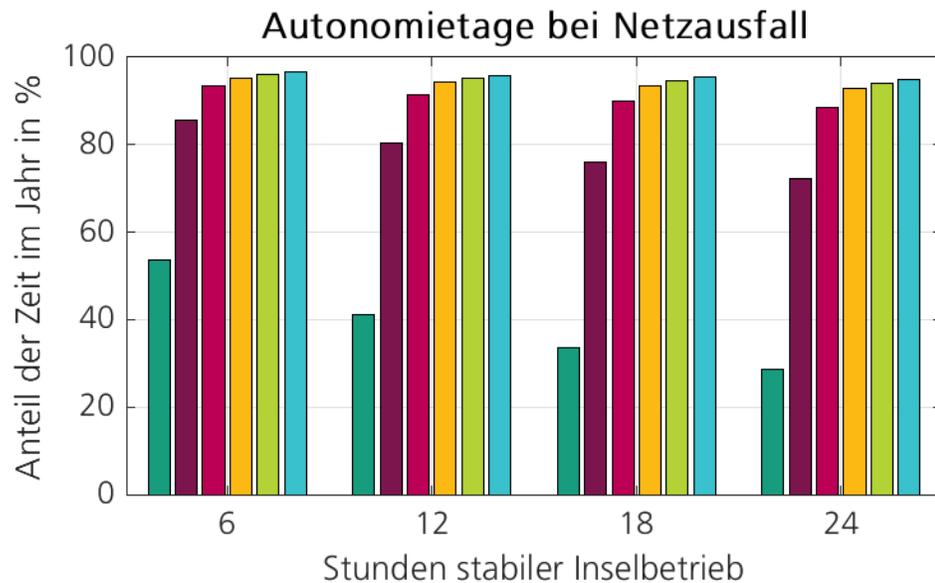


Lastausfall für alle Doppel-Leitungsfehler im Netz

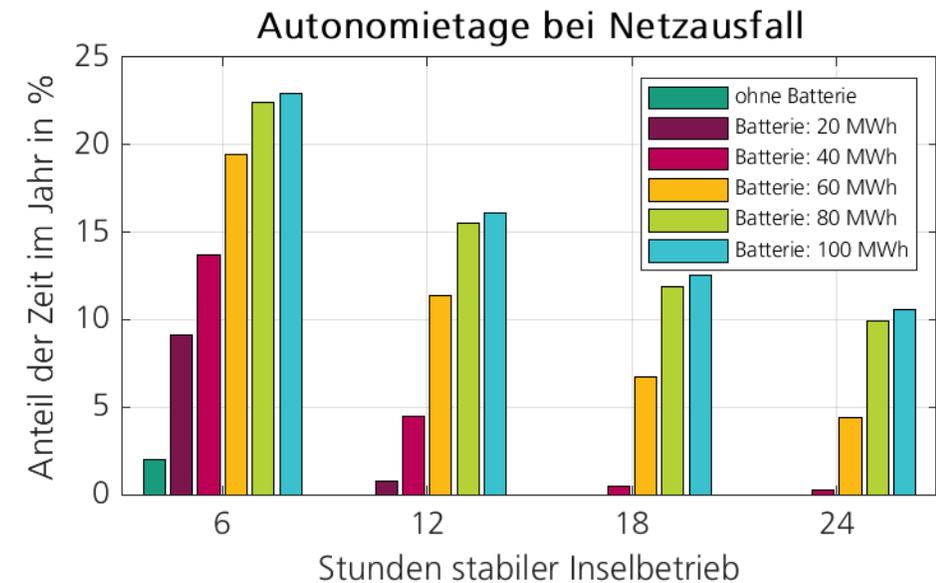
Bestimmung des Potenzials für Inselnetzbetrieb

Dimensionierung von Speichern

Beispielhafte Analyse ländliches Netz

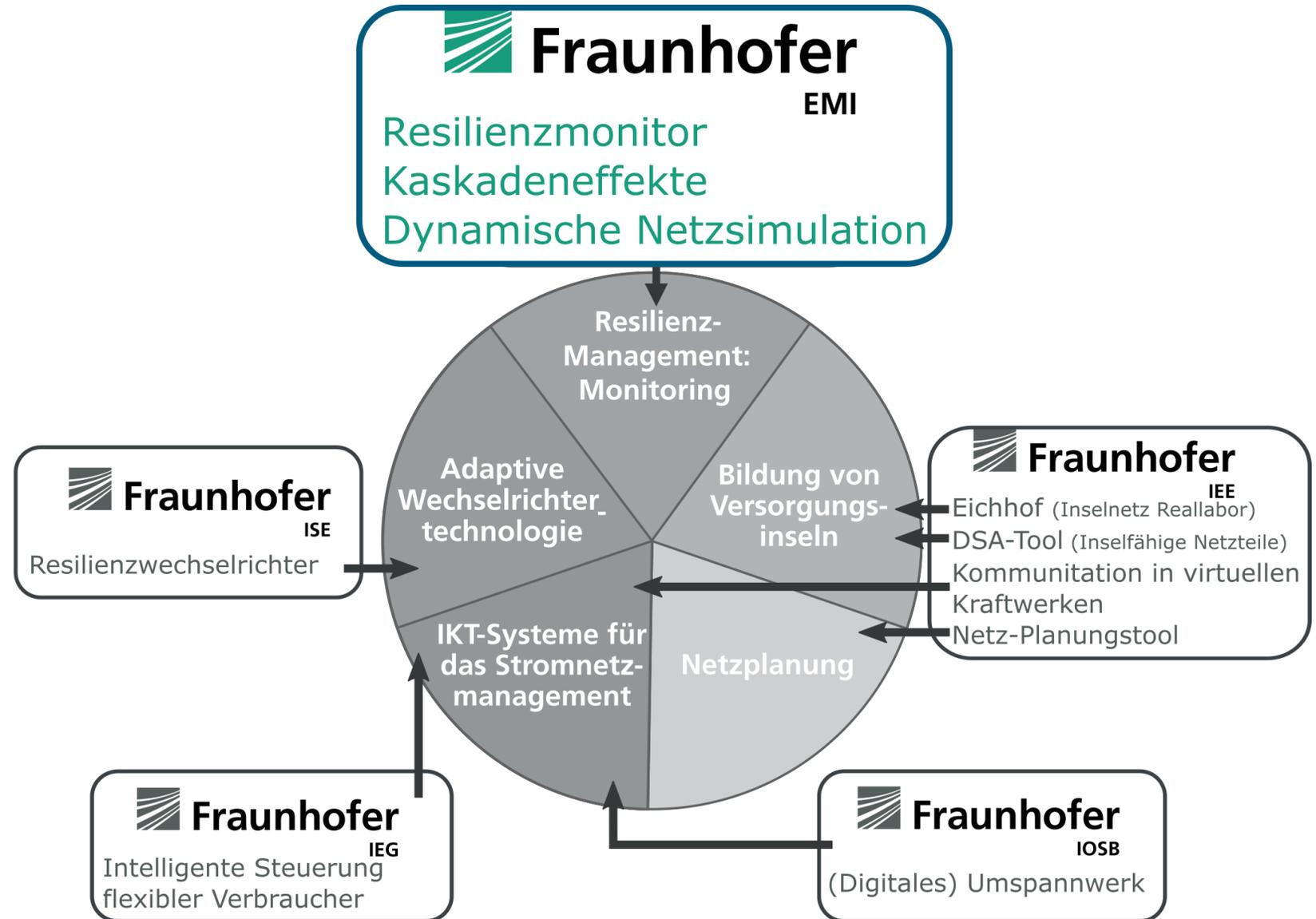


Beispielhafte Analyse Stadtnetz



Übersicht Ergebnisse EMI:

