# Alterungsbewusster digitaler Zwilling für die prädiktive Klimatisierung von Batteriespeicher-Container

**Mahmoud Mustafa, Prof. Dr. -Ing. Georg Frey**

**Universität des Saarlandes**

# Motivation: Container-Batteriespeicher

## 1 Container-Batteriespeicher

drei Teilsysteme in einem Gehäuse




## 2 Anwendung

Wofür die Speicher genutzt werden

**Netzstabilisierung**
Arbitrage, Peak Shaving

**Erneuerbare integrieren**
PV- und Windstrom

**Industrie**
Lastmanagement, Notstrom

**Elektromobilität**
Ladeinfrastruktur, Schnellladen

## 3 Herausforderungen

Wärme, Klimatisierung, Alterung, Verluste

**Wärmeentwicklung**
beim Laden und Entladen

**Klimatisierung**
Zweipunktreglung 15 bis 35 °C, hohe Energieverbrauch

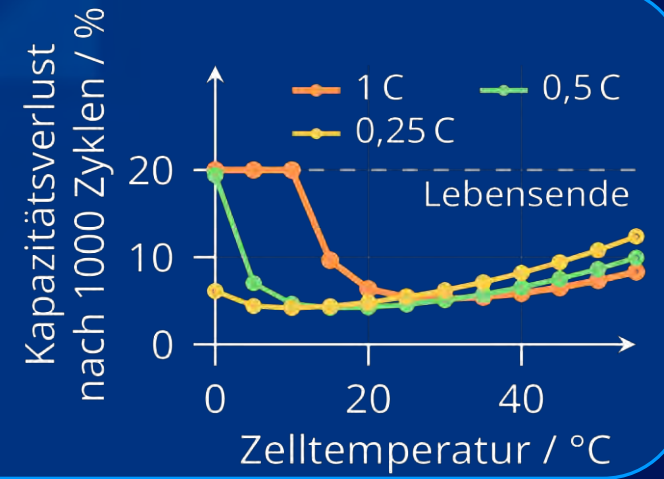
**Alterung**
Schnell bei hoher Temperatur, Leistungsverluste bei Kälte

