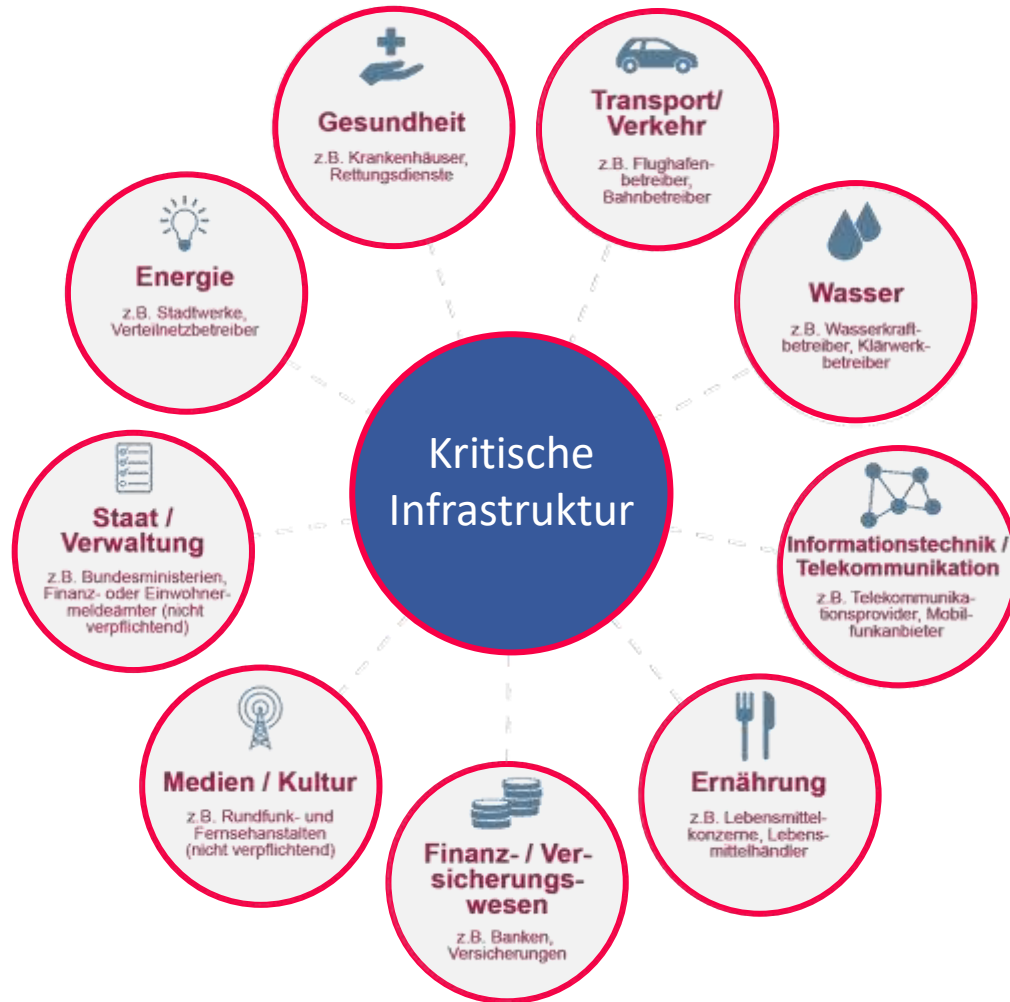


Energiesysteme - resilient und nachhaltig



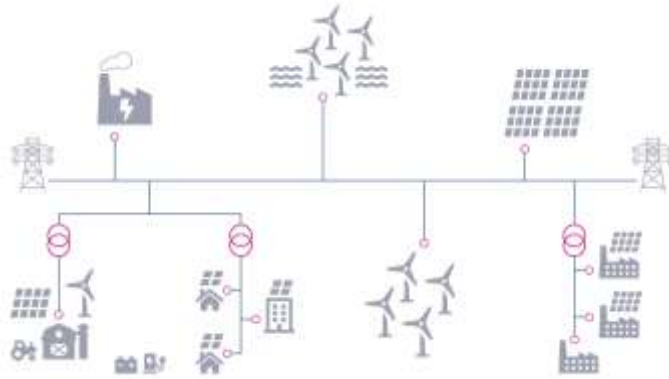
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Trapp



Kritische Infrastrukturen benötigen eine resiliente Versorgung mit den notwendigen Energien (Strom, Kraftstoffe, Wärme, Kälte).

Die wichtigste Anforderung an Elemente der kritischen Infrastruktur ist die **Ausfallsicherheit**. Bisher wurde diese erreicht, indem insbesondere die Stromversorgung **robust und redundant** ausgelegt wurde.

Sabotageakte wie **Cyberangriffe**, Sprengstoffanschläge und ähnliches bilden eine Bedrohung, die bei der Auslegung berücksichtigt werden muss.



Kernkriterien für eine resiliente Energieversorgung

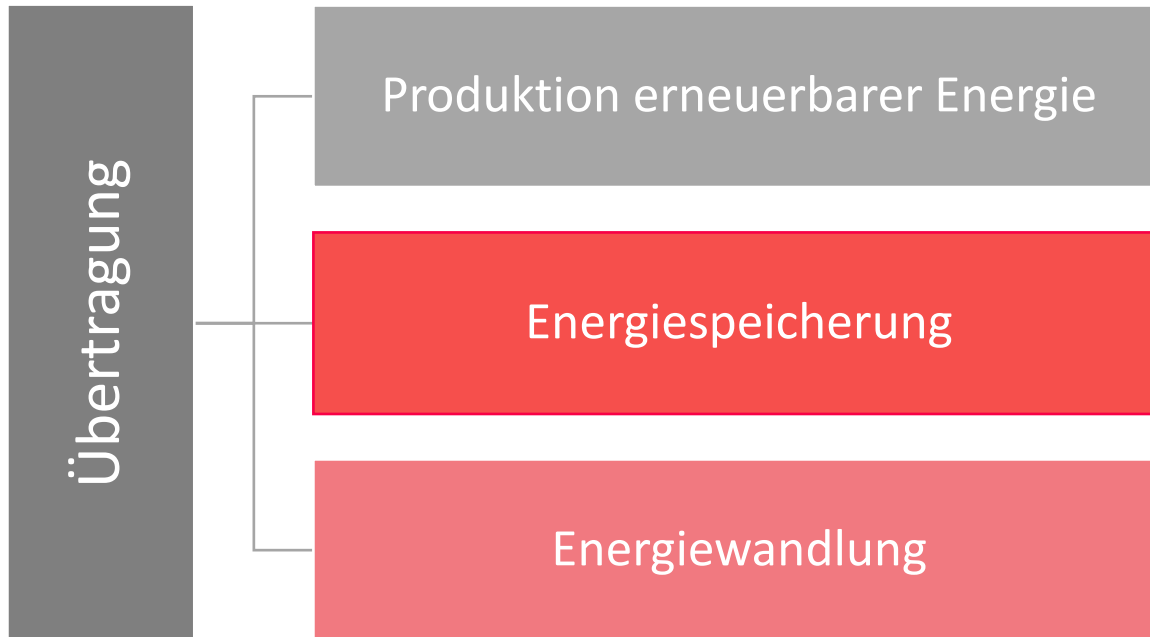
- Verfügbarkeit
- Autarkie
- Safe-to-Fail statt Fail-Safe-Ansatz

Wichtig sind dabei

- Diversifikation der eingesetzten Energieträger und System
- Kopplung zentraler und dezentraler Energieversorgung



Koppelbare autarke Maxi - Mini- oder Microgrids, resiliente Netze und zentrale Speicher





Resiliente kritische Infrastruktur

Normalbetrieb :

- ✓ Minimierung der CO₂-Emissionen
- ✓ Minimierung der Logistik- und Energiekosten

Krisen, Konflikte:

- ✓ Maximierung der Autarkie (Unabhängigkeit)
- ✓ Maximierung der Durchhaltedauer für kritische Fähigkeiten



Mehrziel-Optimierung mit „Must-Run“-Kapazität für den Krisenfall:

- Diversifizierung der eingesetzten Energieträger und Systeme
- Redundanz für die „Must-Run“-Kapazität



Autarkie wird – wo möglich - durch den lokalen Einsatz erneuerbarer Energien erreicht.

