
INNOVATIVE TECHNOLOGIEN FÜR DEZENTRALE INTELLIGENTE ENERGIESYSTEME

Fraunhofer IISB Schottkystrasse 10, 91058 Erlangen
Dr. Richard Öchsner



Fraunhofer IISB: Standort Erlangen



Fraunhofer Gesellschaft

- Angewandte Forschung
- Ca. 30.000 Mitarbeitende
- 76 Forschungsinstitute
- Jährliches Budget: 2.9 Mrd. €



Fraunhofer IISB

- Institutsleiter: Prof. Jörg Schulze
- Forschungsfelder:
 - Halbleitertechnologie (Si & SiC)
(1000m² Reinraum Klasse 10)
 - Leistungselektronische Systeme
- Kooperation mit der FAU (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg)
- Mitarbeitende: ca. 280
- Budget: ca. 25 M€/Jahr
 - 30% öffentliche Förderung
 - 70% Projekterträge
- www.iisb.fraunhofer.de



Inhalt

- Motivation
- Monitoring und Datenanalyse als Voraussetzung
- Reallabor am IISB
- Eingesetzte Technologien
- Energiesystemoptimierung
- Steuerung und Betriebsstrategien
- Zusammenfassung

Motivation

- Typische Infrastrukturen in der Industrie bestehen aus **verschiedenen Energiesektoren**
 - Strom (AC und DC)
 - Wärme und Kälte
 - Gas (z. B. Erdgas, Wasserstoff)
 - Weitere (z. B. Druckluft, Vakuum, Medien)
- Die Sektoren sind über verschiedene Anlagen (z. B. Wärmepumpe, Kältemaschine und BHKW) gekoppelt → **Sektorenkopplung**
- In System sind hohe **Kosten- und CO₂-Einsparungen** möglich durch
 - Erhöhung der Effizienz von Anlagen und des gesamten Systems
 - Abhängig von Strompreismodell, z.B. durch Lastspitzenreduktion, intensive Netznutzung
- **Intelligentes Energiemanagementsystem** → Berücksichtigung der relevanten Wirkzusammenhänge zwischen den Sektoren bei Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung und Effizienzerhöhung



Energiesysteme

Warum dezentral und intelligent - Auswirkungen?

- **Dezentral**

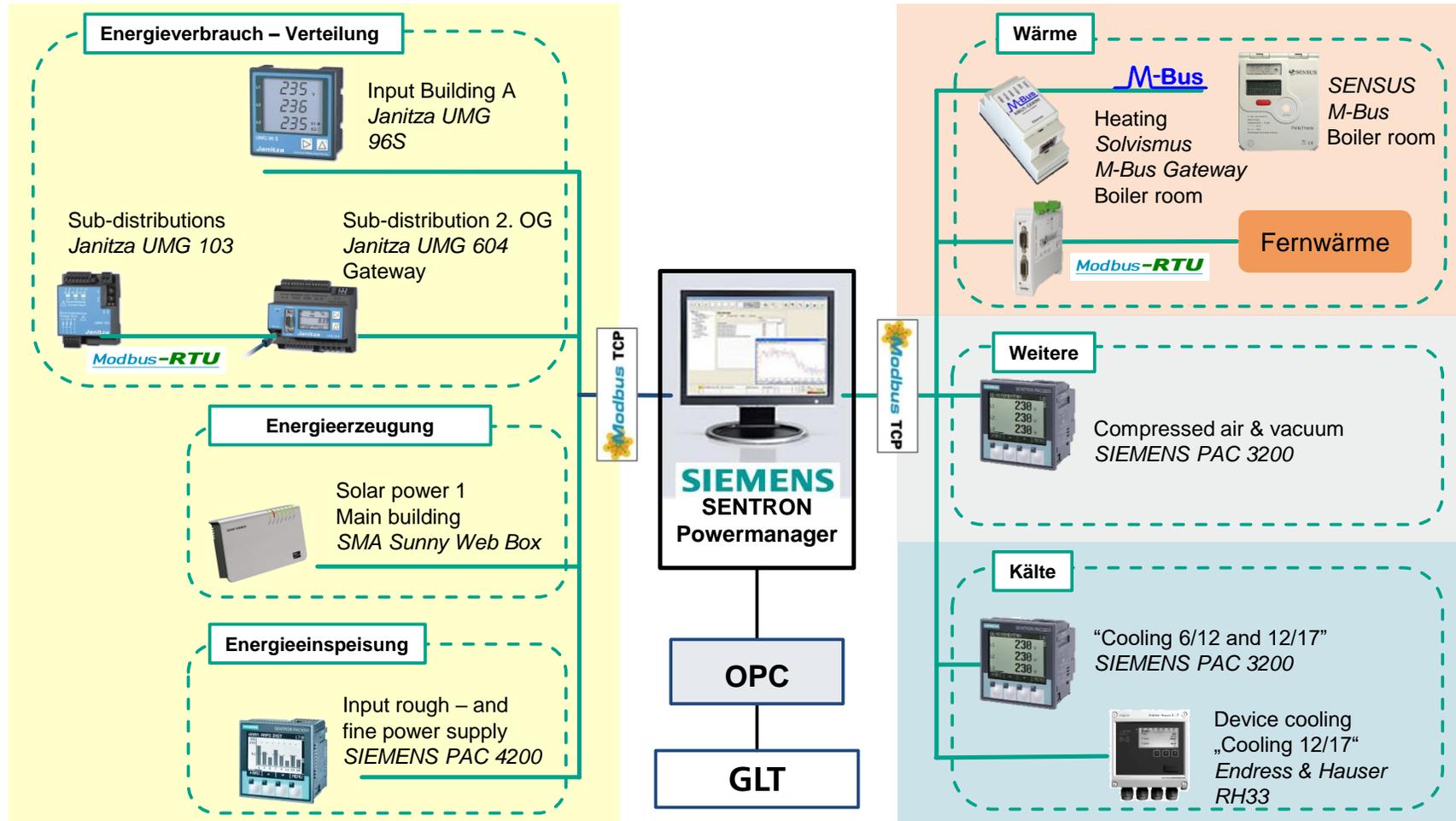
- Erreichen einer gewissen Unabhängigkeit und Entlastung der Netze
- Erhöhung der Energieeffizienz und Flexibilität
- Dezentrale Energieerzeugung, -speicherung, -verteilung und -verbrauch
- Dezentrale Integration von Erneuerbaren Energien und von verschiedenen Speichern
- Speicher stellen zusätzliche Freiheitsgrade bereit (z.B. Trennung von Erzeugung und Verbrauch)

- **Intelligent**

- Effiziente Kopplung von Teilsystemen und Sektoren
- Entwicklung von energieeffizienten und kostenoptimierten Betriebsstrategien, z.B. Lastspitzenreduzierung
- Flexible Anpassung der Energieinfrastruktur an Produktionsbedingungen
- Prognose-basiert und Weiterentwicklung zu selbstlernenden Systemen durch ML und KI

Energiemonitoring-System

Schematischer Aufbau am IISB



Energiemonitoring

Lastganganalyse

- Inhalte und Ziele einer Lastganganalyse
 - Berechnung von **Kennzahlen** (z. B. Lastspitze, Energiebedarf, Benutzungsdauer)
 - Aufdeckung von **Verhaltensmustern** (z. B. Schichten, Heizungs-Anforderung)
 - Analyse von Anlagenfahrplänen
 - Ermittlung von Zusammenhänge im Energiesystem sowie von **Einflussgrößen**
 - Detektion von fehlerhaftem und ineffizientem Anlagenverhalten (z. B. hoher \dot{V} bei niedrigem $\Delta\vartheta$)
 - etc.
- **Lastganganalysen** sind nicht nur für die elektrische Bezugsleistung möglich und sinnvoll, sondern auch für Wärme-/ Kälteprofile, PV-Erzeugungsprofile etc.
- Lastganganalysen werden durch ML (Machine Learning) unterstützt, z. B. bei der Extraktion von Eigenschaften und Kennzahlen oder Ermittlung von Anomalien
- Weiterführende Anwendung: Erstellung von Prognosen mittels ML-Verfahren