**Weitere Verluste**
Konversion im Umrichter, Lüfter, Überwachung

# Alterung und Verluste hängen am Betriebspunkt

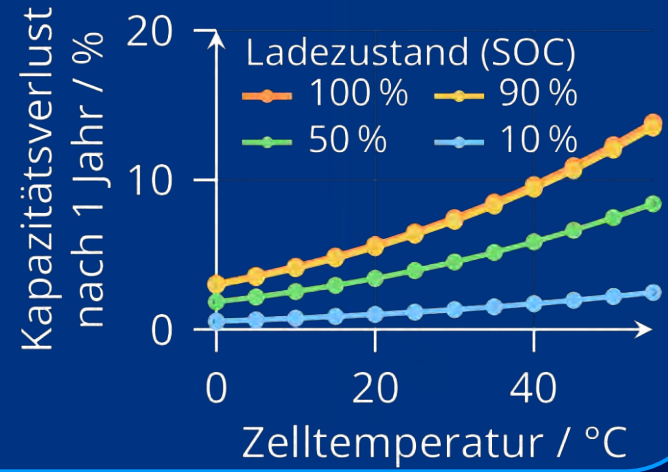
**1**

**Temperatur & Laderate**



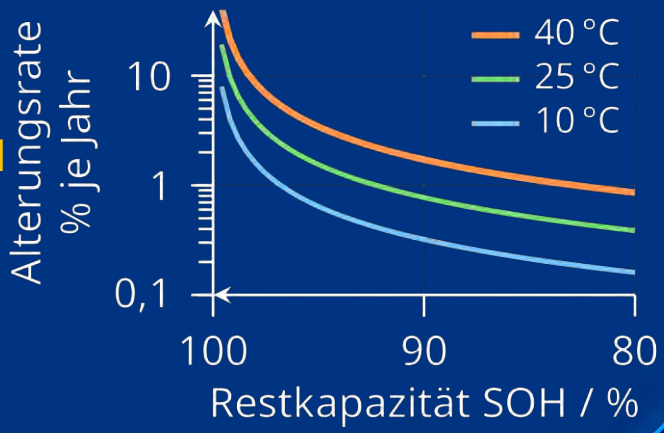

**2**

**Temperatur & Ladezustand**



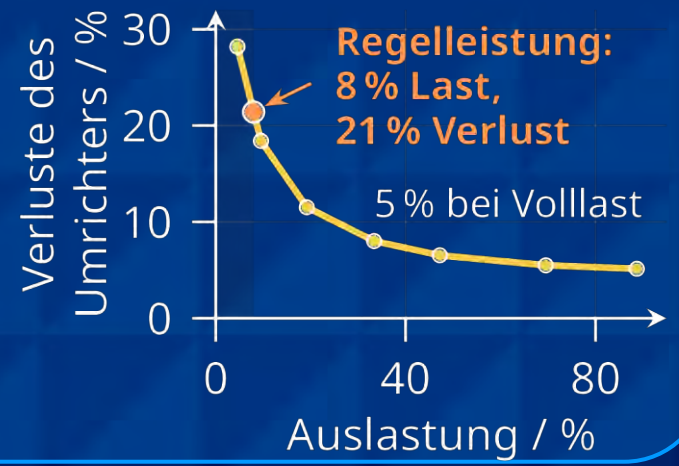

**3**

**Schadenszustand**




**4**

**Auslastung des Umrichters**



# Prädiktiver Betrieb: Vorausschauend planen und den optimalen Betriebspunkt bestimmen

## 1 Eingänge

**Was der Planer wissen muss**

**Wettervorhersage**
Außentemperatur, Sonneneinstrahlung

**Strompreisvorhersage**
erwarteter Preis der nächsten Stunden

**Einsatzplan**
Fahrplan des Handels, Grenzen von Netz & Anlage

**Anlagenzustand**
SOC, SOH, Temperaturen Parameter

## 2 Prädiktions-modell

**sagt das Verhalten der Anlage voraus**

### Anlagenmodell

**Batterie**
elektrisch und thermisch

**Alterung**
vier Mechanismen

**Container**
thermisches Netz

**Klimaanlage**
Verbrauch über den COP

**Umrichter**
Verlustkennfeld

## 3 Optimierung

**Modellprädiktive Regelung (MPC)**

### Ziel und Stellgrößen

**Ziel**
Erlös minus Verluste

**Stellgrößen**
Leistung, Klima, Lüfter

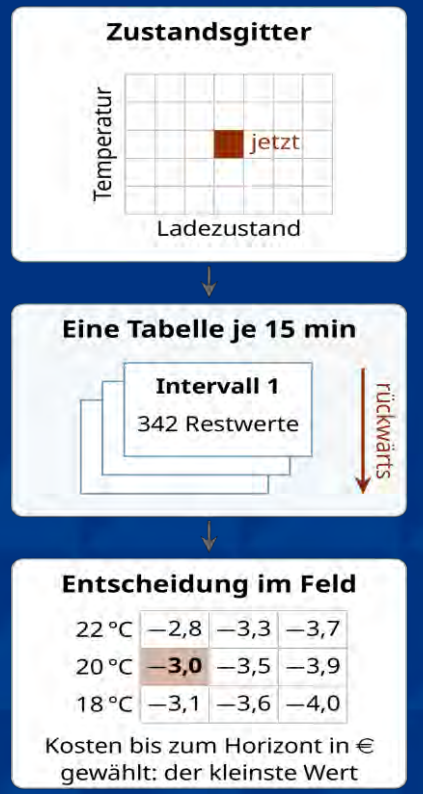
**Grenzen**
Ladezustand, Leistung

**Horizont**
rollierend neu geplant

**Fünf Kostenstufen**
1 Arbitrage
2 Konversion
3 Alterung
4 Klimastrom
5 Verschleiß

## 4 Lösungs-verfahren

**dynamische Programmierung**




$P_{AC}$ → Leistung