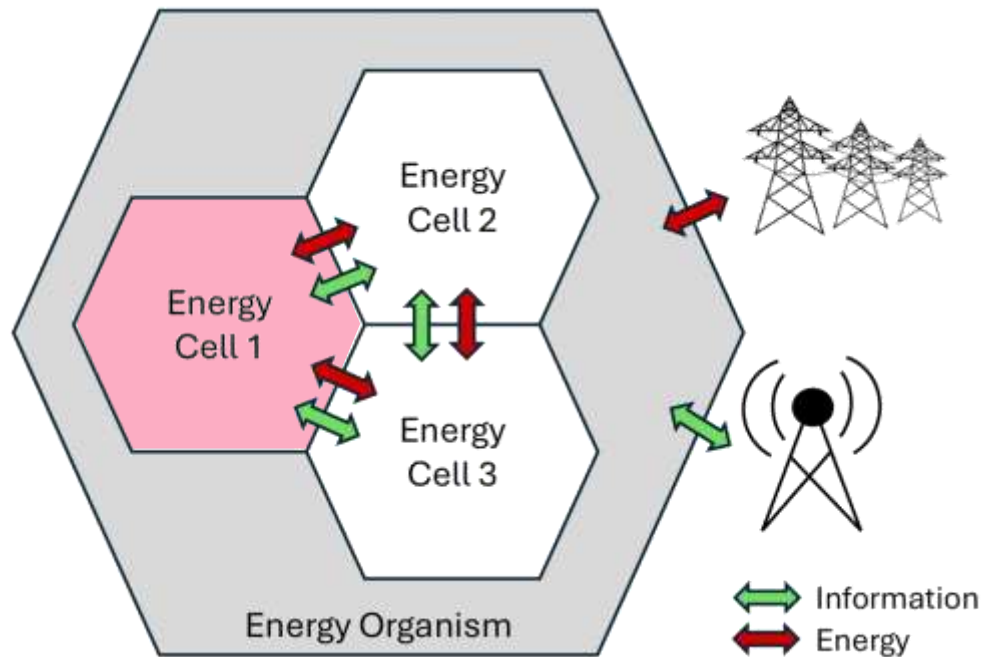
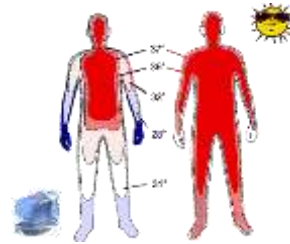
Nur dadurch ist eine sogenannte **horizontale Autarkie** darstellbar.

Daneben ist insbesondere bei kritischer Infrastruktur auf eine **Minimierung der eingesetzten Ressourcen** und besonders der Verzicht auf Ressourcen aus nicht-EU-Quellen zu achten (**technische Souveränität**).

Beides führt zu einer sehr **hohen Nachhaltigkeit** im Sinne der Klimaneutralität und der Ressourcenschonung

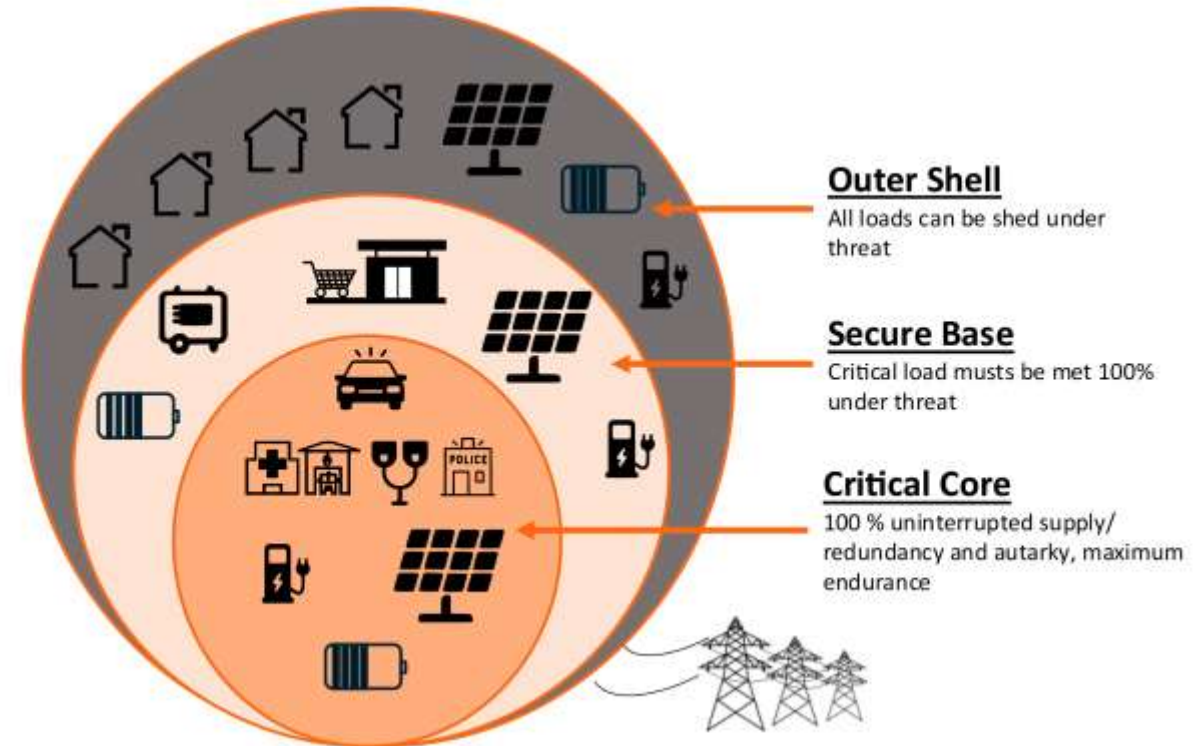
Energieorganismus:

Übertragung der Schutzmechanismen des menschlichen Körpers auf Energiesysteme mit priorisierten Energiezellen.