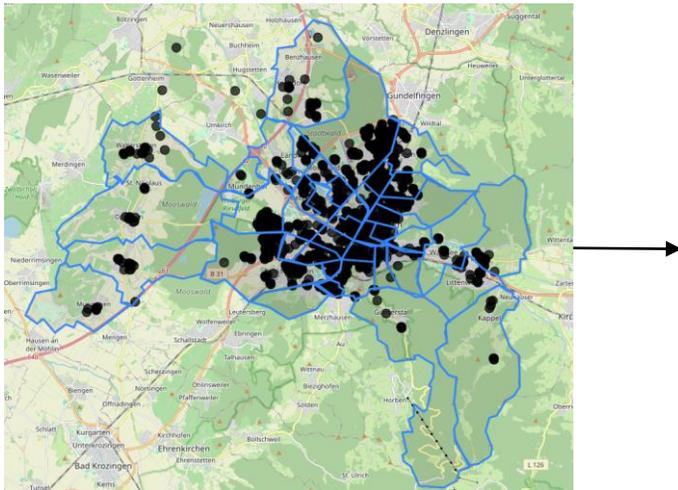
- Kaskaden kritischer Infrastruktur bei Stromausfall
- PyDyn - Dynamische Netzsimulationen
- Echtzeitmonitoring mit dem R-monitor



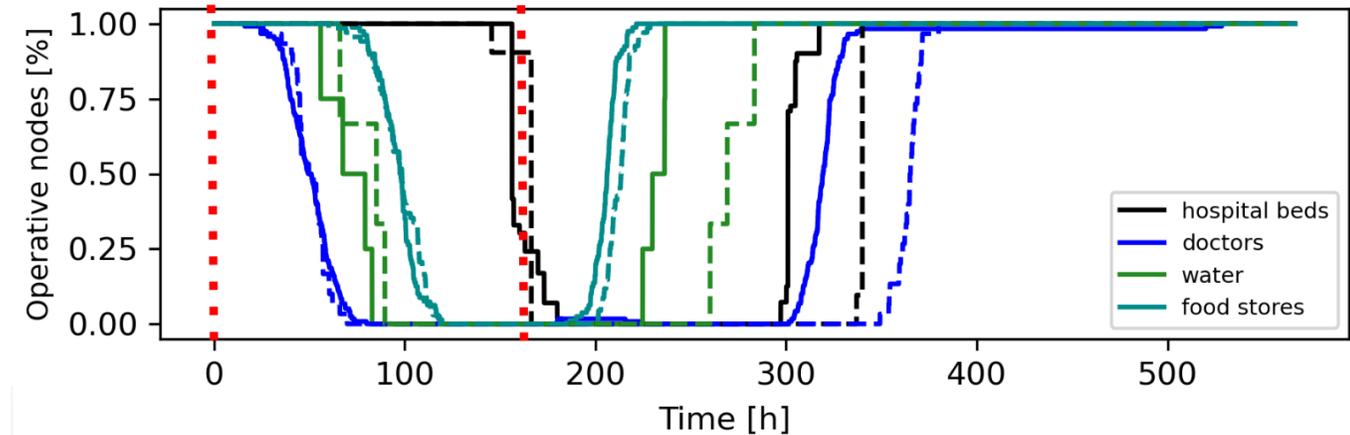
Resilienz-Monitor

Kaskaden in einem Netzwerk kritischer Infrastrukturen werden mit CaESAR-Tool sichtbar gemacht

Ausgangspunkt



Resultat



Resilienz-Monitor

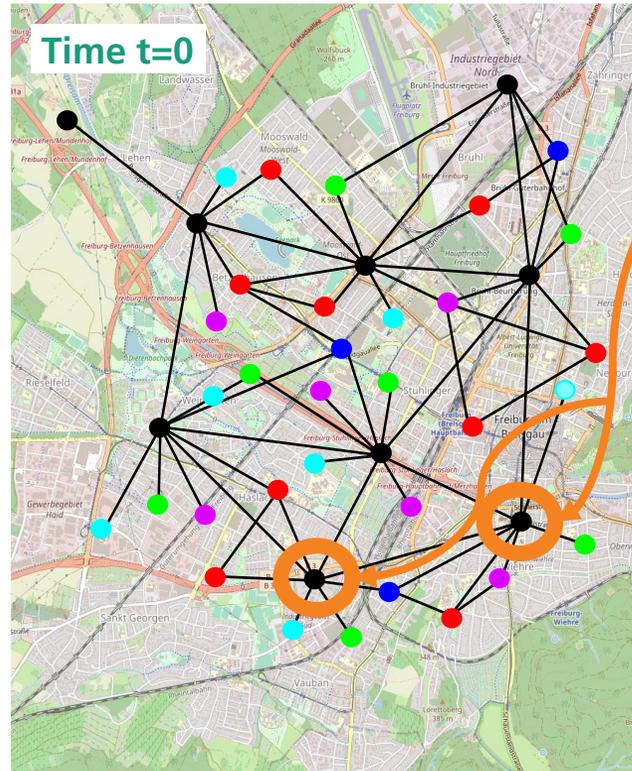
Kaskaden in einem Netzwerk kritischer Infrastrukturen werden mit CaESAR-Tool sichtbar gemacht

Funktionierend

- Strom ●
- Transport ●
- Gesundheit ●
- Nahrung/Wasser ●
- Finanzen ●
- Kommunikation ●

Beschädigt

- Strom ●
- Transport ●
- Gesundheit ●
- Nahrung/Wasser ●
- Finanzen ●
- Kommunikation ●

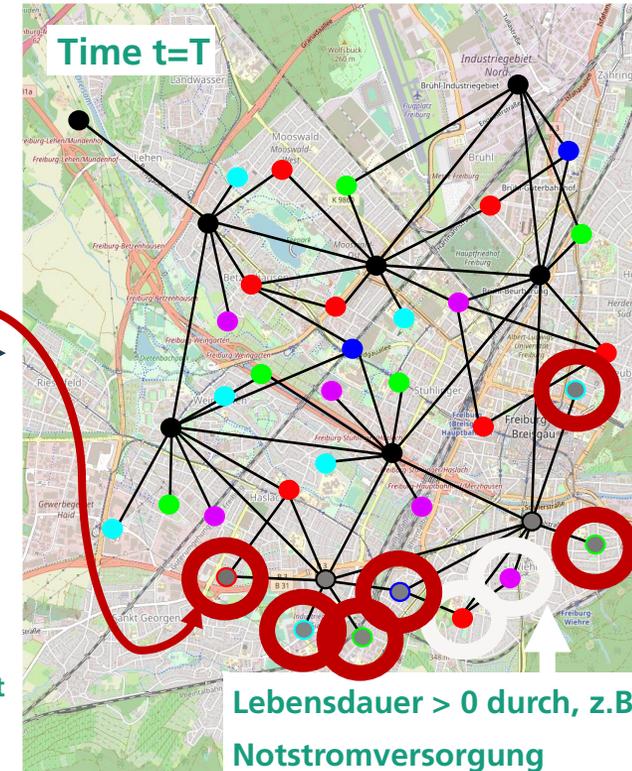


Stromnetz
beschädigt

Ausfallkaskade

Parameter:

- Abhängigkeiten (Netzwerkkannten)
- Lebensdauern
- Reparaturdauern
- Wahrscheinlichkeit Schadenskaskadierung



Lebensdauer > 0 durch, z.B.
Notstromversorgung

Ausfallkaskaden hängen von Abhängigkeiten aber auch von Lebens- und Reparaturdauern ab

Resilienz-Monitor

Kaskaden in einem Netzwerk kritischer Infrastrukturen werden mit CaESAR-Tool sichtbar gemacht