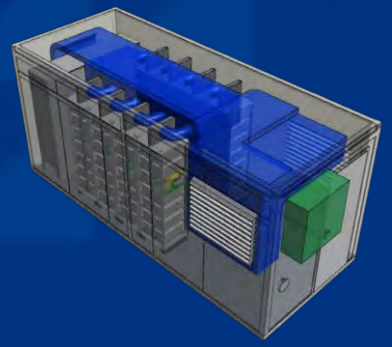
$T_{set}$ → Sollwert

$s$ → Lüfter

# Ergebnisse an der Referenzanlage: Fünf Kostenstufen in einem Ziel

## Virtuelle Referenzanlage

*real gebaut, vermessen, publiziert*



**LFP, ~192 kWh**
Container-Batteriespeicher

**Schimpe et al. 2018**
Daten der realen Anlage

**Model-in-the-Loop**
skaliert als virtuelle Anlage

## Zielfunktion: fünf Kostenstufen

*jede Stufe bepreist einen Verlust der Anlage*

**1 Arbitrage** Handelserlös

$$J_n^{(1)} = \left(P_{\mathrm{AC},n}\, p_{\mathrm{el},n} + |P_{\mathrm{AC},n}|\, c_{\mathrm{Sp}}\right) \Delta t$$

**2 Konversion** Verluste der Leistungselektronik

$$P_{\mathrm{DC}} = \frac{P_{\mathrm{AC}}}{n_{\mathrm{Rack}}} - P_{\mathrm{Loss,PE}}\left(\frac{P_{\mathrm{AC}}}{n_{\mathrm{Rack}}}, U_{\mathrm{DC}}, T\right)$$

**3 Alterung** Schaden der Zelle,

$$J_n^{(3)} = j_{\mathrm{Alt}}\left(T, \mathrm{SOC}, I\right) \Delta t$$

**4 Klimastrom** Verdichter und Lüfter

$$J_n^{(4)} = \left(\frac{\dot{Q}_{\mathrm{Rest}}}{\mathrm{COP}(T_{\mathrm{amb}}, T_{\mathrm{set}})} + P_{\mathrm{Lüfter}}(s)\right) \max\left(p_{\mathrm{el},n}, 0\right) \Delta t$$

**5 Verschleiß** Laufzeit des Verdichters

$$J_n^{(5)} = c_h\, \Delta t \cdot 1\{\dot{Q}_{\mathrm{Rest}} > 0\}$$

**Gesamtziel: Erlös minus Verluste**

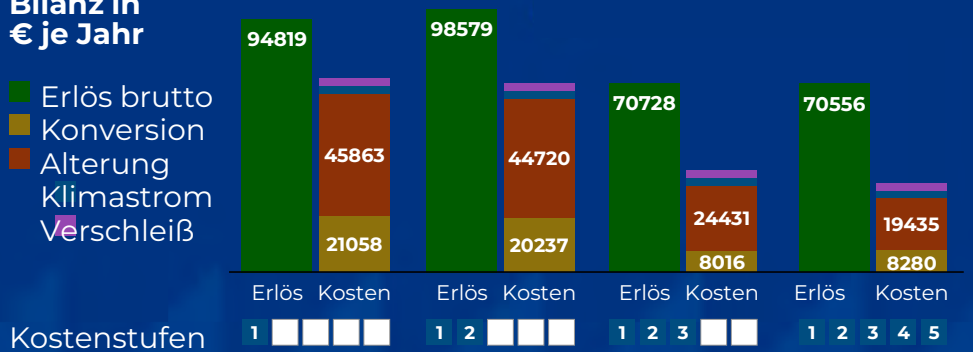
$$\max_{P_{\mathrm{AC}}, T_{\mathrm{set}}, s} \sum_{n=1}^{32} \left(J_n^{(1)} - J_n^{(3)} - J_n^{(4)} - J_n^{(5)}\right)$$