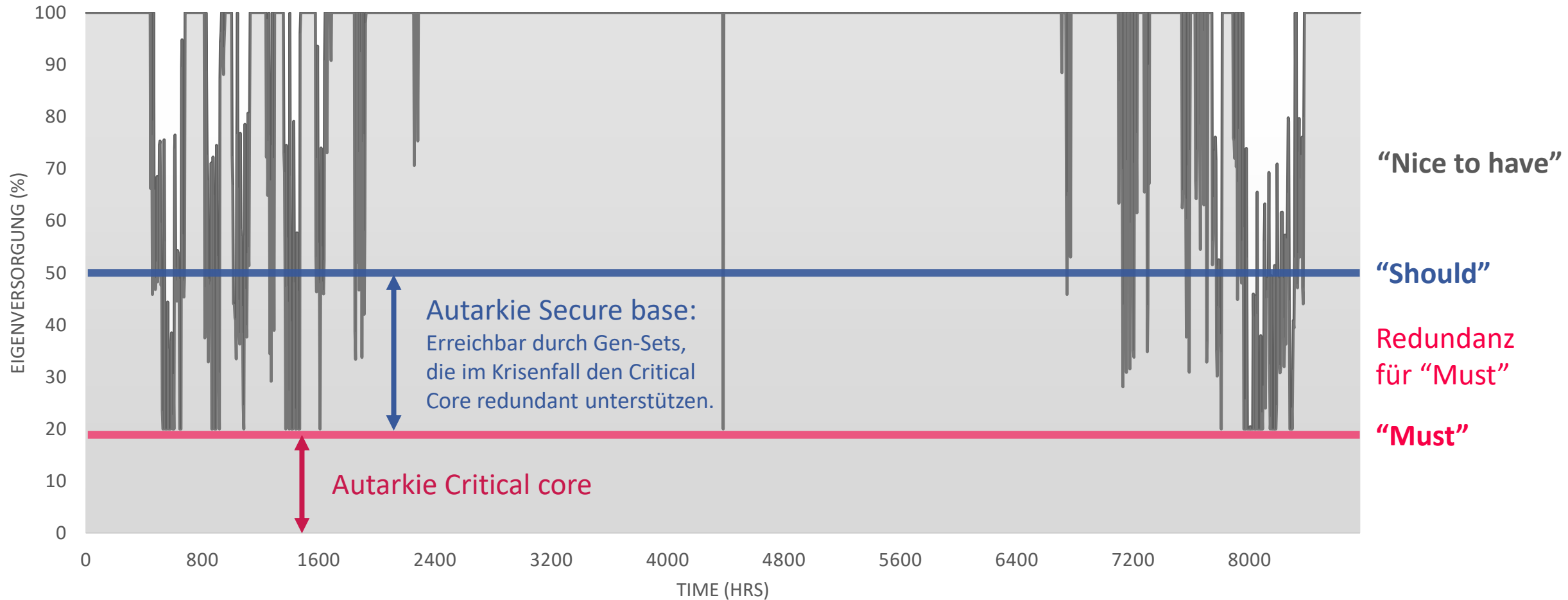


Core-Modell:

Priorisierung der Energieflüsse zur Sicherstellung der kritischen Aufgaben eines Systems. Dauerhafte Autarkie für den Critical Core



Resilienz und Autarkie: Prioritätsversorgung





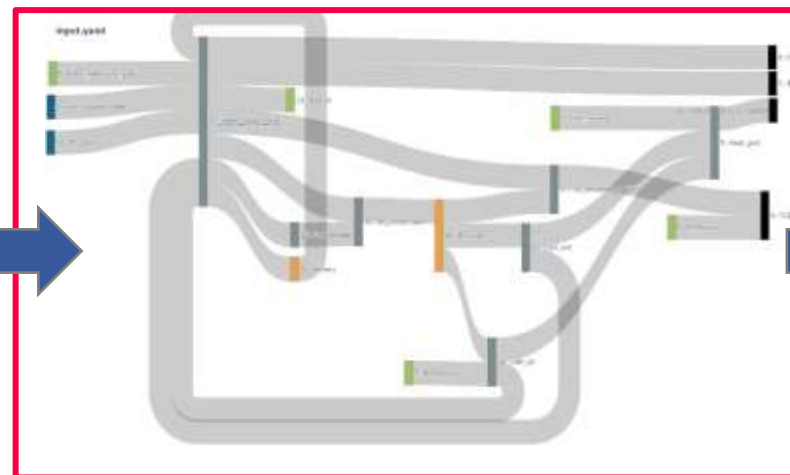
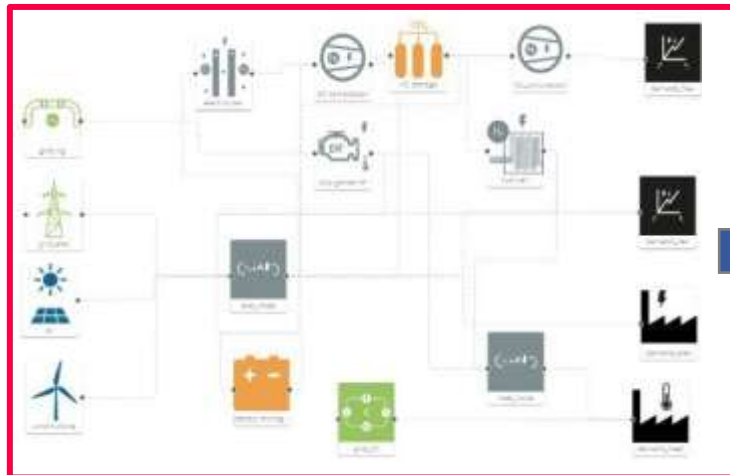
Simulationsbasierte Auslegung unter Berücksichtigung der Betriebsstrategie

➤ Zunehmende Komplexität der zukünftigen Energiesysteme

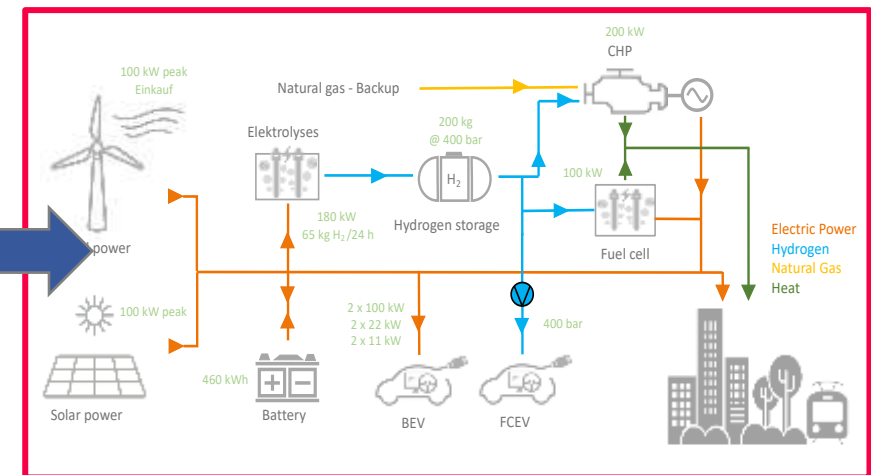
- Volatile Energiequellen (Sonne, Wind, ...)
- Kopplung mehrerer Energieformen (Strom, Wärme, Kälte, Kraftstoffe, ...)
- Digitalisierung (Märkte, Energieverteilung, ...)

➤ Herausforderungen

- Optimale Gestaltung des Gesamtsystems unter allen Einsatz- / Klima- / Randbedingungen
- Optimaler Betrieb zur Deckung des Energiebedarfs (Strom, Wärme) zur Verbesserung des Durchhaltevermögens



Simulation mit LEC ENERSim



Simulationsbasierte Auslegung (z.B. mit LEC ENERsim)

- ✓ Definierter Zeithorizont (z.B. ein Jahr) mit relativ großen Zeitschrittweiten Δt (5-15 min)
- ✓ Optimierung von Energie- und Massenströmen und Speicherinhalten je Zeitschritt Δt
- ✓ Keine Betrachtung einer detaillierten Strom- und Wärmenetztopologie

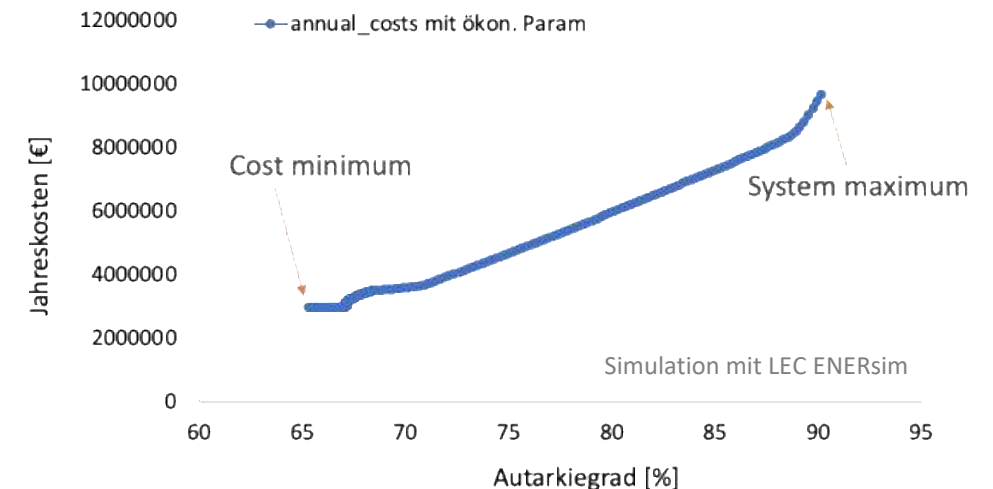


Mixed Integer Linear Programming (MILP, gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung)

- die Zielfunktion (was maximiert oder minimiert werden soll, z. B. Kosten, Resilienz) ist linear
- alle Nebenbedingungen (technische, physikalische, logische Anforderungen) sind linear
- ein Teil der Entscheidungsvariablen ganzzahlig (integer oder binär = 0/1) ist.