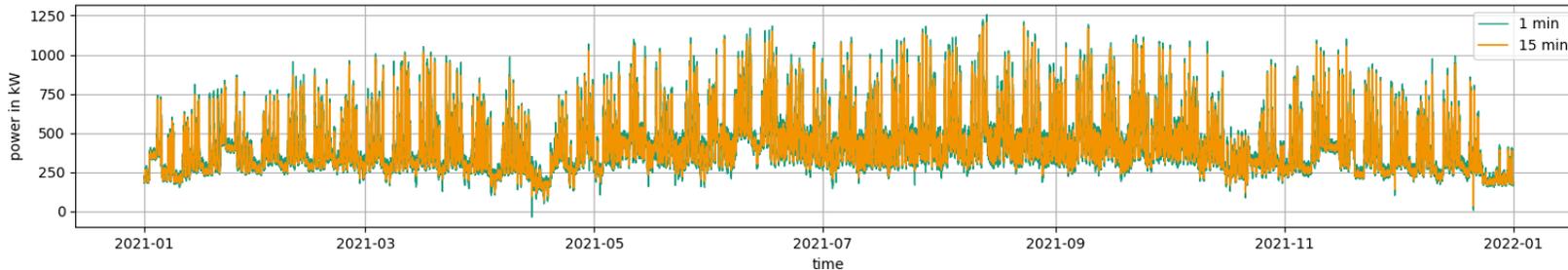
Auswertung eines Lastgangs

Messung am Netzanschlusspunkt (20 kV-Netz)

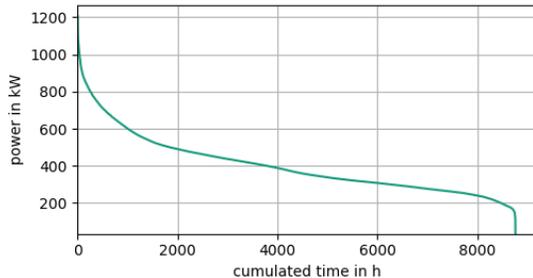
- Analyse von Daten am Fraunhofer IISB
- Datenbasis: Energiemonitoring-System
- Analyse mit dem Lastganganalyse-Tool - Jahresverlauf

Analysis for <IISB_Bezug_elektr_2021.xlsx>

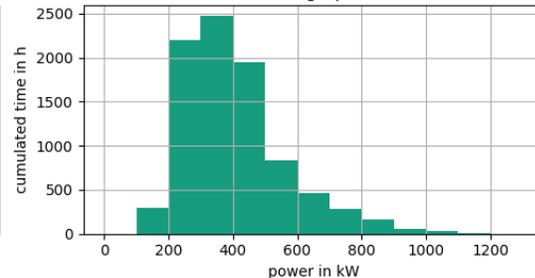
Input load profile



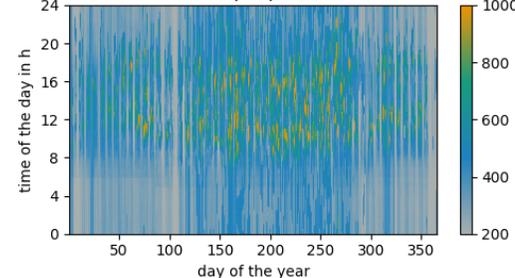
Duration curve



Bar graph



Carpet plot



Key figures

Descr.	Value	Unit
Energy content	3541.89	MWh
Max. peak	1205.88	kW
Mean power	404.33	kW
Min. power	35.20	kW
Usage period	2937.2	h
Time range	8760.0	h
Power range	1170.7	kW



Load profile Analysis Tool

- Different plot types (e.g., time series, duration curve, box plot, carpet plot, bar graphs)
- Different analysis (e.g, KPIs, load peaks)

Free available at: www.proenergie-bayern.de/de/veroeffentlichungen.html

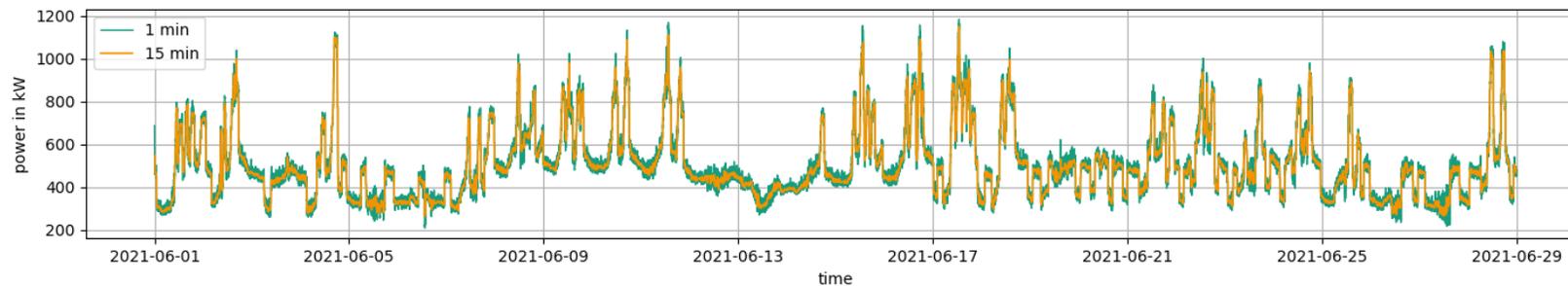
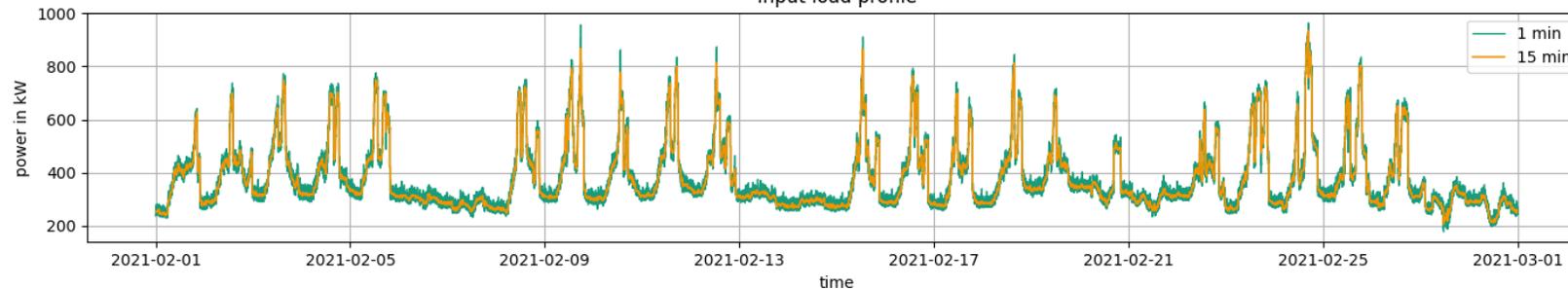
Auswertung eines Lastgangs

Messung am Netzanschlusspunkt (20 kV-Netz)

- Analyse von Daten am Fraunhofer IISB
- Datenbasis: Energiemonitoring-System
- Analyse mit dem Lastganganalyse-Tool - Monatsverlauf

Analysis for <IISB_Bezug_elektr_2021.xlsx>

Input load profile



Load profile Analysis Tool

- Different plot types (e.g., time series, duration curve, box plot, carpet plot, bar graphs)
- Different analysis (e.g., KPIs, load peaks)

Free available at: www.proenergie-bayern.de/de/veroeffentlichungen.html

Vergleich der Zeitreihen für die bezogene Leistung

- Februar
- Juni

Auswertung eines Lastgangs

Messung am Netzanschlusspunkt (20 kV-Netz)

- Analyse von Daten am Fraunhofer IISB
- Datenbasis: Energiemonitoring-System
- Analyse mit dem Lastganganalyse-Tool:
Balkendiagramm für Leistung und Lastspitzen (Monatsbasis)