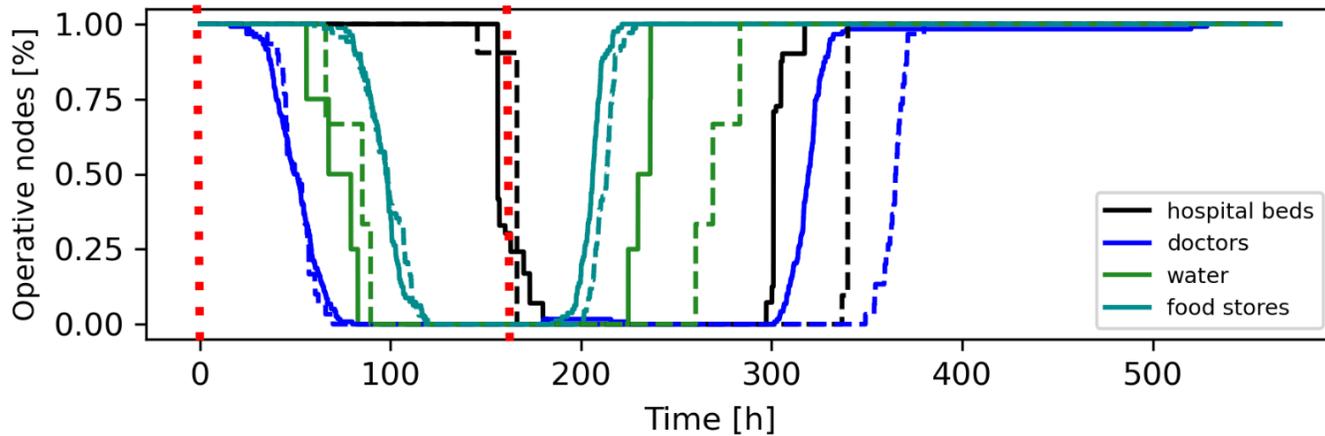
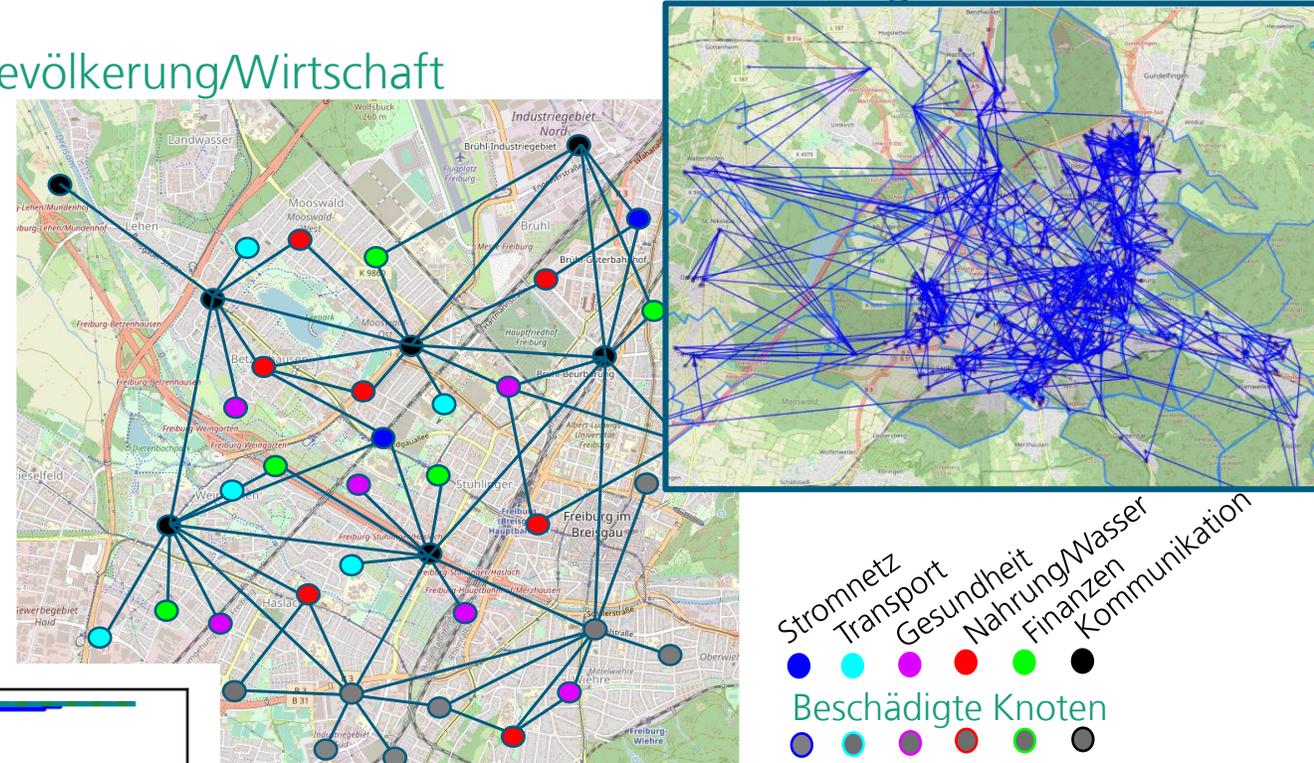
Einfluss von Stromausfällen auf kritische Infrastruktur/Bevölkerung/Wirtschaft wird simuliert

- Kritische-Infrastruktur-Netzwerk-Model für Freiburg

→ Open-Street-Map

- Lebensdauern & Reparaturzeiten

→ T. Petermann „Was bei einem Blackout geschieht“, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, 2011



Das Szenario

- Großflächiger Blackout [~1 Woche]
- Sukzessiver Verlust verschiedener Infrastrukturbereiche

PyDyn – Dynamische Netzsimulation

EMI-Inhouse-Code - Entwickelt während Projektlaufzeit

Eckdaten der Implementierung

- Inhouse-Code implementiert in Python (Aufbauend auf MatDyn)
- Zeitbereichssimulation mit Separation differentieller und algebraischer Gleichungen
- Einbindung von PandaPower zur Lastflussberechnung
- Einphasige Ersatzschaltbilder (Symmetrieannahme bzgl. der Phasen)
- Lineare Netzgleichungen
- Explizite Zeitintegration (Heun-Verfahren)
- Modellierung der wichtigsten Betriebsmittel
 - Leitungen/Kabel,
 - Transformatoren,
 - Synchrongeneratoren mit GOVs, AVR, UELs und PSS
 - Lasten