MILP erlaubt bei relativ kurzen Berechnungsdauern (< 15 min)

- ✓ Auslegung komplexer Energiesystems (ohne detaillierte Strom- und Wärmenetztopologie)
- ✓ Berücksichtigung langer Zyklen (z.B. kompletter Jahresverläufe) Berechnung des Systems mit verschiedenen Randbedingungen für eine Pareto-Front-Optimierung
- ✓ Nutzung von verfügbaren, stabilen und validierten Open-Source (CBC) oder kommerziellen (Gurobi) Solvern



Minimale Formulierung (MILP) für ein Energiesystem

- ✓ Ziel: Wir minimieren Nichtversorgung und Umschaltkosten über eine Kostenfunktion
- ✓ Diese Summe über alle Zeitschritte aggregiert die Betriebskosten- und Resilienzwirkungen über den gesamten Planungshorizont

$$\min \sum_t \left[\underbrace{c_{nc}^{dem} P_t^{dem,nc} \Delta t}_{\text{Kosten nicht gedeckte Leistung}} + \underbrace{c_{deg}^{bat} P_t^{bat,cyc} \Delta t}_{\text{Kosten Batteriealterung}} + \underbrace{c_{eff}^{ele} P_t^{H2,ch} \Delta t}_{\text{Kosten Ineffizienz H2-Pfad}} + \underbrace{c_{sup}^{grid} P_t^{grid,sup} \Delta t}_{\text{Kosten Netzbezug}} + \underbrace{c_{sw} \sum_l |z_t^l - z_{t-1}^l|}_{\text{Kosten Umschaltvorgang}} \right]$$

z_t^l = Zustand Schalter / Relais zum Zeitpunkt t
 Δt = Zeitschrittweite
 c_{xx} = Kosten pro Leitung und Zeiteinheit

Nebenbedingungen:

- ✓ Leistungsbilanz mit Verbrauchsprofil
- ✓ Speicherdynamik mit Wirkungsgraden
- ✓ Minimale Eigenversorgungsquote

	„Konservativ-ökonomisch“	„Balanciert-resilient“	„Resilienz zuerst“
c_{nc}^{dem}	20.000 €/MWh	60.000 €/MWh	120.000 €/MWh
c_{deg}^{bat}	0,05 €/MWh	0,07 €/MWh	0,09 €/MWh
c_{eff}^{ele}	10 €/MWh	15 €/MWh	20 €/MWh
c_{sup}^{grid}	180 €/MWh	120 €/MWh	250 €/MWh
c_{sw}	15 €/Vorgang	40 €/Vorgang	80 €/Vorgang

Leistungsbilanz

$$P_t^{PV,ac} + P_t^{Wind,ac} + P_t^{bat,disp} + P_t^{H2,disp} + P_t^{grid,sup} = P_t^{dem,ac} - P_t^{dem,nc} + P_t^{bat,ch} + P_t^{H2,ch} + P_t^{grid,disp}$$

- Maximale Laden- und Entladeleistungen $P_t^{x,ch} < P_t^{x,ch,max}$ $P_t^{x,disp} < P_t^{x,disp,max}$
- Big M Kopplung vermeidet gleichzeitiges Laden und Entladen der Speicher bzw. gleichzeitigen Netzbezug und Netzurückspeisung

Speicherdynamik

$$E_{t+1}^{bat} = E_t^{bat} + \eta_{ch}^{bat} P_t^{bat,ch} \Delta t - \eta_{disp}^{bat} P_t^{bat,disp} \Delta t$$

$$E_{t+1}^{H2} = E_t^{H2} + \eta_{ch}^{H2} P_t^{H2,ch} \Delta t - \eta_{disp}^{H2} P_t^{H2,disp} \Delta t$$

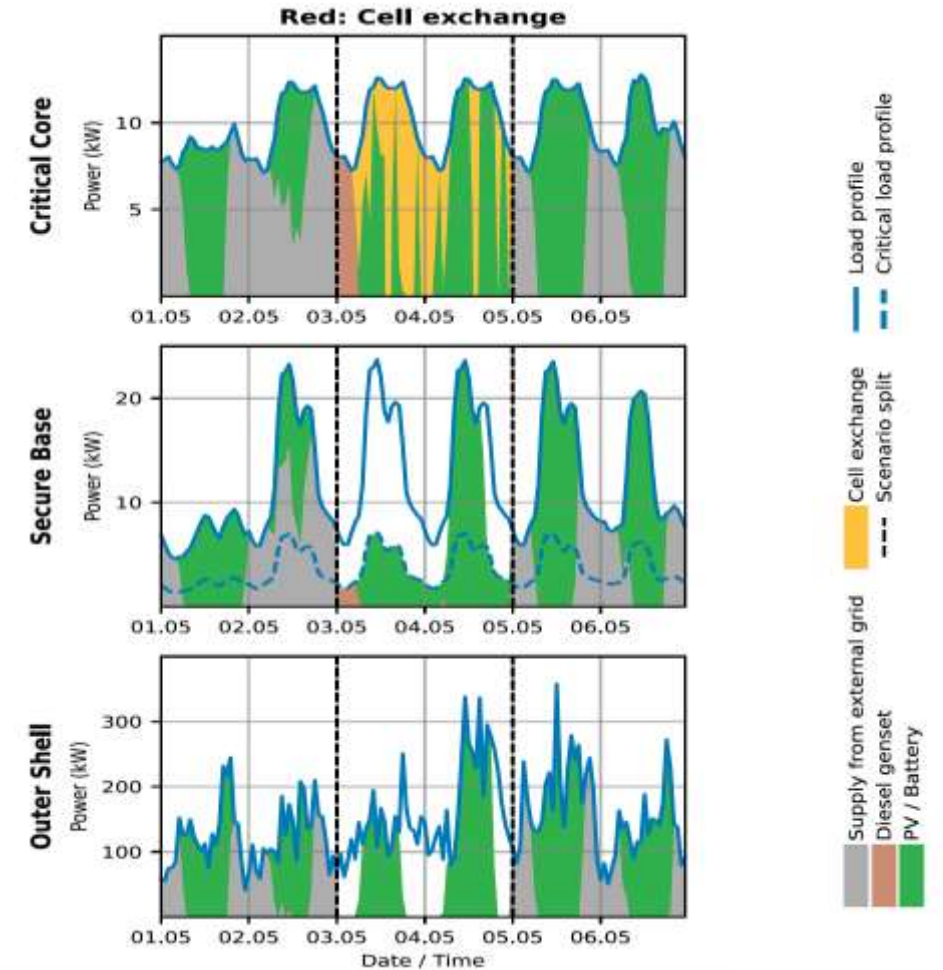
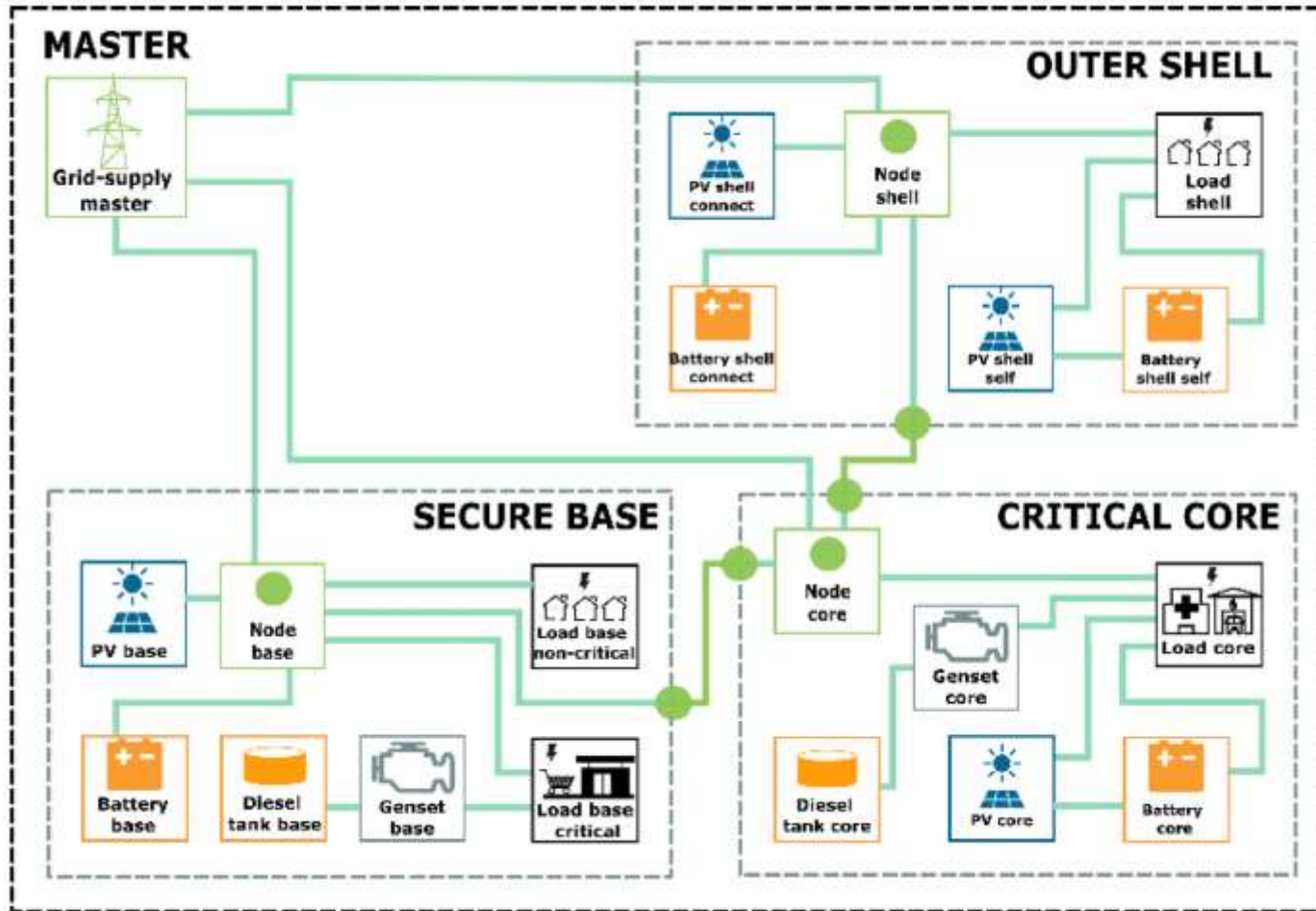
Minimale Eigenversorgung