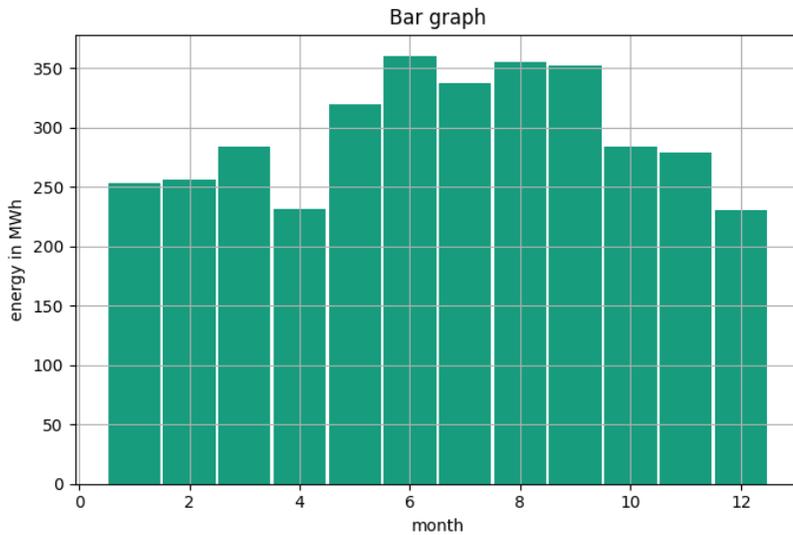


Load profile Analysis Tool

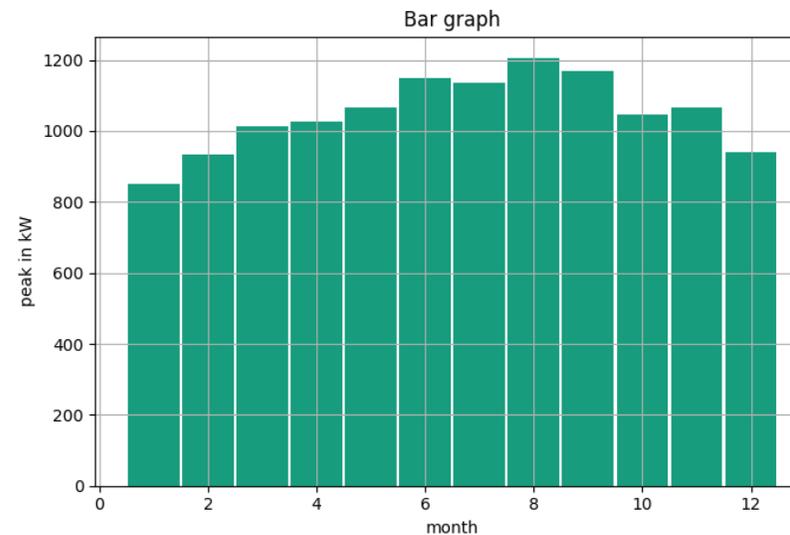
- Different plot types (e.g., time series, duration curve, box plot, carpet plot, bar graphs)
- Different analysis (e.g, KPIs, load peaks)

Free available at: www.proenergie-bayern.de/de/veroeffentlichungen.html

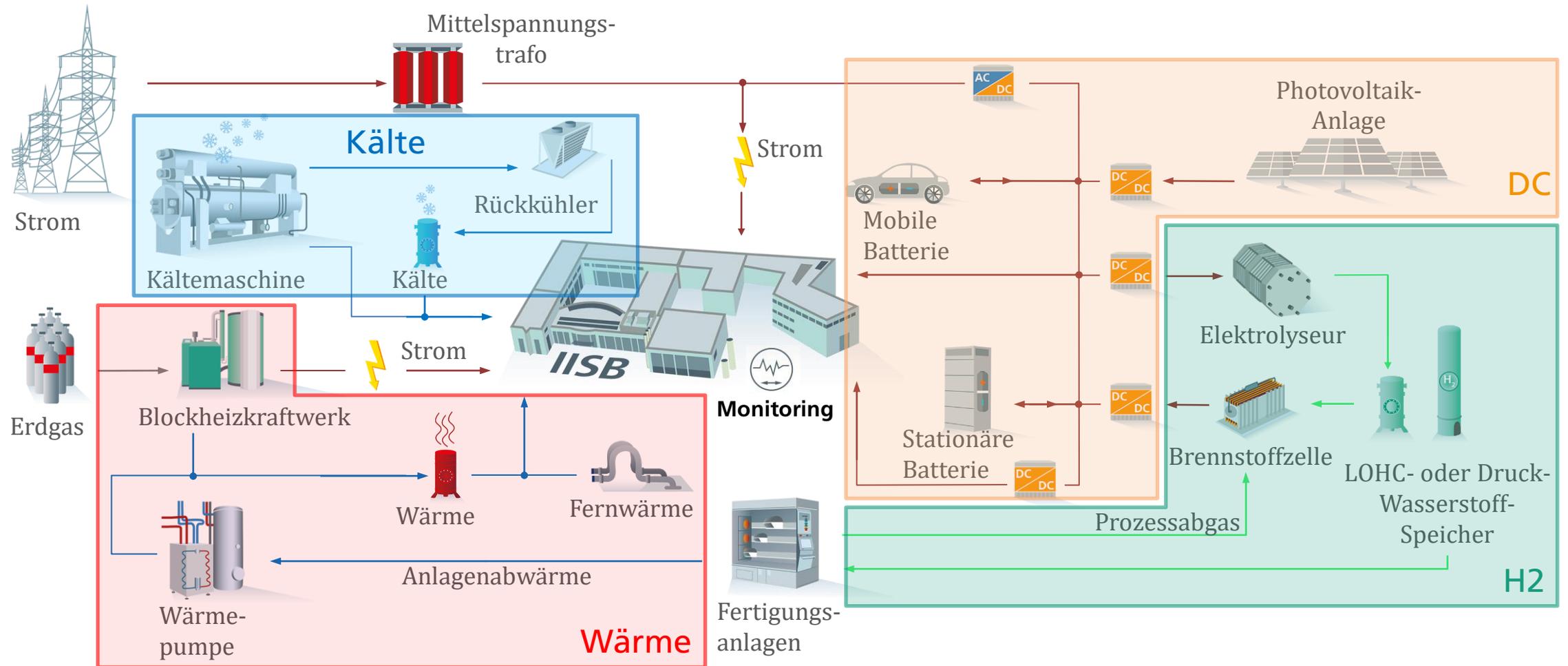
Analysis for <IISB_Bezug_elektr_2021.xlsx>