Model zur Abbildung von konventionellen Erzeugern

Generator Machine Model 1.1

Machine with solid round rotor

TURBINE – IEEEG1

IEEE Type 1 Speed-Governing Model

Power System Stabilizer – STAB1

SPEED Sensitive Stabilizing

EXCITER – DC1A

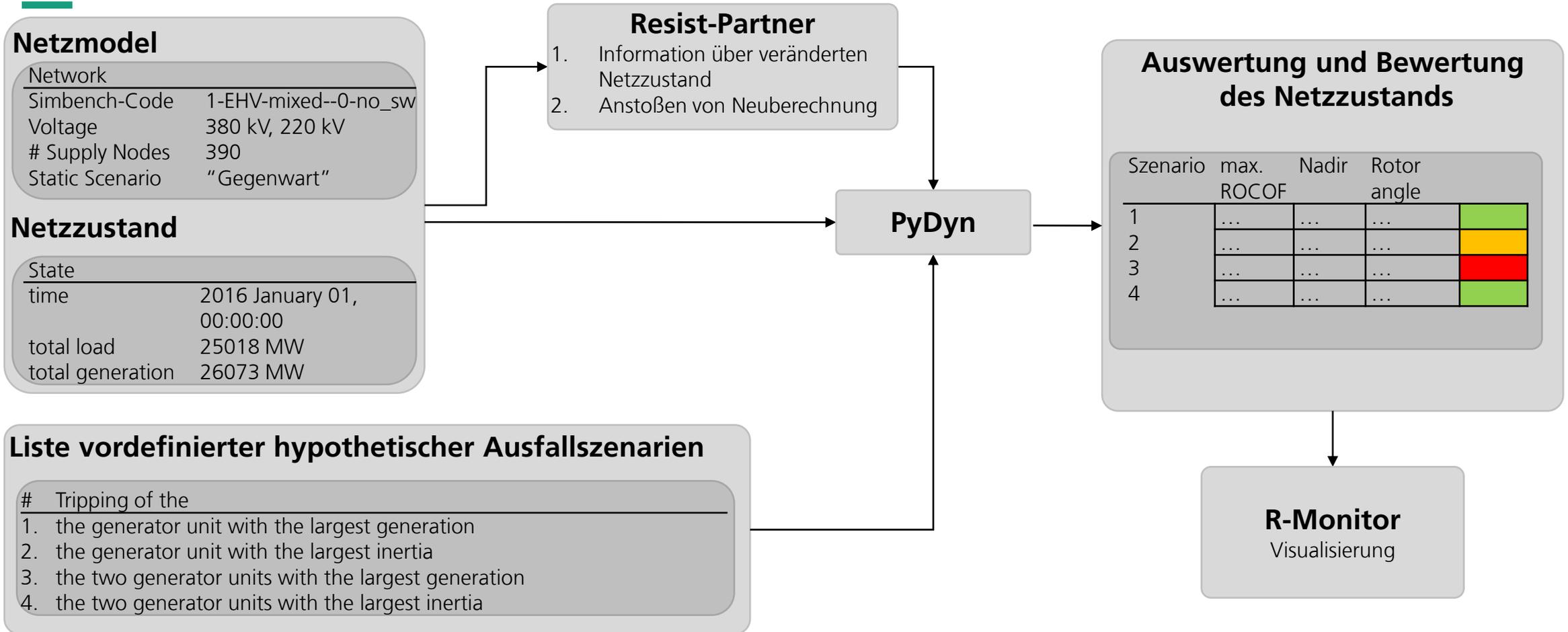
IEEE Type DC1A Excitation System

Under Excitation Limiter - UEL1

IEEE Type UEL1
Model

PyDyn – Dynamische Netzsimulation

Integration im RESIST-Projekt



PyDyn – Dynamische Netzsimulation

Kopplung mit QGIS – ein freies geographisches Informationssystem

- Graphische Benutzeroberfläche
- Topologie-Spezifizierung
- Parametereingabe
- Ergebnisvisualisierung

The image displays several overlapping windows from the PyDyn software interface, which is used for dynamic power system simulation. The windows include:

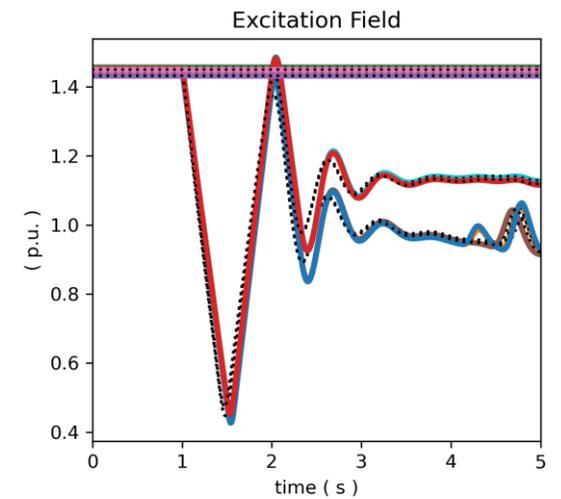
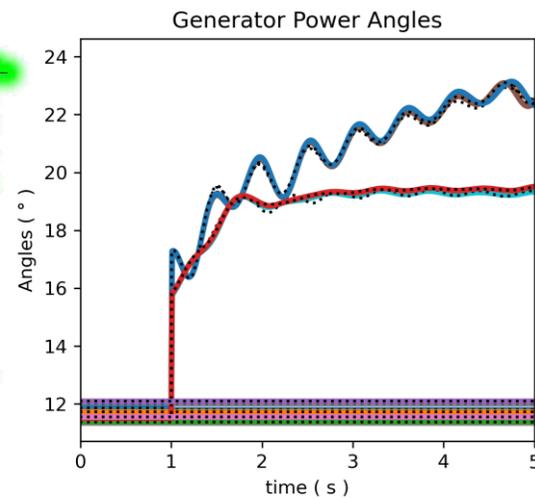
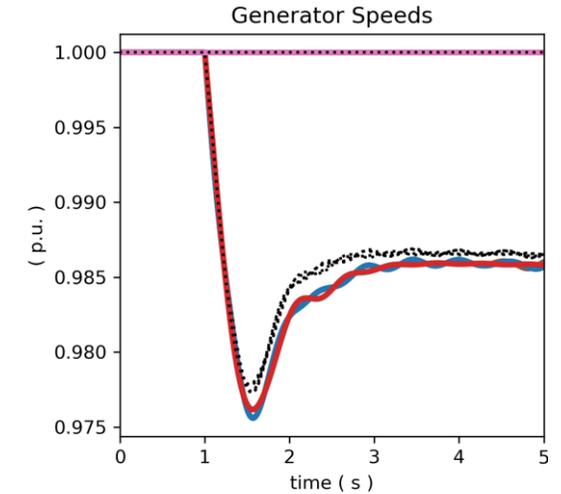
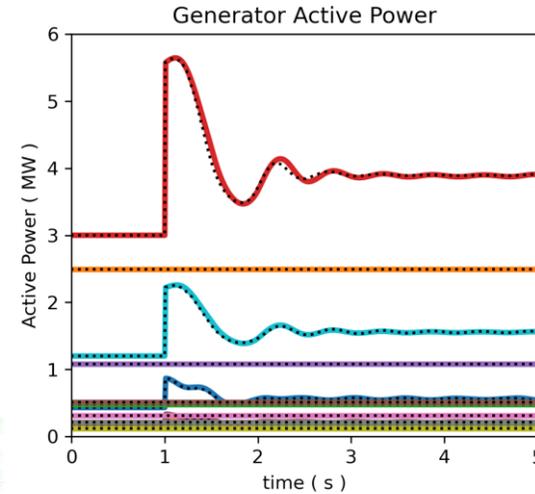
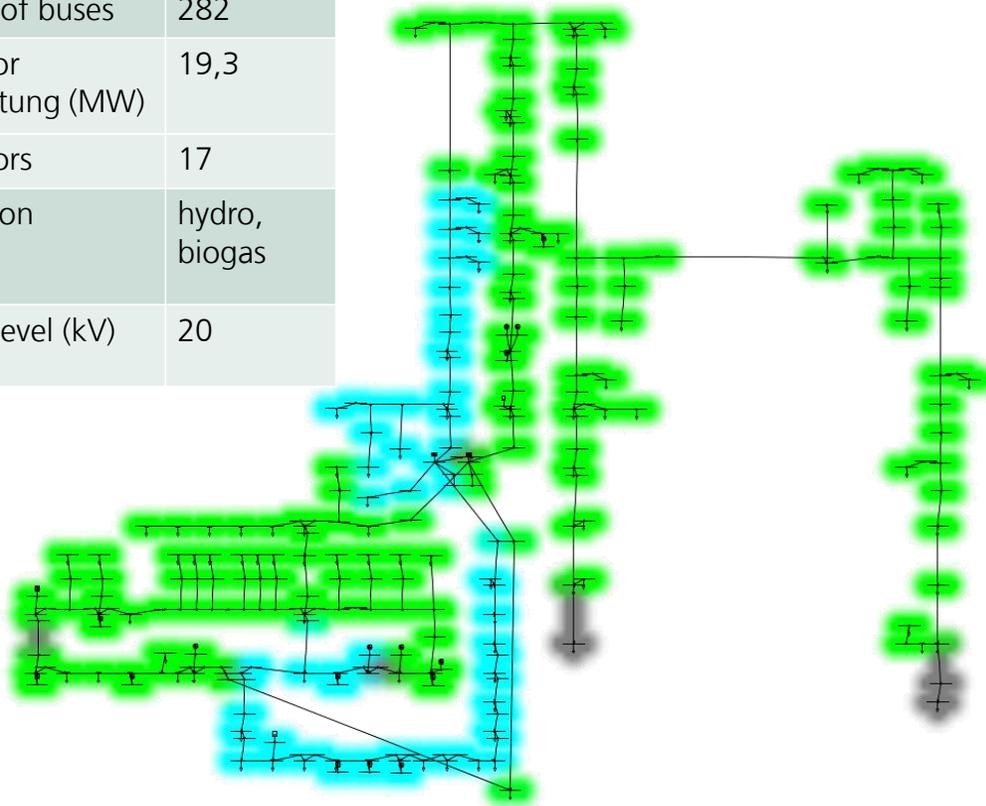
- Bus Properties:** Configuration for bus parameters such as Type (PV-Node), Active Power Demand, Reactive Power Demand, Shunt Conductance, Shunt Susceptance, Bus Area, and Voltage Magnitude.
- Static Generator Properties:** Configuration for power flow parameters, including Active power generator output (85,000000000 MW) and Reactive power generator output (-10,9500000000 MVar).
- Dynamic Generator Properties:** Configuration for dynamic generator parameters, including Generator Model Type (Fourth Order Model), Exciter Model Type (IEEE DC1A), Governor Model Type (General Speed Governor), and various time constants and coefficients.
- Under Excitation Limiter Properties:** Configuration for the UEL controller, including Radius setting, Center setting, Excitation system stabilizer gain, and various limits and gains.
- Exciter Properties:** Configuration for the exciter controller, including Major regulator gain, Major regulator time constant, Exciter gain, and various time constants and gains.
- Governor Properties:** Configuration for the governor, including Droop, Time Constant, Servo Motor Time Constant, and Maximum Valve Opening/Closing Speed.
- Controller Block Diagrams:** Two diagrams showing the internal structure of the exciter and governor controllers, with transfer functions and feedback loops.
- Generator_Result - Objektattribute:** A window displaying simulation results, including parameters like P_g (2940,700000000) and Q_g (247,6250935887).
- Genzbelastungsdiagramm:** A graph showing the power limit diagram (P-Q diagram) with a red curve representing the operating region. The diagram includes labels for 'Betrieb' (operation) and 'Nennbetrieb' (rated operation).