$$P_t^{PV,ac} + P_t^{Wind,ac} + P_t^{bat,disp} + P_t^{H2,disp} > f_{min} P_t^{dem,ac} - P_t^{dem,nc}$$

- f_{min} = geforderte Mindesteigenversorgung



Resilienz und Autarkie: Prioritätsversorgung



Resilienz – Definition für die Auslegung von Energiesystemen

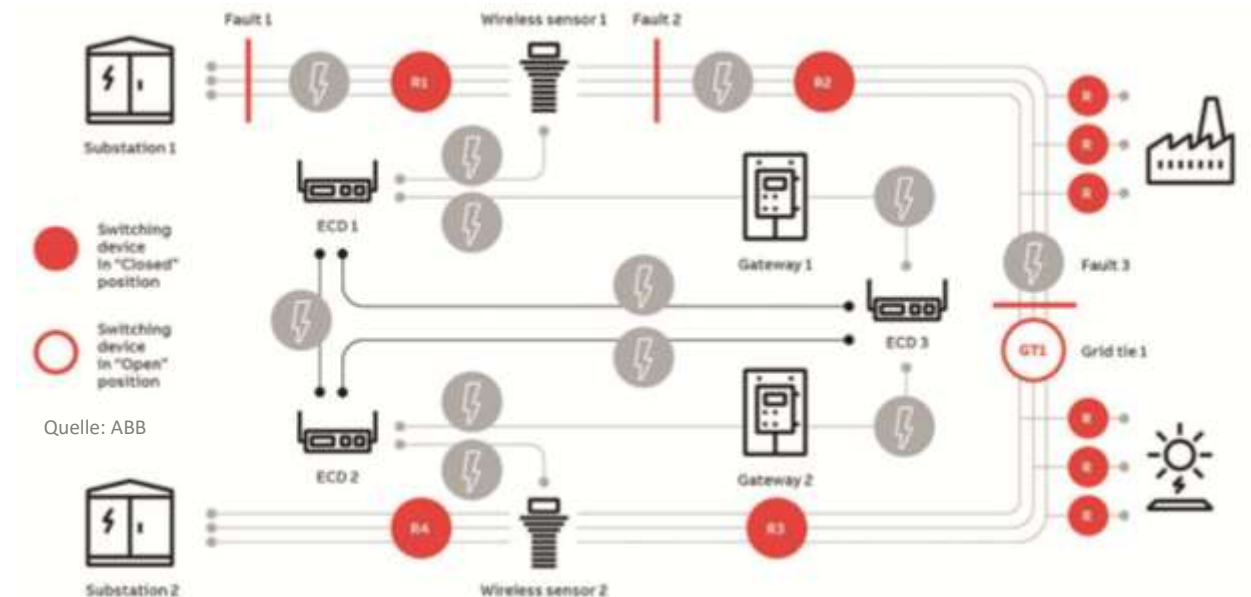
- ✓ Leistungsbedarf (Strom/Wärme/Kälte) des Critical Core wird zu jedem Zeitpunkt 100 % gedeckt
- ✓ Zu jedem Zeitpunkt ohne Fehler/Ausfall besteht ein Überschuss an Leistung gegenüber Critical-Core-Bedarf (Redundanz)
- ✓ Leistungsbedarf des Critical Core im Fehlerfall (Ausfall / Schaden / Kurzschluss usw.) weiterhin gedeckt
 - FDIR-Konzept (Fault Detection, Isolation und Reconfiguration; Optimale Systeme FDI : < 20 ms, R 0,5 – 10 s)
 - Inter-Zell-Austausch im kritischen Fall für die Aufrechterhaltung der Funktionalität der Critical Core wichtig

Problemstellung für die Auslegung mittels MILP mit großer Zeitschrittweite:

Dauer FDIR-Event $T_{\text{FDIR}} \ll$ Zeitschrittweite Δt



MILP simuliert keine ms-Dynamik, die zur direkten Berechnung eines FDIR-Event notwendig wäre.