Analysis for <IISB_Bezug_elektr_2021.xlsx>



Reallabor am Fraunhofer IISB als intelligentes dezentrales Energiesystem

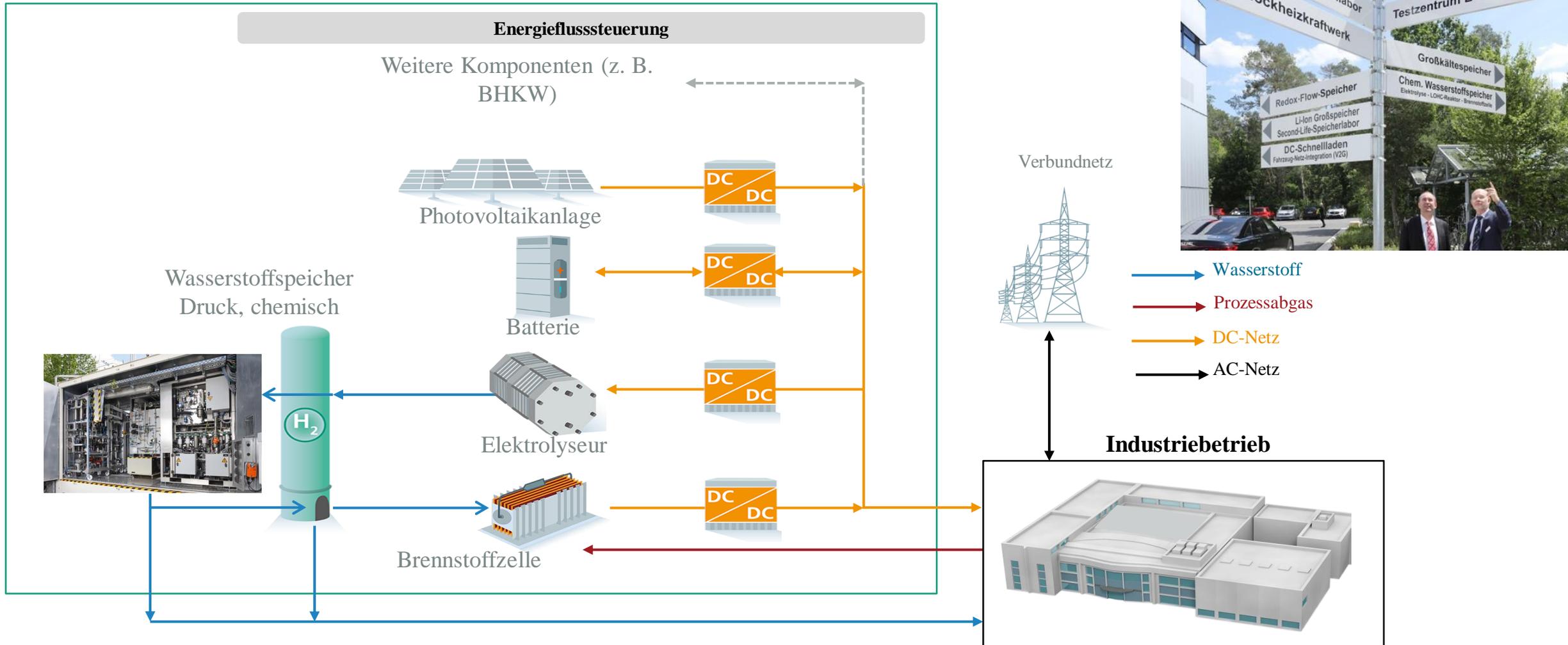


Forschungs- und Demonstrationsplattform für dezentrale, sektorenggekoppelte Energiesysteme

Ziele: Energieeffizienz ↑, Anteil Erneuerbarer Energien ↑, intelligentes Lastmanagement usw.

Stationäres Wasserstoffsystem

Hybrides Wasserstoffsystem am IISB



Eingesetzte Technologien und Teilsysteme

PV-Forschungsanlage

- Einsatzzweck und technische Daten
 - Untersuchung des Einflusses von PV-Einspeisespitzen auf den Lastgang
 - Eigenerzeugung (CO₂-Reduzierung) und Speicherung
 - Einspeisung ins interne AC-Netz sowie Einspeisung in das lokale DC-Netz
 - vollständiger Eigenverbrauch
 - insgesamt ca. 230 kW_p - davon 175 kW_p mit O-W-Ausrichtung
 - Ertragsprognose von ca. 190 MWh/a erreicht



Forschungs- und Demonstrationsplattform

Speicher als wesentliches Element

- Elektrische Speicher (stationäre und mobile Lithiumionen, Redox-Flow)
- Thermische Speicher (sensible Wärme- und Kältespeicher)
- Wasserstoffspeicher (Druckspeicher, chemische Speicher (LOHC))
- Anwendung der Speicher:
 - Spitzenlastreduzierung (z.B. Vorhaltung von Reservekapazität)
 - Laufzeitverlängerung BHKW
 - Betriebspunktoptimierung (Effizienzverbesserung)
 - Effizienzerhöhung der freien Kühlung



Maßnahmen am Wärmesystem des IISB

Kraft-Wärme-Kopplung – BHKW

- Einsatzzweck:
 - Eigenerzeugung von Wärme und Strom:
 - Deckung von ca. **22%** des **Strom-** und ca. **50 %** des **Wärmebedarfs**
 - Energiekostenreduktion** von **18 %**
 - Amortisation in ca. **3 Jahren**
 - Elektrische Lastspitzenreduktion
 - Reservierung von Pufferkapazität für Lastspitzenfall
 - Mindestbetriebsdauer auch bei fehlendem Wärmebedarf
- Inbetriebnahme Mitte März 2019



Forschungs- und Demonstrationsplattform

Anwendung BHKW und Wärmepumpe

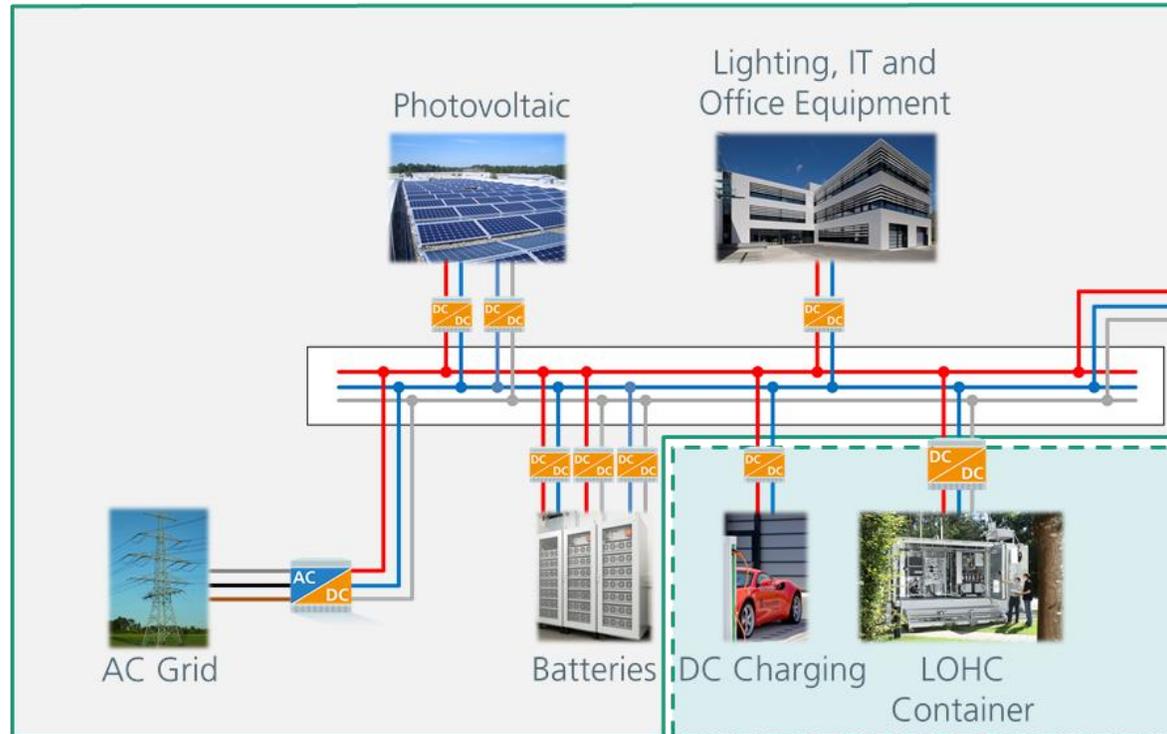
- Einsatzzweck BHKW mit Wärmespeicher
 - Erhöhung des Anteils der Eigenerzeugung für Wärme und Strom
 - Nutzung für Lastspitzenreduktion mit eigenen Algorithmen und eigener Steuerung in Verbindung mit einem sensiblen Wärmespeicher
- Einsatzzweck Wärmepumpe
 - Wärmeerzeugung für Klimatisierung
 - Nutzung der Restwärme der Fortluftanlagen
 - Lastabwurf bei elektrischen Lastspitzen