## Ergebnis: ein Jahr Day-Ahead, dieselbe Anlage

*von links nach rechts kommt Kostenwissen ins Ziel*

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Netto je Jahr | **+25527 €** | **+31253 €** | **+36681 €** | **+39956 €** |
| Lebensende in | **8,1 Jahren** | **8,4 Jahren** | **15,2 Jahren** | **17,0 Jahren** |
| Vollzyklen | 577 | 554 | 315 | 303 |

**Bilanz in € je Jahr**




| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Kostenstufen zugeschaltet | 1 | 1 2 | 1 2 3 | 1 2 3 4 5 |
| | **Arbitrage** blind | **+ Konversion** | **+ Alterung** | **+ Klimastrom + Verschleiß** |
| Schritt bringt Jahreslauf | **Basis** Fall 1 | **+5726 €** Fall 2 | **+5428 €** Fall 3 | **+3275 €** Fall 4 & 5 |

**Alterungsbewusster Regler handelt weniger und behält die Batterie mehr als doppelt so lang**

# Vom Papier ins Feld: Vielfältige Herausforderungen

## Prädiktiver Betrieb
**braucht …**

- **Wettervorhersage**
- **Strompreisvorhersage**
- **Einsatzplan**
- **Messdaten** Datenanbindung
- **Zustandsschätzung** SOC, SOH geschätzt
- **Parameteradaption** aktuelle Parameter
- **Anlagenmodell** je Container-Design
- **MPC** dyn. Programmierung

## Der Betreiber
**braucht …**

- **Visualisierung** im Leitstand
- **Datenbank** Zustandshistorie
- **Prädiktive Wartung** Residuen, Lebensdauer
- **Sicherheit** Anomalie-Erkennung
- **Co-Simulation** Was-wäre-wenn
- **Compliance** Garantie, Auflagen
- **Alarme, Ereignisse**
- **Berichte, Kennzahlen** Verfügbarkeit, Erlös

## Die Regulatorik
**verlangt …**

- **Batteriepass** Pflicht ab Februar 2027
- **$CO_2$-Fußabdruck** im Lebenszyklus
- **Produktpass** DPP nach ESPR
- **SOH und Lebensdauer** Nachweis im Pass
- **Lieferkette** Rohstoffe, Recycling
- **Netzanschlussregeln** Anlagenzertifikat

## Das System
**muss jeder kennen**

- **Datenblätter**
- **Typenschild** Hersteller, Typ
- **Zellchemie** LFP, 192 kWh
- **Topologie** Racks, Module, Zellen
- **Schnittstellen** Register, Adressen
- **Zertifikate, Normen**
- **Garantiebedingungen**
- **Wartungshandbuch**

## Jeder Dienst
**braucht auch …**

- **Dokumentation** was er tut, Grenzen
- **Konfiguration** Parameter, Gewichtung
- **Datenformate** Einheiten, Bedeutung
- **Datenabhängigkeiten** Ein- und Ausgänge
- **Versionierung**
- **Deployment, Updates**
- **Zugriffsrechte**

## Heute: je Anlage von Hand
**jeder Container einzeln**

- Datenblatt-Analyse
- Register-Mapping
- Eigene Gerätetreiber
- Parameter von Hand
- SOH-Algorithmen
- Isolierte Clouds
- Berichte und Audits

**Engpass Engineering**
Aufwand wächst je Anlage und Hersteller



## Sensoren und Messdaten

- Spannung, Strom, SOC
- Temperaturen: Zelle, Modul, Container
- Leistung: AC und DC
- Umgebung: Außentemperatur