PyDyn – Dynamische Netzsimulation

Verifikation der RMS-Simulations-Funktionalität gegen DiGSILENT PowerFactory 2023

Testfall: Inselfallen eines Verteilnetzegebiets

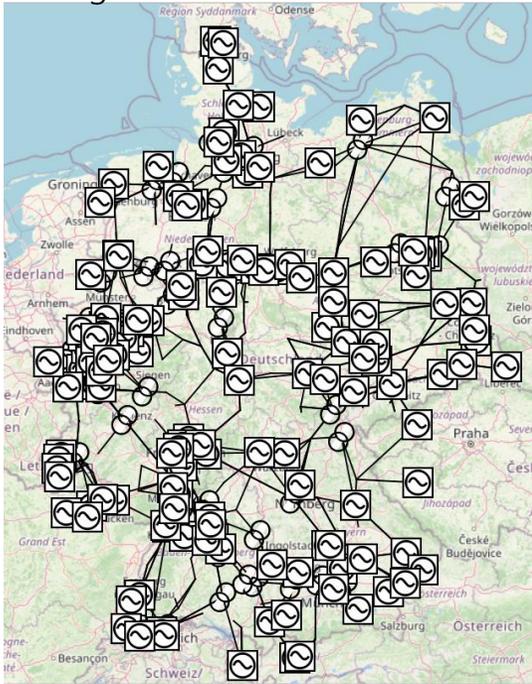
Eckdaten	
Number of buses	282
Generator Nennleistung (MW)	19,3
Generators	17
Generation	hydro, biogas
Voltage level (kV)	20



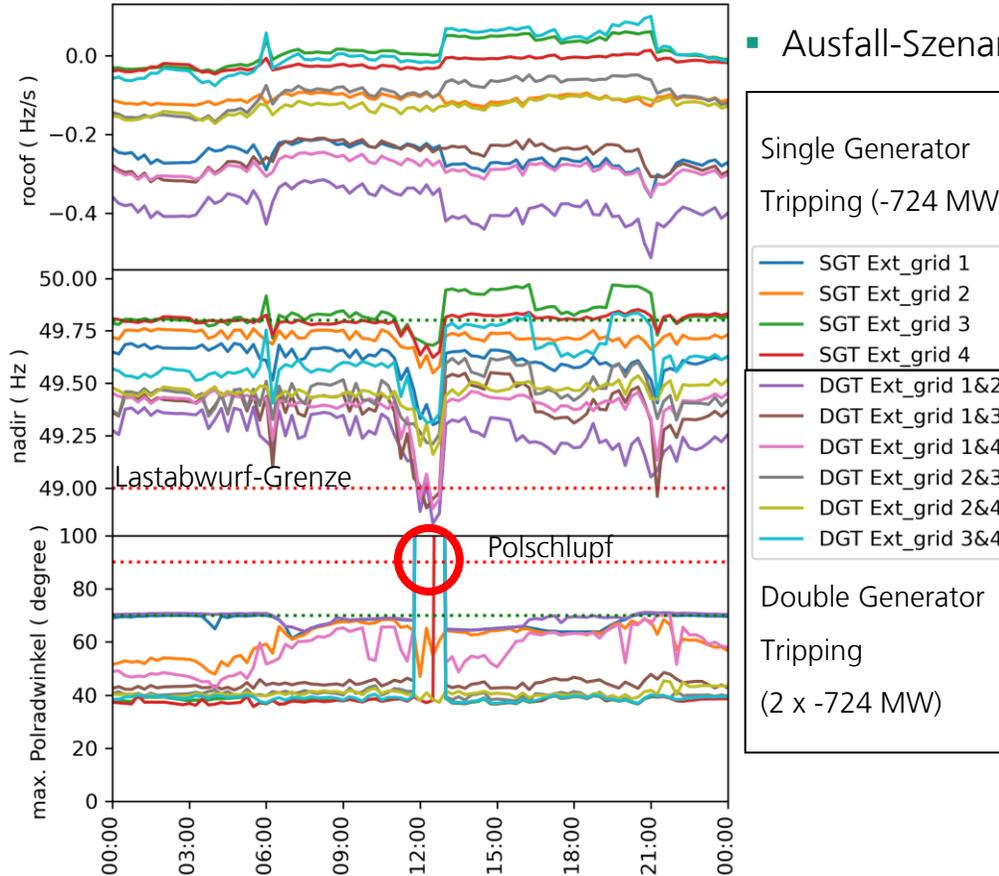
PyDyn – Dynamische Netzsimulation

Anwendung auf Simbench EHV-Netzmodell und Ableitung des KPI Nr. 6

- Simbench EHV Netz
- Dynamisiert mit einfachen SM mit AVR, GOV, UEL
- Kein Schutz
- Regelreserve > 3 GW

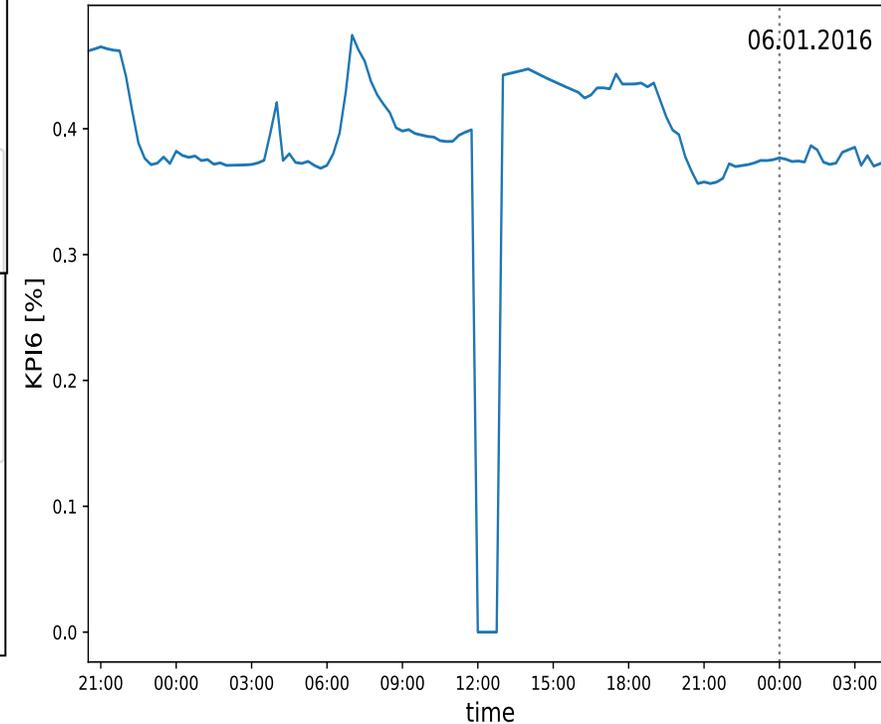


- Netzweite hypothetische Extremwerte für Rocof, Nadir und Polradwinkel für Last- und Erzeugungsprofile vom 05.01.2016