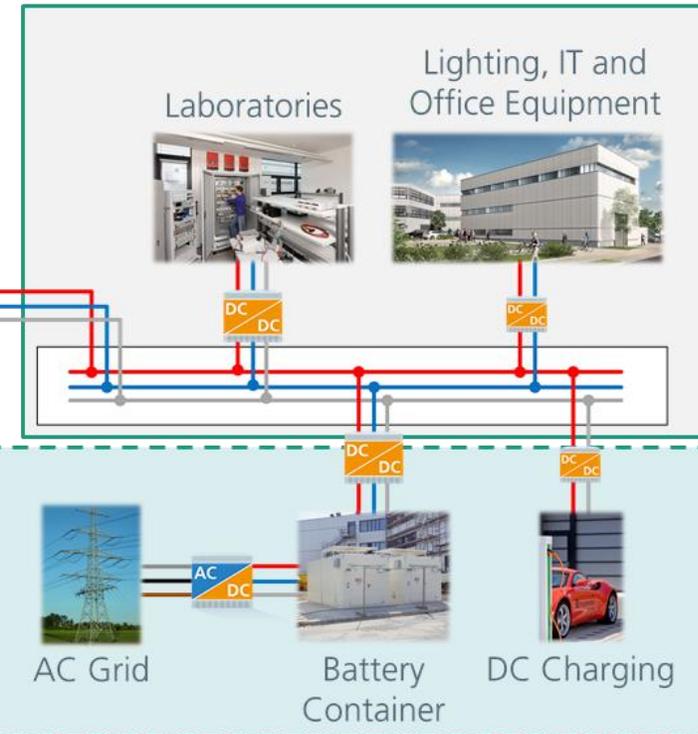
High-Power DC Grid am Fraunhofer IISB

Netzausdehnung und lokale (autarke) Subnetze

Building A



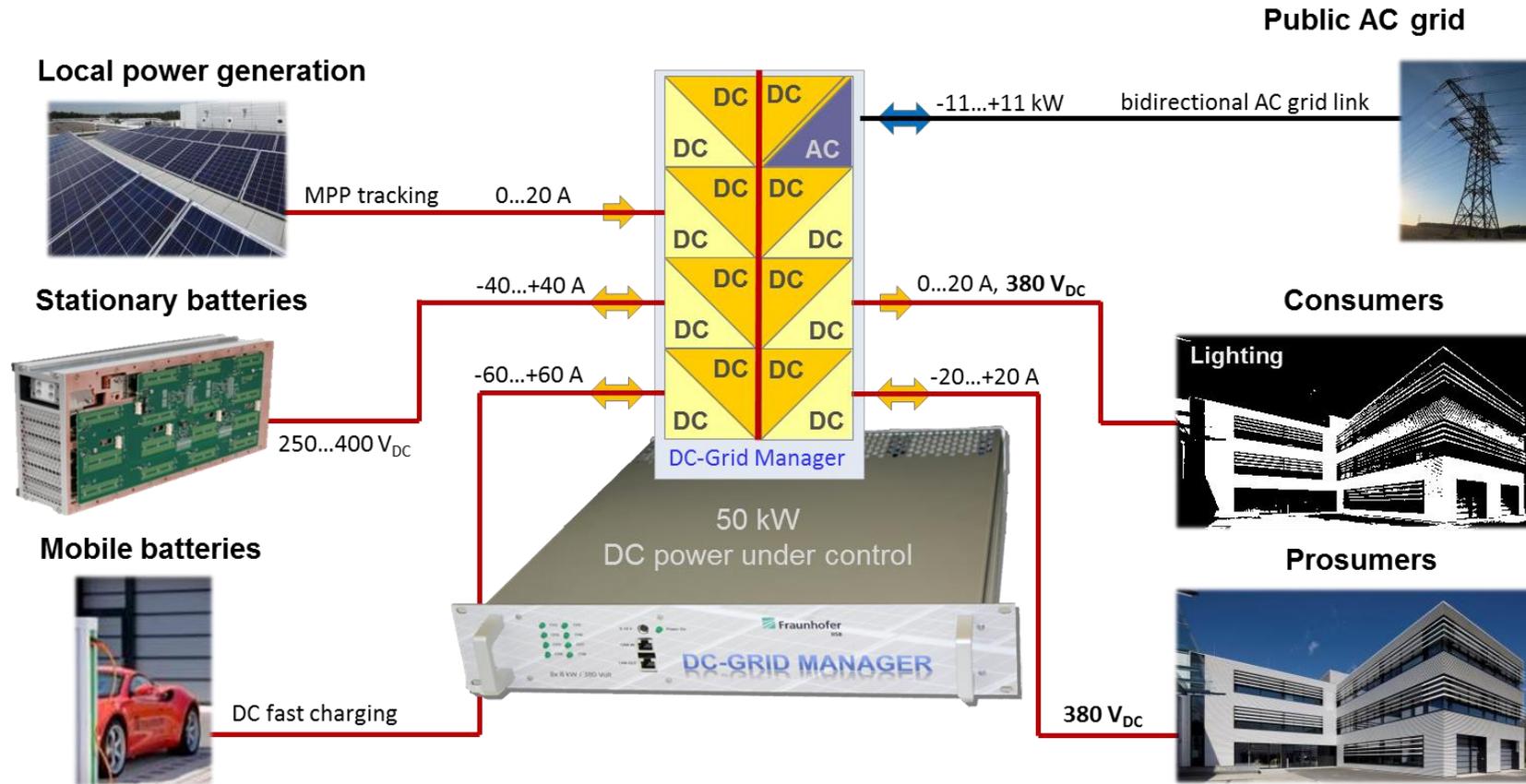
Building B



Outdoor Installations

DC-Grid-Manager

Intelligente, lokale "Plug and Play"-Lösung für kleine LVDC-Microgrids



Innovative Integration der LOHC-Technologie in Energiesysteme

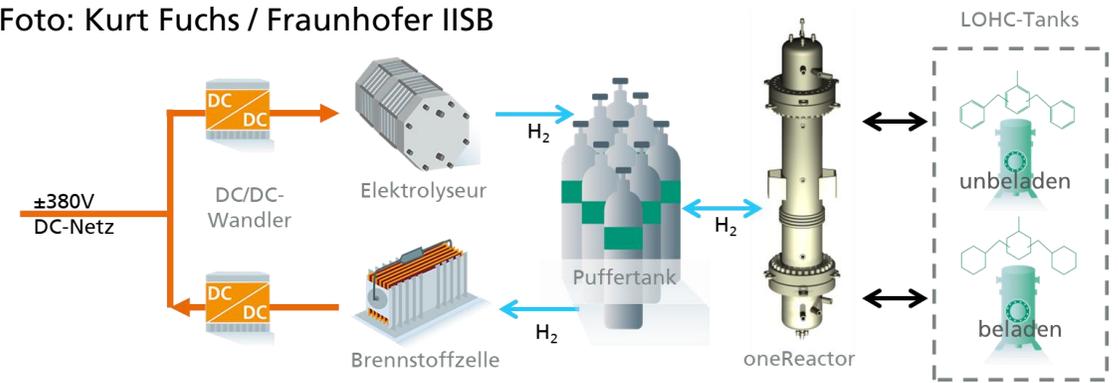
LOHC-Forschungsplattform (in Betrieb seit 2018)

- Kompletter Systemaufbau für Ein- und Ausspeicherung elektrischer Energie in einem 20 Fuß-Container
- Kompakte und sichere Speicherung von Wasserstoff in flüssigen organischen Wasserstoffträgern (LOHC), oneReactor entwickelt von der Universität Erlangen-Nürnberg (Lehrstuhl CRT)
- Elektrolyseur und Brennstoffzelle (beide 25 kW) auf Basis der Polymerelektrolytmembran (PEM)-Technologie
- Einbindung in das DC-Netz des Fraunhofer IISB

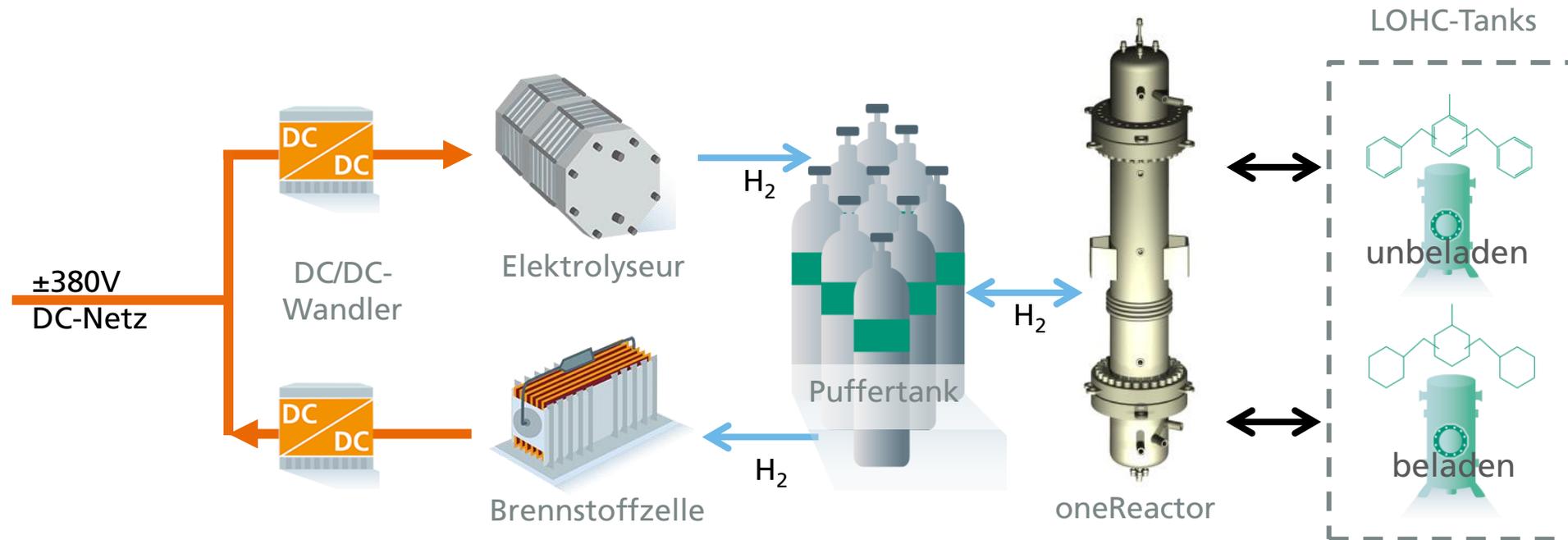
- Forschungsaktivitäten und Kooperationsmöglichkeiten
 - Optimierte Integration der LOHC-Technologie in mobile und stationäre Energiesysteme
 - Betriebsstrategien für einen hybriden, dynamischen Betrieb von Elektrolyseur und Brennstoffzelle in Kombination mit LOHC-Reaktor