## Die Anlage: Container-BESS
**mit ihr muss alles verbunden werden**



Modbus TCP · SunSpec · OPC UA · MQTT

## Aktoren und Steuerung

- Klimagerät: Sollwert, Lüfter
- Lade- und Entladeleistung
- Umrichter: Freigabe je Einheit
- Schutz, Verriegelung im Gerät

# Digitaler Zwilling: Verwaltungsschale, Eclipse BaSyx

## 1 Verwaltungsschale

jeden Aspekt der Komponente – als digitale Akte

**Verwaltungsschale**

**Gegenstand**
Batterie

- **Typenschild** — Hersteller · Typ · Seriennummer
- **Technische Daten** — Energie · Zellchemie · Spannung
- **Batteriepass** — $CO_2$ · Material · Kreislauf
- **Datenanbindung** — Register · Adressen · Einheiten
- **Dashboards** — SOC · SOH · Temperaturen

**Merkmale mit fester Bedeutung · Batterie: 18 Teilmodelle**

## 2 Eclipse BaSyx

Laufzeitumgebung – jeder Berechtigte greift zu

**Betreiber**
Zustand, Dashboards

**Dienste**
Messwerte, Stellgrößen

**Eclipse BaSyx**
Open-Source-Laufzeitumgebung

- **Repository** speichert die Schalen
- **Registry** findet sie per ID
- **REST-API · Web UI** Zugriff von überall

**Hersteller**
Typenschild, Doku

**Recycler**
Batteriepass, Behörden

**Zugriff nur mit Berechtigung – jede Rolle sieht und ändert nur, was sie darf**

## 01 PHYSISCHES SYSTEM



**Container-BESS**

- **Container** — Anlagenebene · MQTT
- **Batterie** — Modbus TCP
- **Umrichter (PCS)** — SunSpec
- **Klimagerät** — OPC UA

# Digitaler Zwilling: Standardisierter Rahmen für Anlage, Daten und Dienste

**04 DIENSTE**
je Dienst Container und Schale

**Zustand & Modelle**
- Zustandsschätzung
- Parameteradaption
- What-if-Simulation

**Prognose & Betrieb**
- Prognose
- **Prädiktiver Betrieb (MPC)**

**Lebensdauer & Sicherheit**
- Vorausschauende Wartung
- Sicherheit

**Nachweis & Pass**
- Compliance
- Passführung

**Daten & Sicht**
- Zeitreihenspeicherung
- Visualisierung

semanticId-Bindung

**austauschbar ohne Umbau, solange die Schale mitkommt**

registriert

**03 VERWALTUNGS-SCHALEN**
Eclipse BaSyx

**System-AAS „Container-BESS“**
Einstiegspunkt – verweist, kopiert nicht

verweist

**KOMPONENTEN-AAS · Hierarchical Structures**

**Batteriesystem**
Battery Passport · AID/AIMC · Modelle

**Klimagerät**
ESPR-Pass · AID/AIMC · HVAC-Modell

**Umrichter (PCS)**
Produktpass · AID/AIMC · $CO_2$

**ServiceRegistry**
Rolle · Id · Status je Dienst-AAS

Messwerte

Stellgrößen

Werte, Protokolle

Sollwert-Edit (Eventing)

**02 DATENINTEGRATION**

**DataBridge · MQTT-Broker · Zeitreihendatenbank**
Routen automatisch aus AID/AIMC generiert · Stellbefehl doppelt zugestellt: ans Gerät und als Protokoll in die Schale