Lösungsansatz zur Berechnung der Resilienz

- ✓ Definition eines skalaren Autarkie-Redundanz-Indexes ARI für alle Energievektoren m (Strom, Wärme, Kälte)
- ✓ Einführung einer zeitabhängigen skalaren „angemessenen Reaktionszeit“ (Reaction-time adequacy)
 - gewährleisten, dass genügend schnell aktivierbare Reserveleistung vorhanden ist, um den Ausfall bis zum Ende des FDIR-Events aufzufangen

Autarkie-Redundanz-Index ARI für den Critical Core

zeitabhängige Deckungsquote $\Gamma_m(t)$ für alle Energievektoren m :

$$\Gamma_m(t) = \frac{S_m^C(t)}{D_m^C(t)}$$

$D_m^C(t)$ Zeitabhängiger Verbrauch des Critical Core (Strom, Wärme, Kälte)
 $S_m^C(t)$ Zeitabhängige Eigenversorgung des Critical Core (inkl. Inter-Zell-Austausch)

$\Gamma_m(t) \geq 1$ Autarkie $\delta_{min} = \Gamma_m(t) - 1$ Redundanzindex

Betrachtung des “Bottleneck“-Szenarios
 (minimale zeit/vektor-bezogene Deckungsquote)

$$\text{ARI} := \min_{t \in \mathcal{T}} \min_{m \in \{E, H, C_t\}} \Gamma_m(t)$$

$> 1 + \delta_{min}$ -> Autarkie- und Redundanzbedingung erfüllt

Reaction-time adequacy für den Critical Core

Zeitschrittskalierung $\alpha(t)$

Reservelast muss innerhalb eines Zeitschritts die kontingente Ausfallleistung decken

$$\alpha(t) := \min\left(1, \frac{T_{\text{FDIR}}(t)}{\Delta t}\right)$$

T_{FDIR} Dauer FDIR-Event
 Δt Zeitschrittweite der Simulation

Linearisierte Bedingung für eine angemessene Reaktionszeit im MILP

$$\sum_{k \in \mathcal{K}_m} rk, m^\dagger(t) \geq \alpha(t) P^{\max}_{\text{cont}}(t)$$

erfüllt -> FDIR erfolgreich

$rk, m^\dagger(t)$ innerhalb Δt abrufbare Reserveleistung je Komponente
Reserveleistung je Komponente
alle Leistung zum Zeitpunkt t größte gleichzeitige Ausfallleistung zum Zeitpunkt t

Lösungsansatz zur Bewertung der dynamischen Reaktionszeit

- ✓ Definition eines skalaren dynamischen Reaktionszeit-Index DRI
- ✓ Einführung des Resilienz-Index RKPI als Bewertungsgröße für die Erfüllung aller Resilienzforderungen (Deckungsbeitrag und FDIR)
- ✓ gewährleisten, dass genügend schnell aktivierbare Reserveleistung vorhanden ist, um den Ausfall bis zum Ende des FDIR-Events aufzufangen

dynamischer Reaktionszeit-Index DRI

$$\text{DRI} := \exp(-\max\{0, T_{95} - T_*\} / \tau) \in (0, 1]$$

- T_{95} 95-Perzentil der realen End-zu-End-FDIR-Zeit (ms) für ein Worst Case Event
- T_* technisches Designziel für maximale Dauer des Worst Case FDIR Events (ms)
- Ableitung aus Normen / Vorgaben.
 - Reduziertes T_* erzwingt schnelle Sensoren, Kommunikation (z.B. GOOSE-Standard) und schnelle Aufschaltzeiten der Leistungsreserven (z.B. Batterie)
 - Verlängertes T_* führt zu einer längeren Tragedauer bis andere Quellen die Lücke schließen
- τ Toleranzparameter (ms), hoher Wert = hohe Toleranz gegenüber Überschreitung der Reaktionszeit

Resilienz Index RKPI

$$\text{RKPI} = (\text{ARI})^\beta \cdot (\text{DRI})^{1-\beta}, \quad \beta \in [0, 1]$$

Gewichtet Deckungsbeitrag und Reaktionszeit über geom. Mittelwert
Typisch $\beta = 0,7-0,9$, wenn Autarkie-Redundanz oberste Priorität hat; niedriger, wenn ultraschnelle Neukonfiguration kritisch ist (kleine Leistungs- und Energiereserven).

RKPI ist Optimierungsparameter im MILP

RKPI-Wertbereich	Bedeutung (Interpretation)
1.00 – 1.05	Basis-Resilienz: Autarkie exakt $\geq 100\%$, FDIR-Zeit im Ziel (3 ms).
1.05 – 1.15	Erhöhte Resilienz: +5–15 % Redundanz, DRI ≈ 1 .
1.15 – 1.30	Hohe Resilienz: deutliche Überdeckung oder schnelle Multi-DER-Rekonfiguration.
> 1.30	Sehr hohe / überdimensionierte Resilienz: zusätzliche Kapazitäten, mehrfache Redundanz, ultraschnelle Reaktion.
< 1.00	Nicht-resilient: ARI < 1 oder DRI < 0.9.

Historische Daten

- Energiebedarf
- Klima- und Wetterdaten
- Verfügbarkeit
- Ausfallwahrscheinlichkeiten
- Historische Kosten



Energie Flow Optimizer

- ✓ Short-term Betriebsstrategie (1 Tag)
- ✓ Mid-term Betriebsstrategie (10 Tage)
- ✓ Long-term Betriebsstrategie (365 Tage)
- ✓ Short-term / Mid-term Szenarien



Vereinfachte transiente Modelle

- ✓ Real-Time fähig
- ✓ Techno-ökonomische Modelle

Operative Daten

- Technische Daten
- Wartungspläne
- Wettervorhersage
- Operative Szenarien
- Worst-Case-Szenarien
- Aktuelle Kosten



Aktuelle Gefährdungslage

- ✓ **Alpha** Grundbetrieb
- ✓ **Bravo** Preparation
- ✓ **Charlie** All Stand-By
- ✓ **Delta** All Operational Reserve