Foto: Kurt Fuchs / Fraunhofer IISB



LOHC-Container Systemaufbau



- Einsatz der PEM (Polymer Elektrolyt Membran)-Technologie für Brennstoffzelle und Elektrolyseur
- Hydrierung und Dehydrierung des LOHC innerhalb des sogenannten „oneReactor“ → Novum
- Anbindung an DC-Netz durch effiziente DC/DC-Wandler (entwickelt und gebaut am Fraunhofer IISB)
- Sichere Speicherung des Wasserstoffs im flüssigen Trägerstoff (liquid organic hydrogen carrier, LOHC)

Wasserstofftesteinrichtungen

Wasserstoff- und Brennstoffzellenteststände

- **Brennstoffzellentestlabore**
- **Wasserstoffteststand**
 - **Analyse von Brennstoffzellensystemen** betrieben mit wasserstoffreichen Gasgemischen (z.B. Abgase aus Epitaxieprozessen im Reinraum)
 - **Integration und Charakterisierung** von Wasserstoffsystemen mit Brennstoffzellen(stacks) und Elektrolyseuren (z.B., Effizienz, Wasserstoffqualität) sowie Batteriesysteme



Optimierung der energetischen Infrastruktur

- Grundvoraussetzung ist ein **intelligentes Monitoring** und eine Identifizierung der wesentlichen Verbraucher sowie Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz
- Erhöhung der **Eigenenergieerzeugung** z.B. durch PV, Windenergie, BHKW, Abwärmenutzung in Verbindung mit Wärmepumpen usw.
- **Erhöhung der Effizienz** besonders im Kälte- und Wärmebereich
 - Effizientere Kälteerzeugung: z.B. Schraubenverdichter durch Turboverdichter ersetzen
 - Freie Kühlung nutzen
 - Abwärme von Anlagen (Luftkompressoren, Kältemaschinen, Abluft, Anlagen, ...)
- **Speicher** in unterschiedlichen Bereichen
 - Sensible Kälte- und Wärme, Betonkernaktivierung, ...
 - Stromspeicher (Lithium (stationär und mobil), Redox-Flow (Vanadium))
 - (Wasserstoff)

Energiesystemoptimierung Simulation

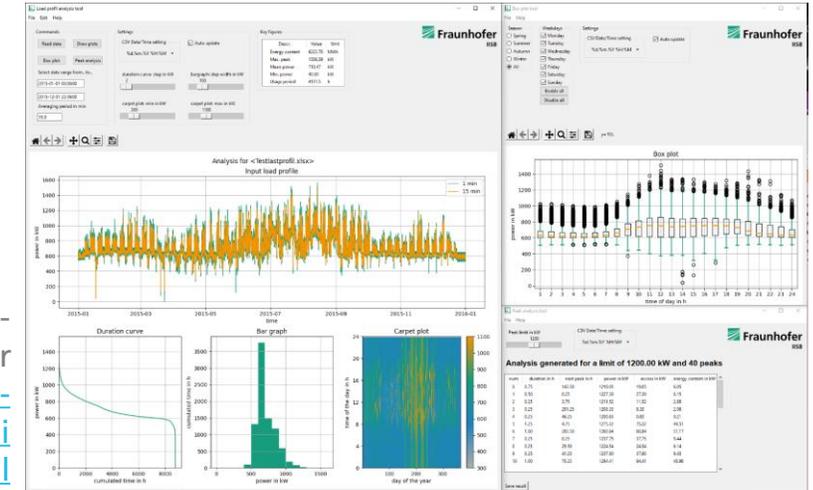
■ Energiesystem-Simulation

- Datenanalysemethoden und Tools
- Modelbibliotheken für energierelevante Anlagen und Komponenten, z.B. für Energiespeicher, Wärmepumpen, Kältemaschinen, BHKW, PV-Anlagen, Wärmerückgewinnung usw.
- Dimensionierungsalgorithmen für Anwendungen wie Lastspitzenreduzierung und Erhöhung der Eigenenergieerzeugung

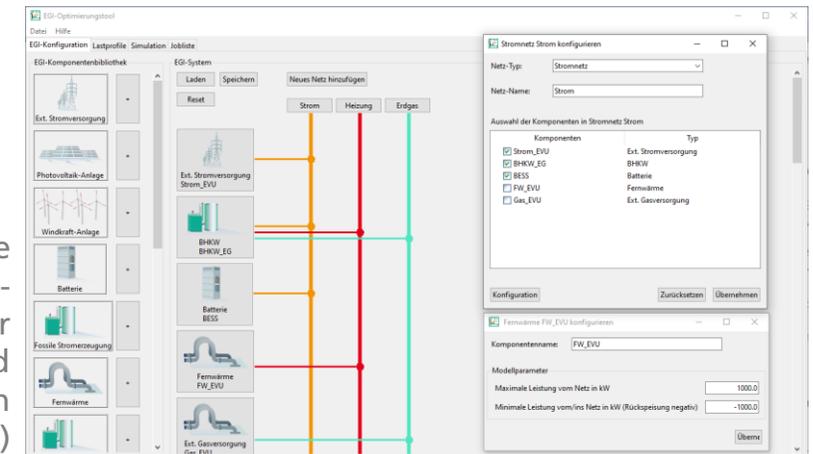
→ Nicht-invasive Optimierung von Energiesystemen mittels aller relevanten Energiesektoren

→ Szenario-basierte Studien mit Anpassungen und Erweiterungen

Freies Lastprofil-Analyse-Tool, online verfügbar
<https://www.proenergie-bayern.de/de/veroeffentlichungen.html>