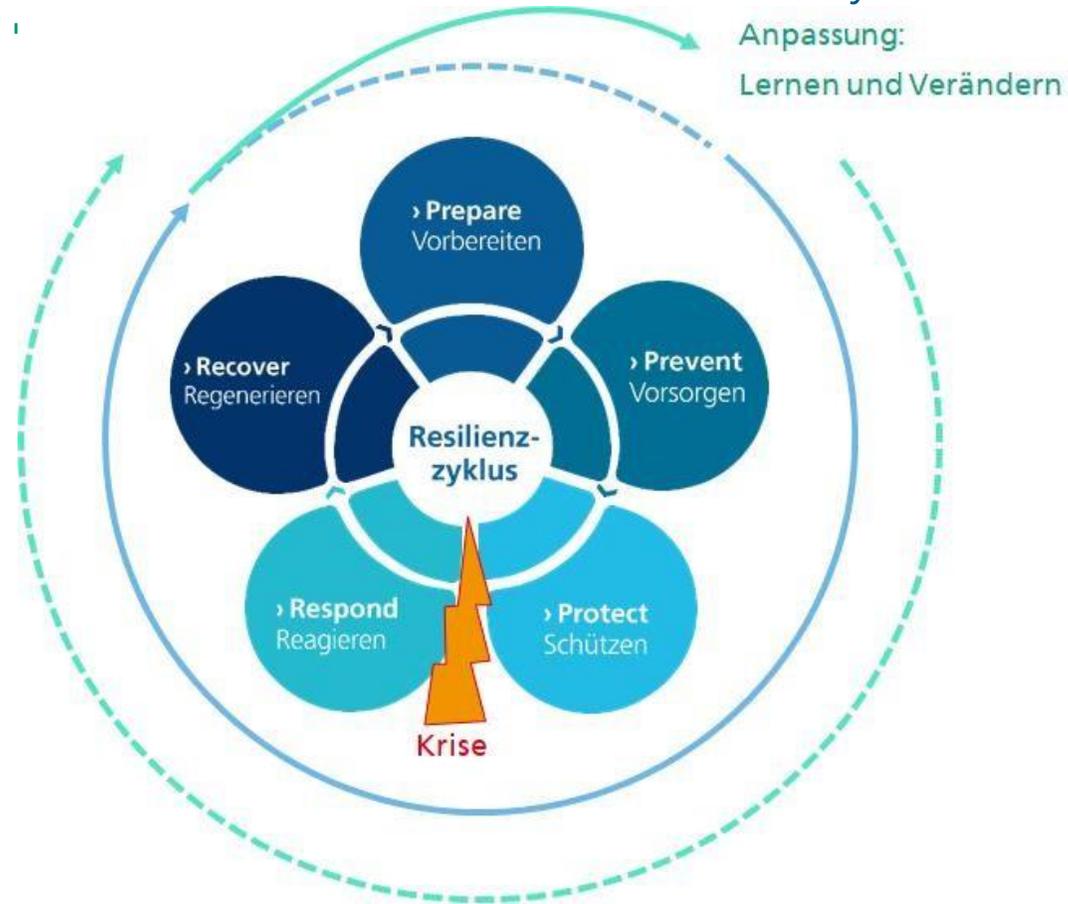
- Ausfall-Szenarios

- KPI Nr. 6



Was bestimmt die Resilienz eines Systems?

Resilienzdimensionen und Resilienzyklus



Dimensionen der Resilienz:

- Eigenschaften: *Robustheit, Redundanz, Einfallsreichtum, Schnelligkeit*
- Sektoren: *sozial, organisatorisch, technisch, ökonomisch*
- Phasen: *Vorbereiten, vorsorgen, schützen, reagieren, regenerieren, lernen und verändern.*

Resilientes Stromnetz:

Stromversorgung bleibt auch bei massiven Störungen und unerwarteten Ereignissen dauerhaft verfügbar.

Das Resilienz-Management gibt Strategien vor, mit denen die Resilienz des untersuchten Systems umfassend gesteigert werden kann. —————> Dazu gehört, die Systemresilienz strukturiert und umfassend abzubilden.

Mit Hilfe von KPIs kann Resilienz eines Systems in Echtzeit überwacht werden

Die Resilienzkurve und KPIs

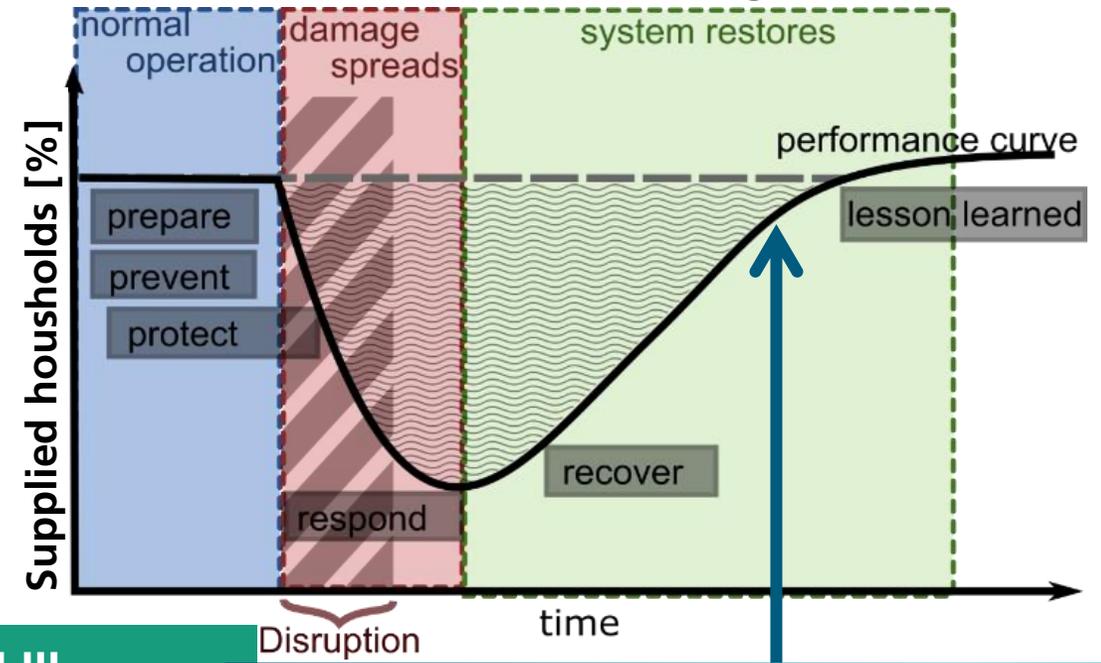
Ein Set von Resilienzmetriken bildet qualitativ oder quantitativ die Performanz der Resilienzphasen ab.

↓
 $\begin{bmatrix} KPI\ 1 \\ KPI\ 2 \\ \dots \end{bmatrix}$



Es lässt sich ableiten, wie gut das System aktuell in jeder Phase des Resilienzzyklus abschneiden wird.

Resilienzkurve: Mit Strom versorgte Haushalte



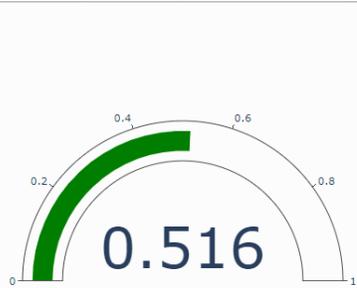
Resilientes Stromnetz:
Stromversorgung bleibt auch bei massiven Störungen und unerwarteten Ereignisse dauerhaft verfügbar.

KPI I	KPI II	KPI III
Störungsgefahr [vorsorgen, schützen]	Systemstress [vorsorgen, reagieren, regenerieren]	Systemflexibilität [respond, recover]
Input: <ul style="list-style-type: none"> Wettervorhersage, Fragilitätskurven, Zustand gekoppelter Systeme (übergeordnetes Netz) 	Input: <ul style="list-style-type: none"> Fehlende redundanzen Fehlendes Personal .. 	Input: <ul style="list-style-type: none"> Reaktionsmöglichkeiten Handlungsalternativen ..