**Feldprotokolle: MQTT · Modbus TCP · OPC UA · SunSpec**

**01 PHYSISCHES SYSTEM**



**Container-BESS**

**Container**
Anlagenebene · MQTT

**Batterie**
Modbus TCP

**Umrichter (PCS)**
SunSpec

**Klimagerät**
OPC UA

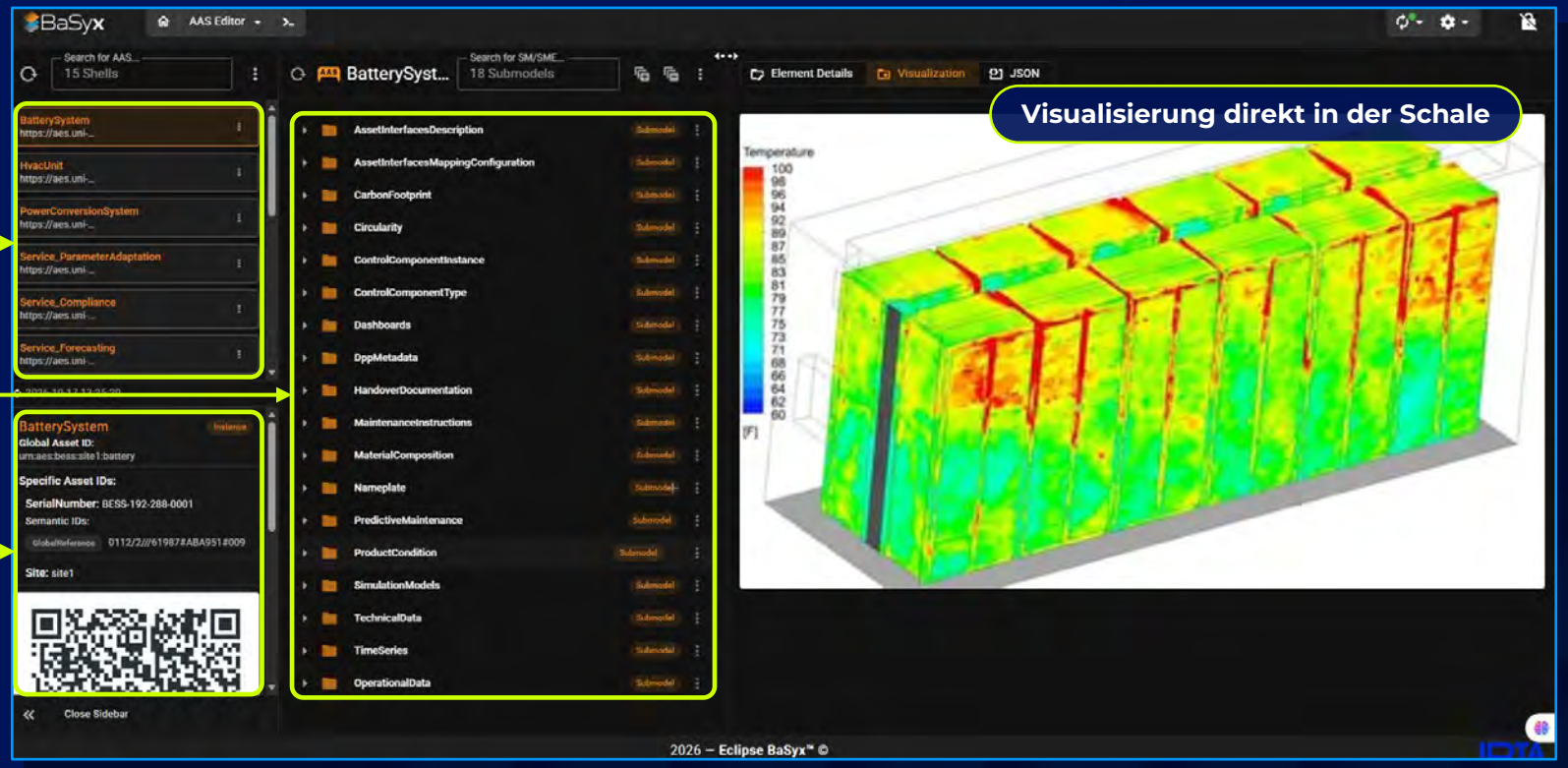
# Die Schale der Batterie: 18 Teilmodelle in Eclipse BaSyx