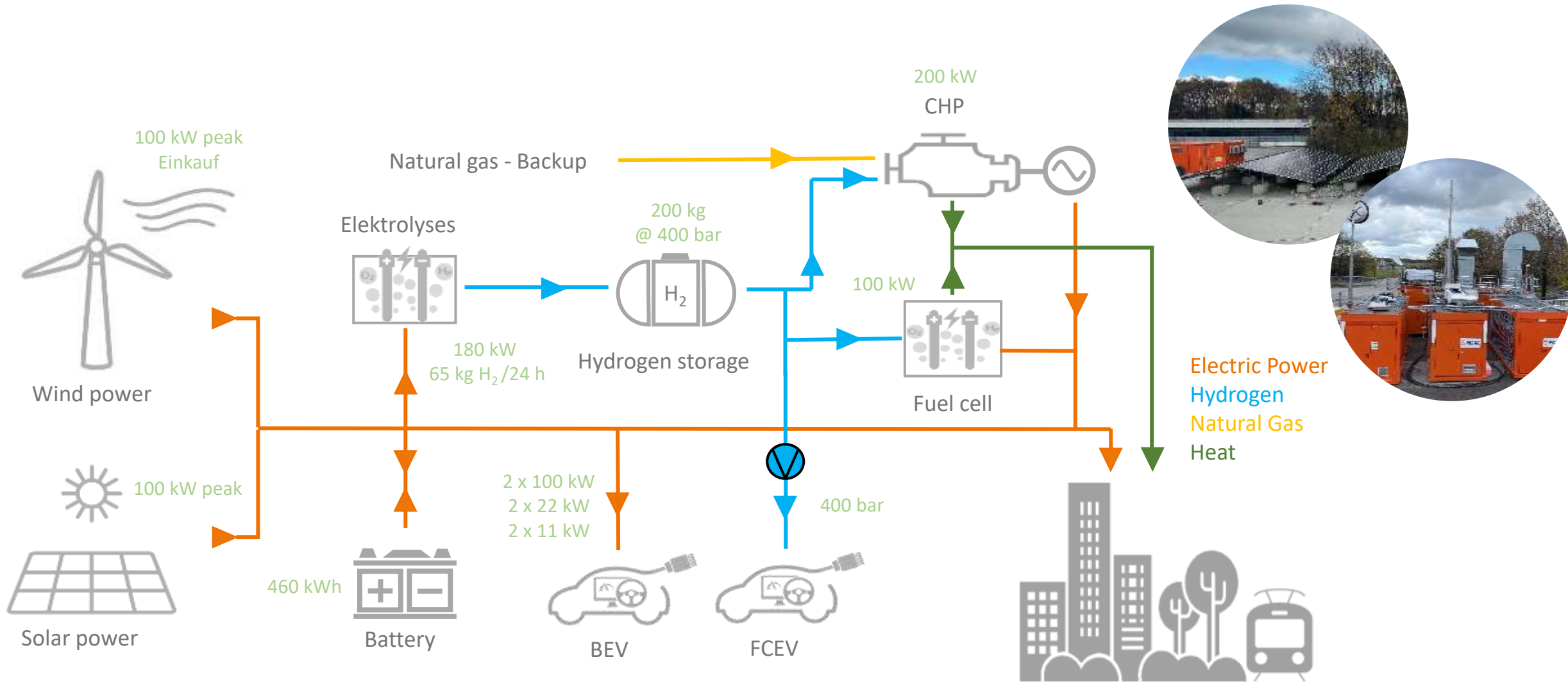


Optimierungsziele

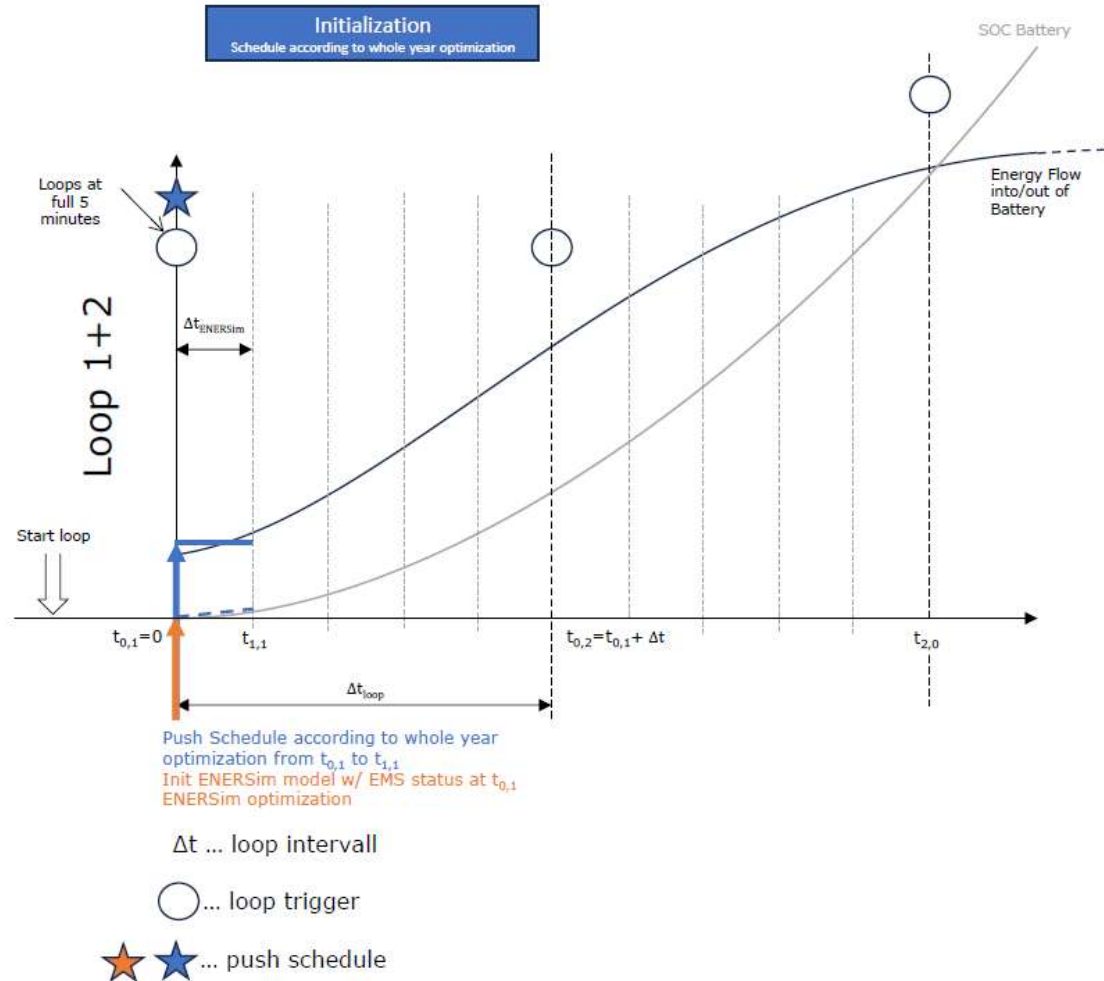
- ✓ Priorisierte Multidimensionale Optimierung
 - Maximierung Überlebensfähigkeit
 - Maximierung Verfügbarkeit
 - Maximierung Autarkie /
 - Minimierung Logistik
 - Minimierung CO₂
 - Minimierung Kosten