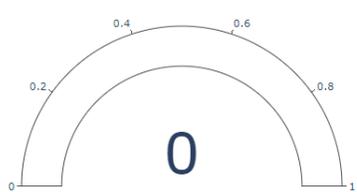
Echtzeitmonitoring eines inselfähigen MV Netzes

Erstes Anwendungsbeispiel mit unseren RESIST Partner ISE

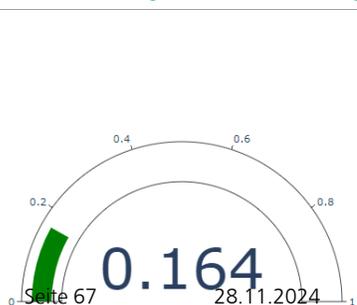
KPI2: System stress



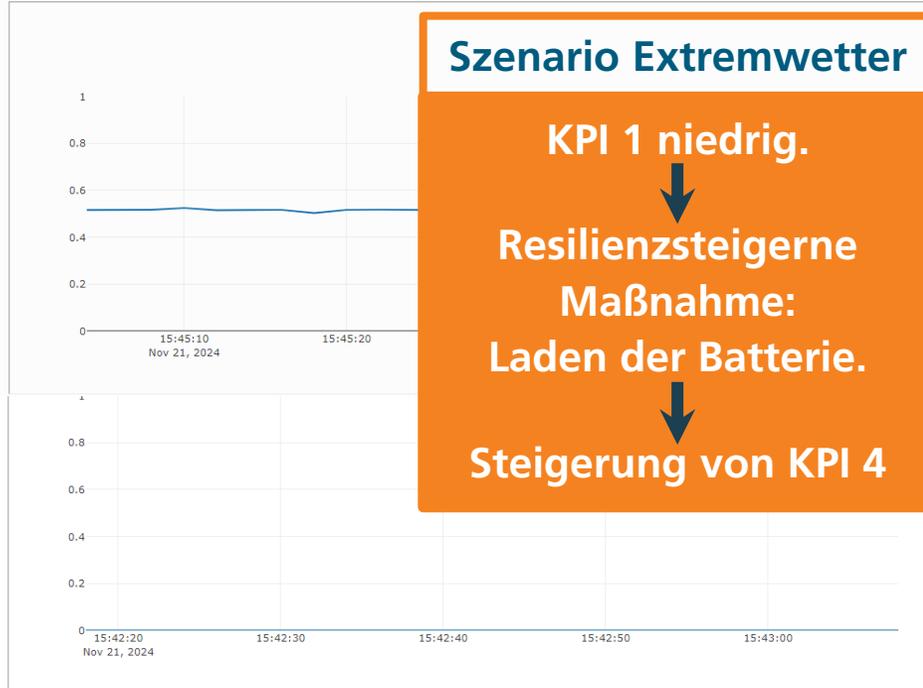
KPI3: System redundancy



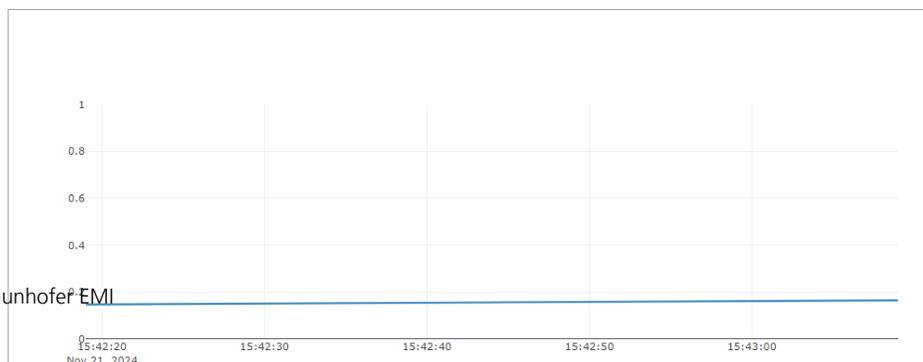
KPI4: System flexibility



KPI 2



KPI 4



Informationen zum Netz

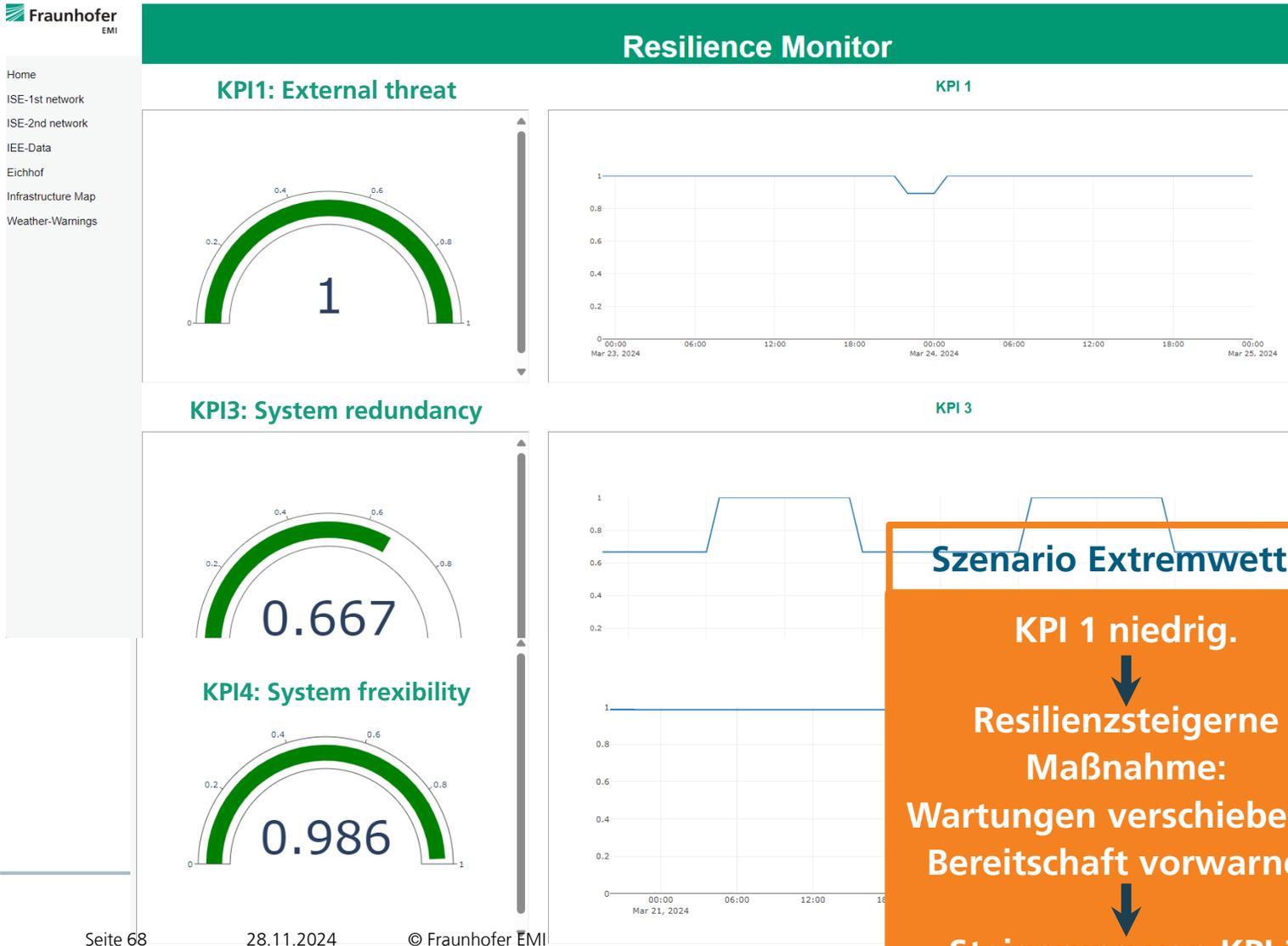
- Mittelspannungsnetz
- Eigene Stromerzeugung durch PV oder Windkraft
- Netzbildender Wechselrichter mit Batterie