**Komponenten-Schale BatterySystem · Kennung, QR-Code und 18 Teilmodelle · Visualisierung direkt in der Schale**

**15 Schalen**
4 Komponenten und 11 Dienste in einer Umgebung

**18 Teilmodelle**
jedes deckt einen Aspekt der Batterie ab

**Kennung und QR-Code**
Global Asset ID, Seriennummer, Standort




**Standardisiert**
Teilmodelle nach IDTA-Vorlagen

**Batteriepass inklusive**
$CO_2$, Kreislauf, Materialien, DPP

**Selbst angebunden**
AID und AIMC beschreiben die Routen

**Ganzer Lebenszyklus**
Übergabe, Wartung, Zustand, Prognose

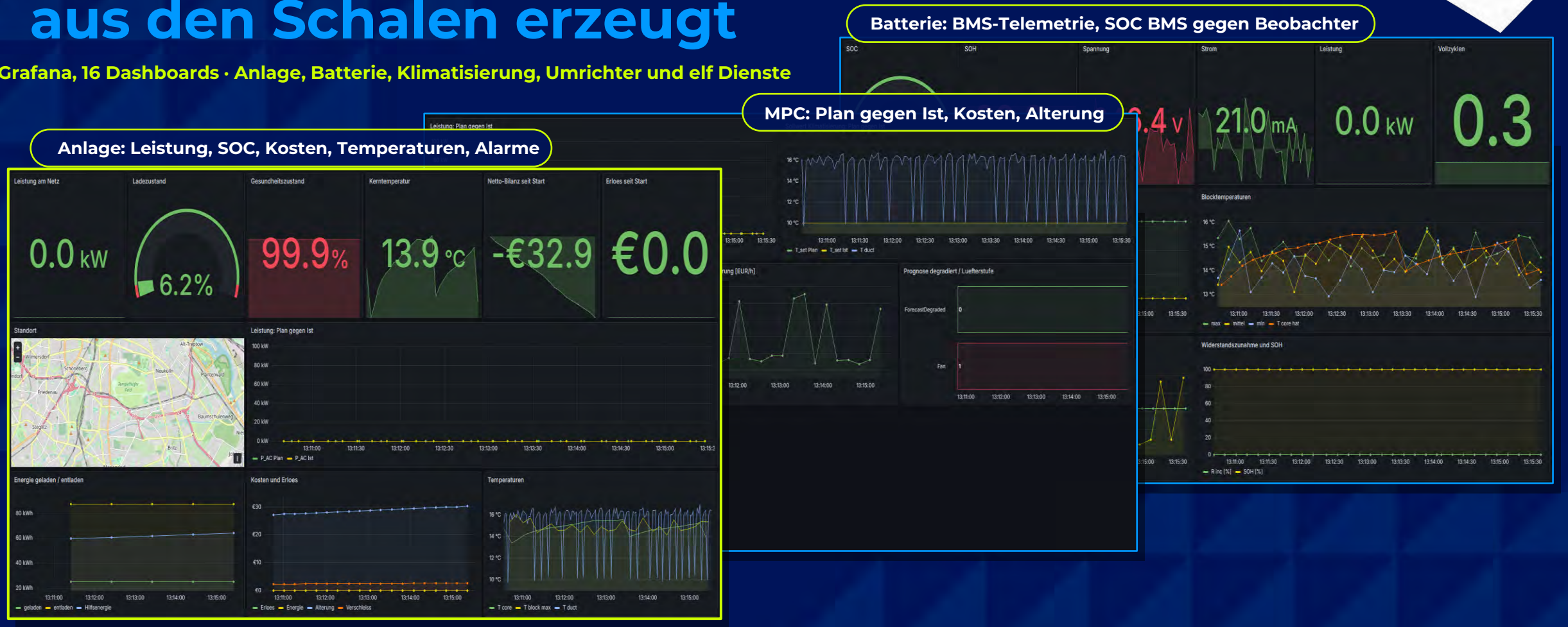
# Der Leitstand des Zwillings: Dashboards aus den Schalen erzeugt