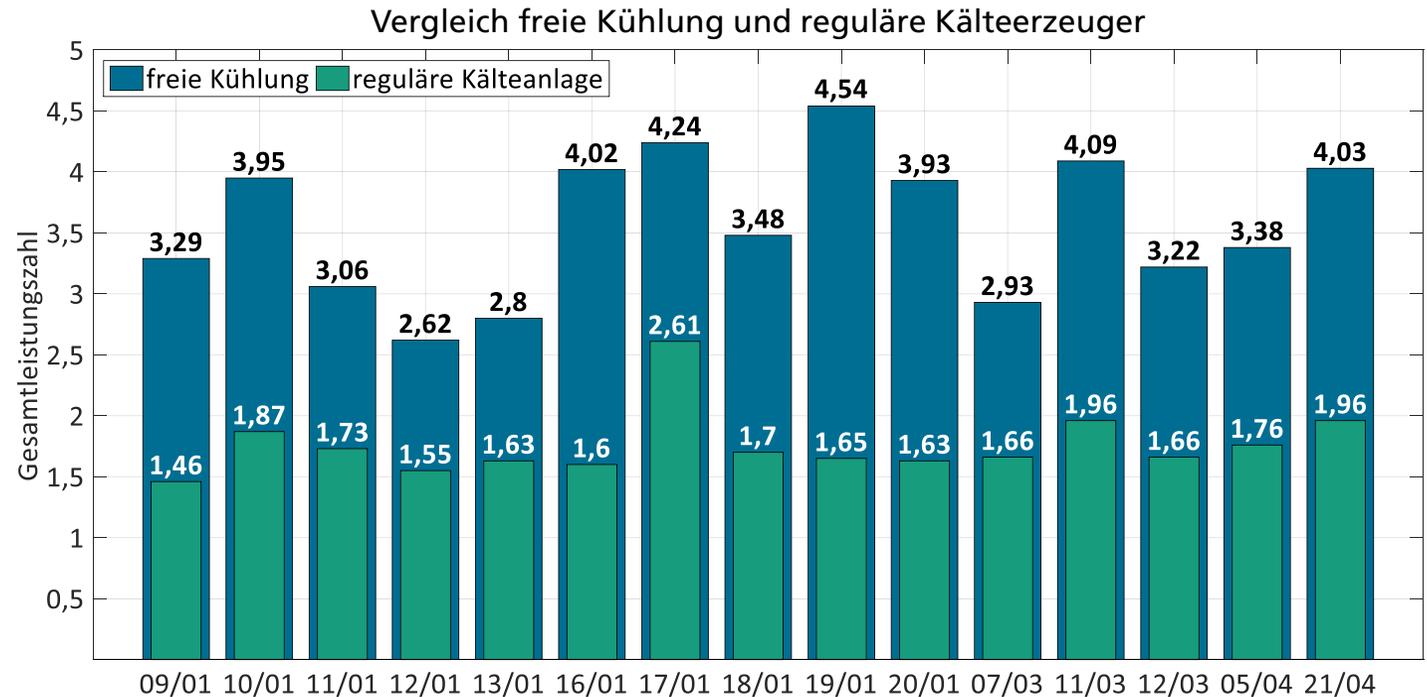
Simulations-Tool für die energetische Gebäudeinfrastruktur basierend auf einer Komponentenbibliothek und intelligenten Betriebsstrategien (Projekt: ProEnergie – Bayern)



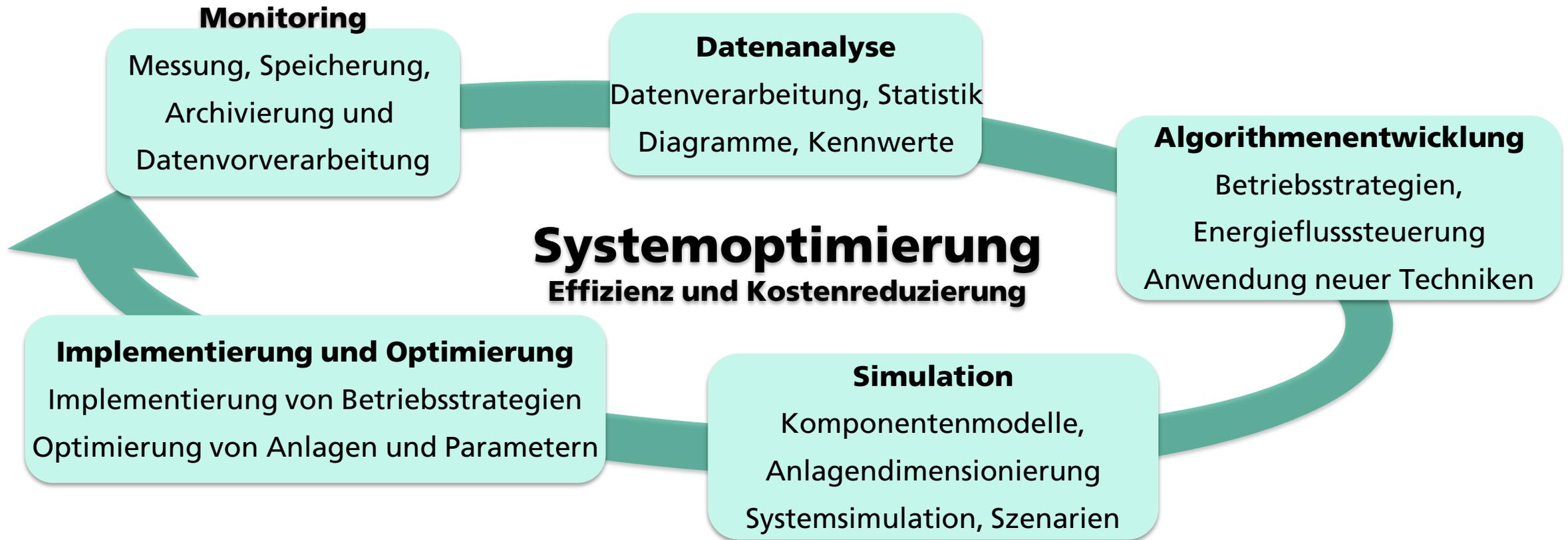
Optimierung des Kältesystems 12/17 am IISB

Freie Kühlung - Ergebnisse

- Feldversuche mit freier Kühlung an kalten Tagen
- Simulative Berechnung des Verbrauchs der Kälteerzeugung bei Verwendung der regulären Kälteanlage
- **Energieeinsparung** bei Betrieb im Mittel von fast **50%** erreicht
- **Reduktion des Jahresverbrauchs** der Kälteerzeugung an Strom um **12%** möglich



Genereller Ansatz für Daten-basierte Optimierung von Energiesystemen und intelligentes Energiemanagement



Steuerung und Betriebsstrategien

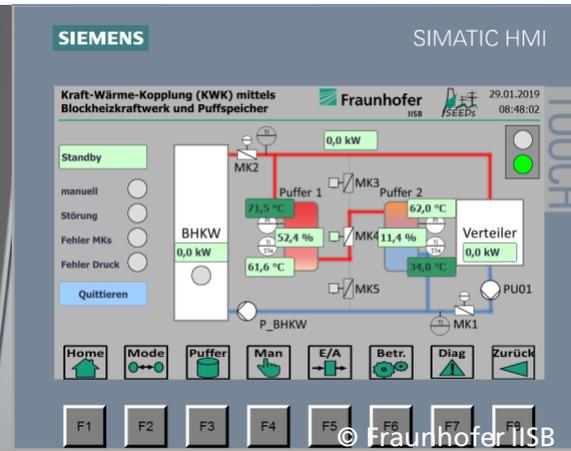
Automatisierung

- Implementierung von innovativen Anlagenkonzepten für Energiesysteme (Systemintegration)
 - Realisierung von Demonstratoren und Prototypen
 - Implementierung von Steuerungs- und Messfunktionalitäten nach IEC 61131 (SPS)
 - Anlagencharakterisierung and Validierung der Funktionalität



© Fraunhofer IISB

Wärmepumpensystem für Wärmerückgewinnung aus Abluft



© Fraunhofer IISB

Übersichtsbildschirm Steuerung BHKW mit Pufferspeicher (HMI)