KPI – Berechnung:

- **Störungsgefahr:** Wetterwarnungen [**KPI 1**]
- **Systemstress:** Stabilität der Insel (Frequenz, Spannung) [**KPI 2**], Redundanz der Batterieleistung [**KPI 3**]
- **Systemflexibilität:** Option und erwartbare Dauer, das MV in der Insel über die Batterie zu versorgen. [**KPI 4**]

Monitoring eines inselfähigen landwirtschaftlichen Betriebes

Zweites Anwendungsbeispiel mit unserem RESIST Partner IEE



Informationen zum Netz

- Landwirtschaftlicher Betrieb in der NS
- Eigene Stromerzeugung durch Biogasanlage
- Große Lasten durch Landwirtschaftliche Maschinen

KPI – Berechnung:

- **Störungsgefahr:** Wetterwarnungen [**KPI 1**]
- **Systemstress:** Dauer bis zum Aufbau der Insel [**KPI 3**]
- **Systemflexibilität:** Option und erwartbare Dauer, den Betrieb in der Insel zu betreiben [**KPI 4**]

Szenario Extremwetter

KPI 1 niedrig.

↓

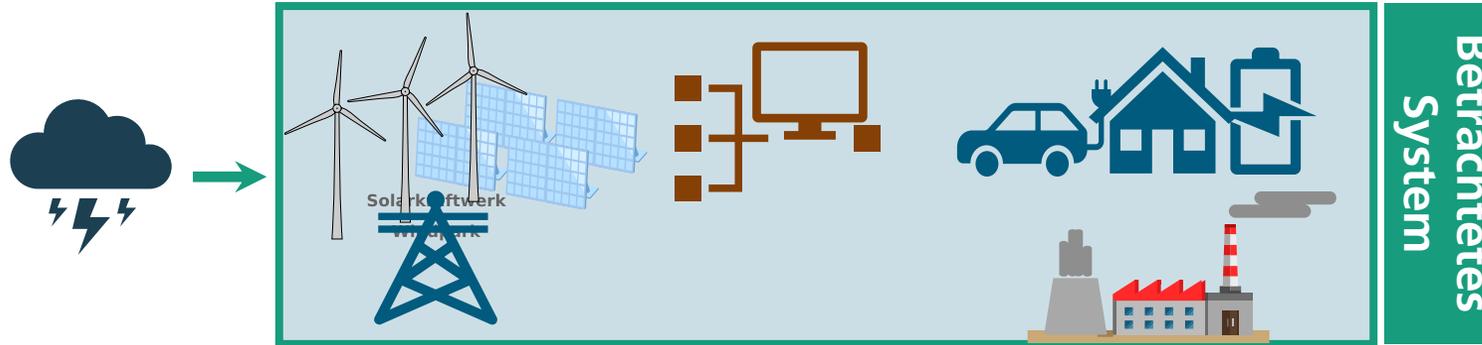
**Resilienzsteigernde
Maßnahme:
Wartungen verschieben &
Bereitschaft vorwarnen**

↓

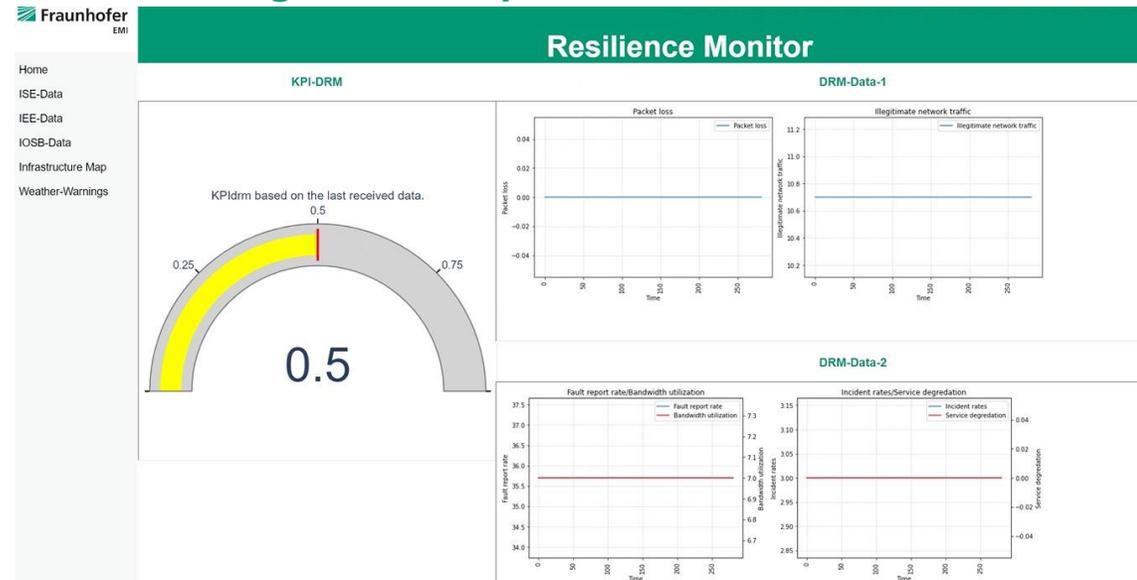
Steigerung von KPI 3

Ziel ist die ganzheitliche Echtzeitüberwachung der Resilienz eines Systems

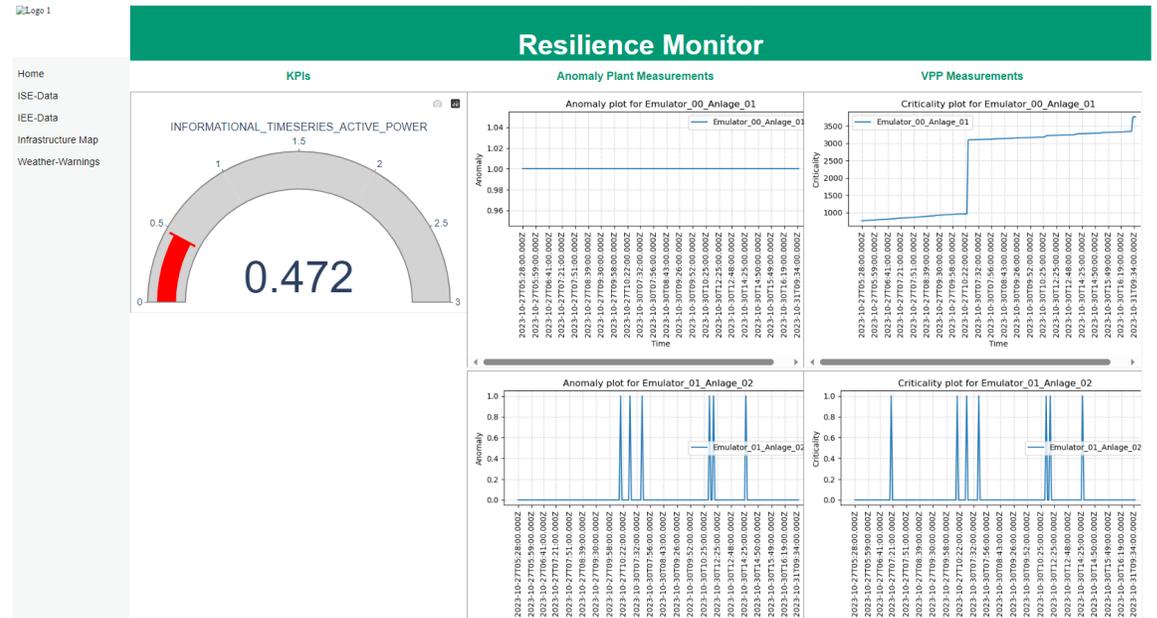
Ganzheitliche Resilienz-Echtzeitüberwachung eines Systems



Daten des Digitalen Umspannwerk (IOSB) im R-Monitor



Daten des Virtuelles Kraftwerks (IEE) im R-Monitor





RESIST

Resiliente Stromnetze für die Energiewende



LI-SA-RD