**Grafana, 16 Dashboards · Anlage, Batterie, Klimatisierung, Umrichter und elf Dienste**

**Batterie: BMS-Telemetrie, SOC BMS gegen Beobachter**

**MPC: Plan gegen Ist, Kosten, Alterung**

**Anlage: Leistung, SOC, Kosten, Temperaturen, Alarme**




**Plan gegen Ist**
MPC-Stellgrößen neben Messwerten

**Alterung in Euro**
Grenzkosten und Netto-Bilanz laufend

**Automatisch**
Panels aus den Teilmodellen der Schale

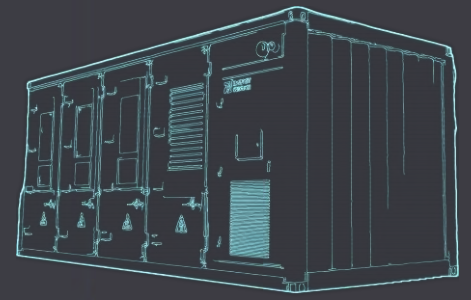
**Für alle**
Betreiber, Service, Audit im Browser

# Einschränkungen: Was der Zwilling heute nicht zeigen kann

HAUPTEINSCHRÄNKUNG

## Keine reale Anlage

Alle Ergebnisse stammen aus dem Model-in-the-Loop (~192 kWh LFP, nach Schimpe et al. 2018) – ohne Messrauschen, Geräteausfälle und gemessene Alterung.



DARAUS FOLGT …

1

**Parameter aus der Literatur**

nach Naumann und Schimpe, nicht an eigenen Messungen kalibriert

2

**Herstellerdaten fehlen**

Datenblätter, Registerlisten und AID/AIMC sind nachgebildet

3

**Standards nicht im Feld erprobt**

Batteriepass, DPP und Teilmodelle nur mit simulierten Daten

4

**Keine Flotte, kein Dauerbetrieb**

Skalierung, IT-Sicherheit und Langzeitbetrieb ungetestet

**Nächster Schritt: Validierung an einer realen Anlage – eine Pilotanlage adressiert alle vier Folgen**

Zusammenfassung

# Was Prädiktiver Betrieb und Digitaler Zwilling bringen

**Jahresnetto an der 2-MWh-Anlage**

**+25.527 € → +39.956 €**

**Lebensende der Batterie**

**8,1 Jahre → 15,2 Jahre**

### Prädiktiver Betrieb (MPC)
der Planer

**Alle Verluste in einem Ziel**
Arbitrage, Konversion, Alterung, Klima, Verschleiß

**Thermik mitgeplant**
Leistung, Klima und Lüfter gemeinsam optimiert

**Vorausschauend**
Preis, Wetter, Fahrplan – rollierend neu geplant

**Alterung in Euro sichtbar**
Grenzkosten und Bilanz laufend im Leitstand

### Der Zwilling
Verwaltungsschale & Eclipse BaSyx

**Zentraler Zugang**
Schalen, Daten und Dashboards in der Web UI

**Dienste im Blick, austauschbar**
Konfiguration und Zustand sichtbar, ohne Umbau

**Gemeinsam montierbar**
Partner liefern und kontrollieren ihre Teile

**Standardisiert und generiert**
IDTA-Teilmodelle, Routen aus AID/AIMC

**Grenze heute:** keine reale Anlage · **Nächster Schritt:** Validierung im Feld

EnFo Saar

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

EnFo Saar

www.enfosaar.de

htw saar

UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

IZES Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme

dfki ai

Gefördert aus dem Transformationsprogramm Forschung und Wissens-transfer Saar durch:

Ministerium der Finanzen und für Wissenschaft SAARLAND