© Fraunhofer IISB

Effiziente Übergabestation zum Kältenetzwerk für Anlagen

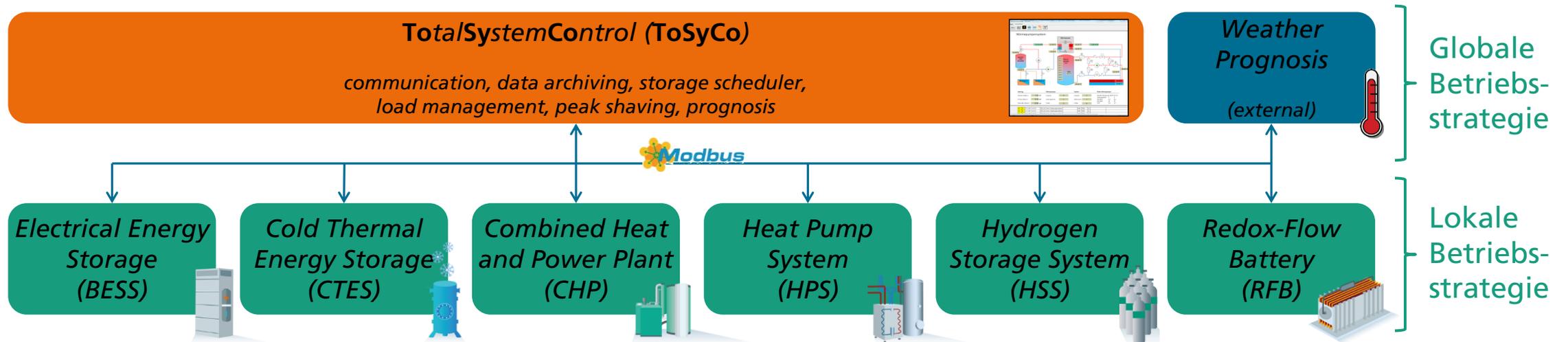


© Fraunhofer IISB

Großer Kältespeicher für Flexibilisierung der Kältesystems

Betriebsstrategie

TotalSystemControl: Framework für ein intelligentes EMS



Globale Betriebsstrategie

- ✓ Lastprognosen
- ✓ Fahrpläne für die Speicher
- ✓ Lastspitzenreduktion

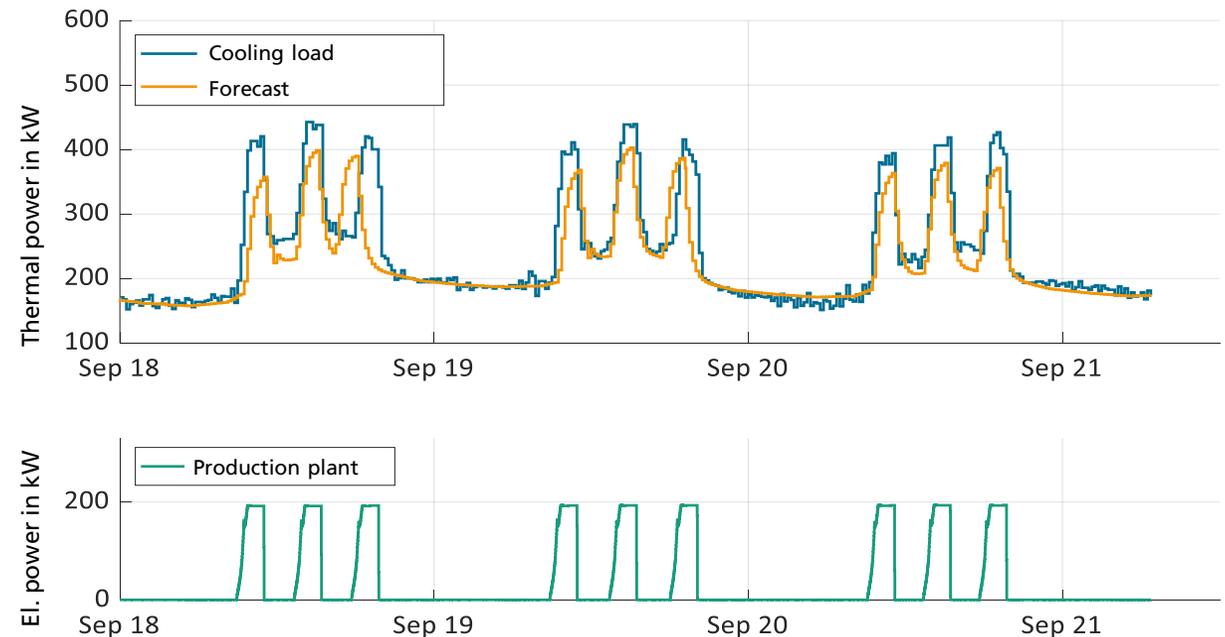
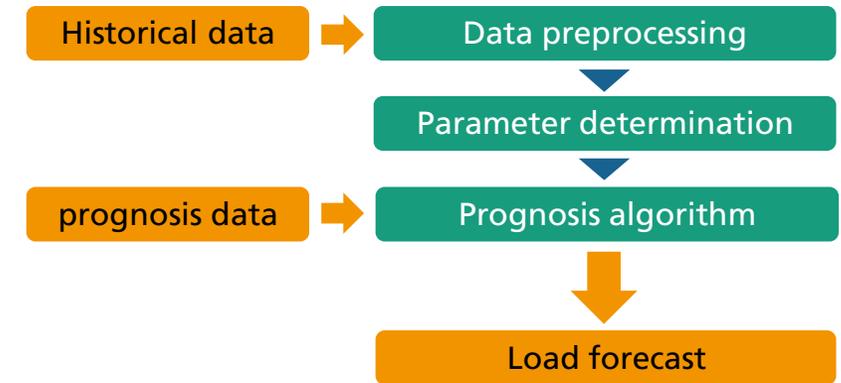
Lokale Betriebsstrategie (SPS*)

- ✓ Sicherheitsfunktionen
- ✓ Basisfunktionalität (MSR**)
- ✓ Grundlegende Betriebsstrategie der Anlage
- ✓ Physikalische Ein- und Ausgänge

TotalSystemControl

Lastvorhersage

- Methoden
 - Zeitreihenmodelle (ARIMA)
 - Künstliche Neuronale Netze
 - Algorithmen für maschinelles Lernen
- Implementierung als eigenständige Anwendung und/oder eigenständiger Prozess
- Integration in prädiktive Steuerungsalgorithmen
- Genauigkeit:
 - Elektrische Last: MAPE 5%
 - Thermische Last: MAPE 10 %



Vorhersage der Kühllast (oben), welche stark abhängig ist vom Betrieb bestimmter Anlagen (unten)

Zusammenfassung

- Entwicklung und Aufbau eines dezentralen intelligenten Energiesystems am IISB
- **Monitoring** als Basis für Energieeffizienzmaßnahmen und Energieflusssteuerung
- **Speichertechnologien** bieten Freiheitsgrade zur Systemoptimierung
- **Simulation** von Komponenten und Systemen als Werkzeug für die Optimierung
- Sektorenkopplung zur Systemoptimierung
- Herausforderung **Energieflusssteuerung und Betriebsstrategieoptimierung**
- Spitzenlastreduzierung ohne Beeinflussung der Produktion
- Weitere Entwicklung hin zu intelligenten und selbstlernenden Systeme

Projektbeispiele

Projekt SEEDs: Inhalt und Ziele

- Demonstration der Umsetzung einer nachhaltigen Energieerzeugung, -speicherung und -versorgung für **lokale Energiesysteme** in der **Größenordnung von Industrieanlagen**
- Schwerpunkte auf **höchste Effizienz, Wirtschaftlichkeit** sowie größtmögliche Versorgungs- und Stabilitätsautarkie
- Herausforderung liegt in der **Zusammenführung der Einzeltechnologien** zu einem **optimierten Gesamtenergiesystem** im Industriemaßstab
- Als **Forschungs- und Demonstrationsplattform** dient das Institutsgebäude des Fraunhofer IISB mit seinen beiden Erweiterungsbauten sowie einem Reinraum



Herausgegebenes Buch zum Thema intelligente dezentrale Energiesysteme von M. März und R. Öchsner

Projektbeispiele

Projekt LZE, EPROX4, ProEnergie

- **LZE:** Entwicklung eines Wasserstoffspeicherdemonstrators (LOHC) angekoppelt an ein DC-Netz mit Erzeugung von grünem Wasserstoff und Rückverstromung durch eine Brennstoffzelle
- **EPROX4:** Entwicklung und Demonstration eines Redox-Flow-Speichers (Elektrolyt auf Vanadium-Basis) und Integration in ein intelligentes dezentrales Energiesystem
- **ProEnergie:** Optimierung der energetischen Gebäudeinfrastruktur (EGI) als Schlüssel für zukünftige industrielle Energiesysteme mittel Softwaretools
 - CO₂-Reduktion durch Eigennutzungsoptimierung von Erneuerbaren Energien
 - Kosteneinsparungen durch Lastspitzenreduktion
 - Energieeinsparungen durch Effizienzerhöhung



Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung (B.KWK) e.V. Präsident Claus-Heinrich Stahl überreicht Auszeichnung "BHKW des Jahres 2020" an IISB-Institutsleiter Prof. Jörg Schulze

Quelle: Thomas Richter, Fraunhofer IISB

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Danksagung

Diese Arbeiten wurden gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie.

Der Autor dankt allen Kolleginnen und Kollegen, die an diesen Projekten mitgearbeitet haben.

www.iisb.fraunhofer.de, www.energy-seeds.org, www.proenergie-bayern.de

Kontakt: Dr. Richard Öchsner, Tel. 09131 761 116

richard.oechsner@iisb.fraunhofer.de



Fraunhofer

IISB



public