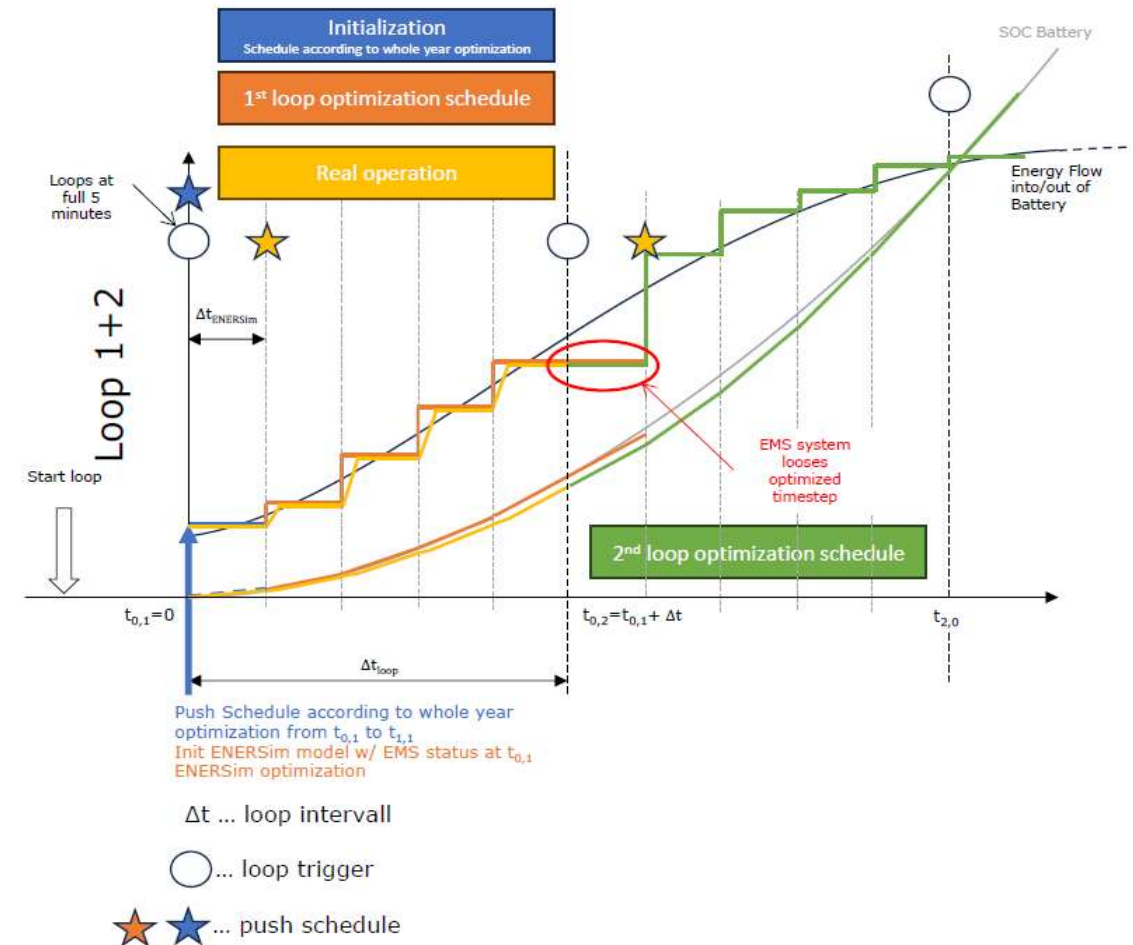
Smart Urban Grid Demonstrator



Schedules without re-initialisation

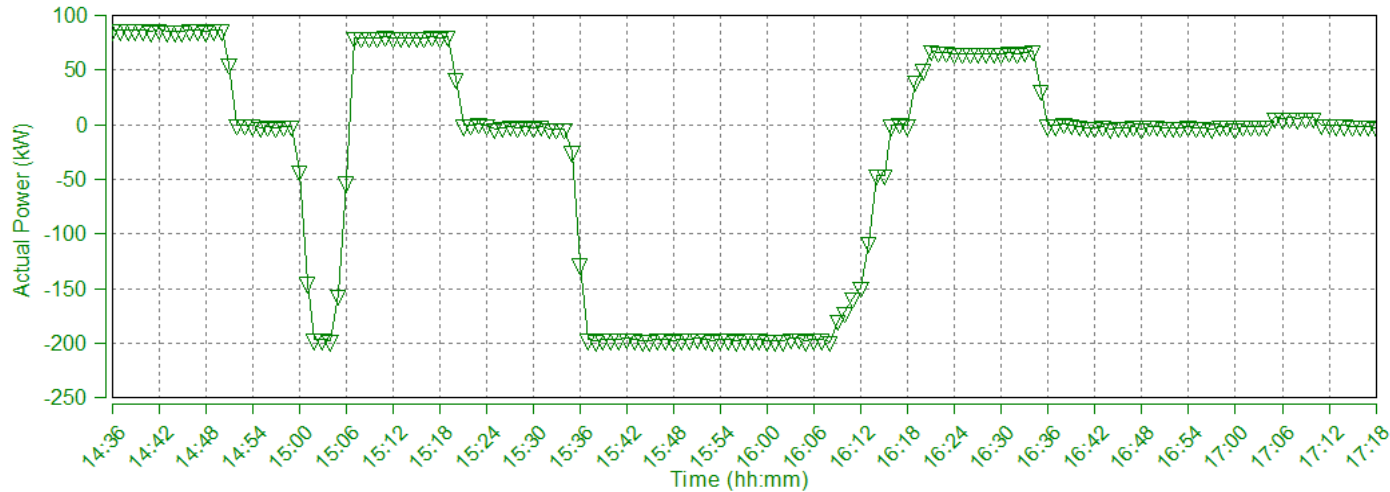


Re-optimisation with active feedback and re-initialisation

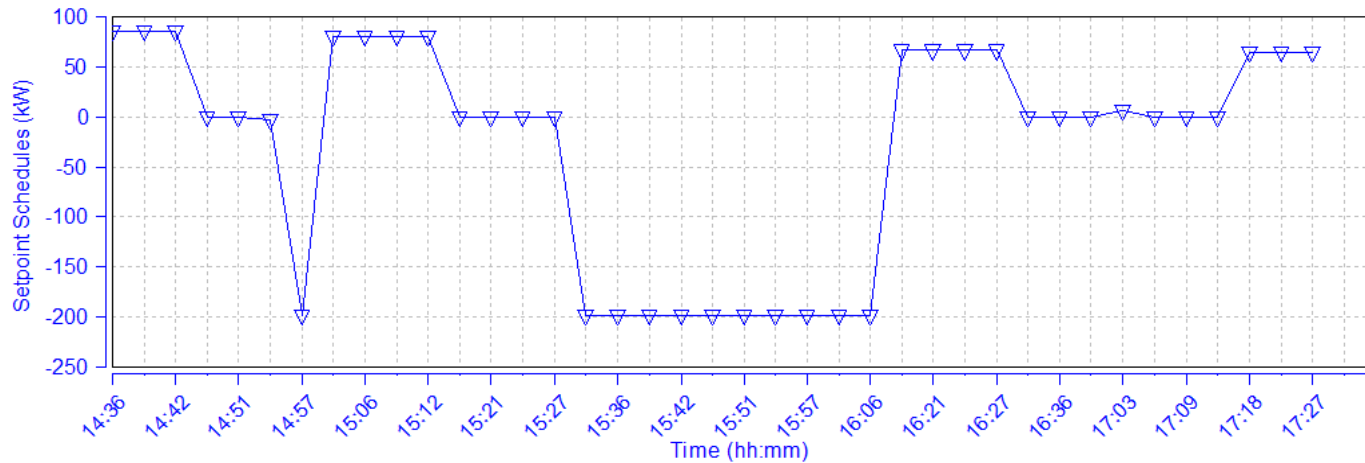


Fahrplanoptimierung der Batteriespeicher mittels Energy Flow Optimizer

Actual power feedback



Schedule realised by EMS



- ✓ Die Sollwertpläne werden alle 15 Minuten mit einem Zeitschrittweite von 3 Minuten berechnet und von LEC ENERSim erfolgreich an das EMS übertragen.
- ✓ Die LFP-Batterie folgte den optimierten Plänen genau.
- ✓ Die Batterie reagierte innerhalb von etwa 5 Minuten auf Planänderungen.
- **Detailentwicklung und Implementierung der FDIR-Logik im EMS**
- **Test der FDIR-Logik im Smart Urban Grid Demonstrator**

- ✓ Resilienz Kriterien und zellurales CORE-Modell für die Auslegung von Energiesystemen kritischer Infrastrukturen
- ✓ Methodik zur simulationsbasierten Auslegung dieser Energiesysteme mittels MILP-Ansatz
- ✓ Methodik zum optimalen Betrieb dieser Energiesysteme im Krisenfall

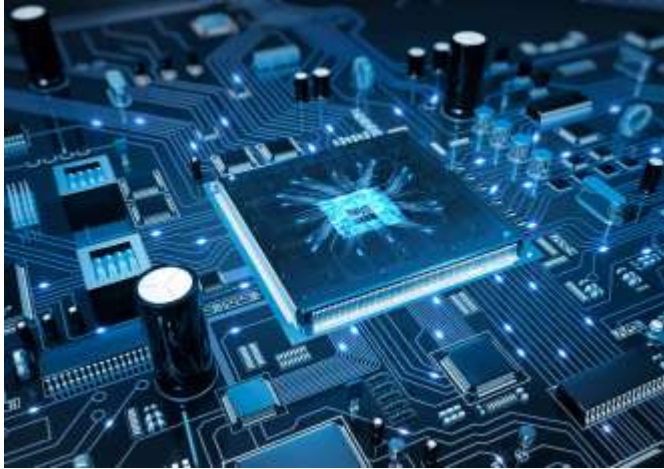
- ❖ Aktuell : Implementierung und Validierung der Methodik für den optimalen Betrieb

- **Ausblick: Entwicklung einer Methodik zur Auslegung eines Transformationspfades für diese Energiesysteme**
 - Startpunkt : der heutige Ist-Zustand und gewünschte Soll-Zustand zu einem zukünftigen Zeitpunkt
 - Einhaltung aller geforderten Randbedingungen (Resilienz, CO2-Emissionen, Regularien) zu jedem Zeitpunkt sicher
 - Berücksichtigung techno-ökonomischer Roadmaps für alle Komponenten eines resilienten Energiesystems
 - Berücksichtigung dynamischer Marktmodelle für CO2, Kraftstoffe, Energie usw.
 - Berücksichtigung zukünftiger Gesetzgebungen und Regulierungen
 - Wahrscheinlichkeitsmodellen und Szenarienansätzen für Technologieroadmaps, Märkte und Regularien
 - Kombination Dynamic-Programming und Model Based Control /Physics Driven Machine Learning

Resiliente Energiesysteme für eine nachhaltige Zukunft



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Energy Flow Optimizer

✓ prädiktive
Betriebsstrategie



Systemmodell für die Regelung

