
BHKW DES JAHRES 2020

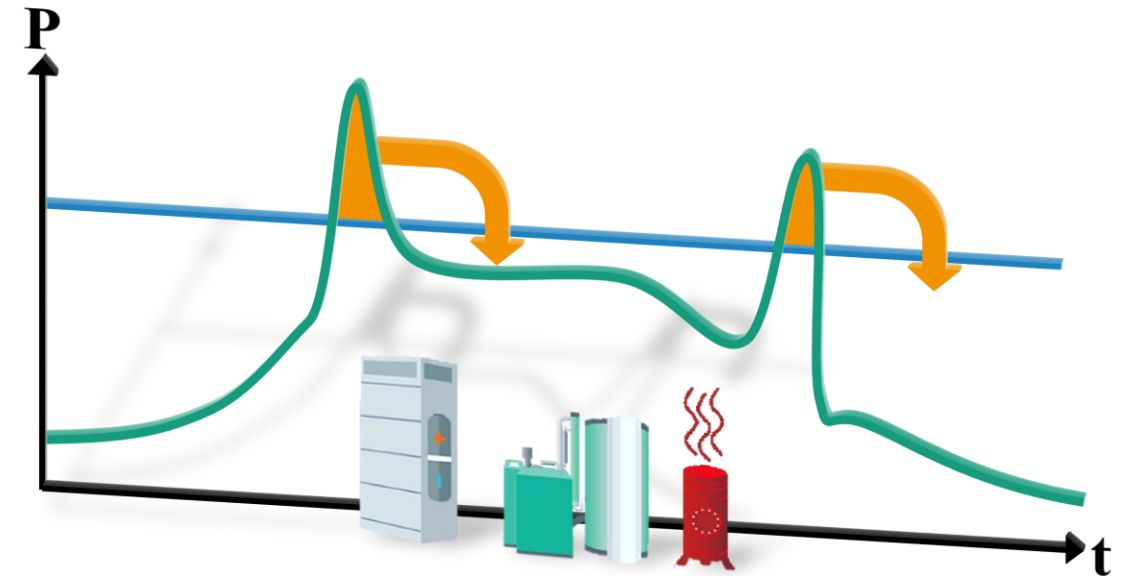
BHKW mit Wärmespeicher und Batterie zur Strom-/Wärmeversorgung sowie Lastspitzenreduktion
Dr.-Ing. Christopher Lange



BHKW 2021 – Innovative Technologien und neue Rahmenbedingungen
09./10. November 2021 in Magdeburg

AGENDA

- Motivation und Einleitung
- Vorstellung des Reallabors und der KWK-Anlage am Fraunhofer IISB
- Modellierung des Systems
- Betriebsstrategie zur Kombination von wärme-/stromgeführtem Betrieb des BHKW mit einem Lastspitzenmodus
- Simulations- und Messergebnisse
- Fazit



Motivation

■ Typische Infrastrukturen in der Industrie bestehen aus verschiedenen Energiesektoren

- Strom (AC und DC)
- Wärme und Kälte
- Gas (z. B. Erdgas)
- Weitere (z. B. Druckluft, Vakuum, Medien)



→ Die Sektoren sind über verschiedene Anlagen (z. B. Blockheizkraftwerk) gekoppelt

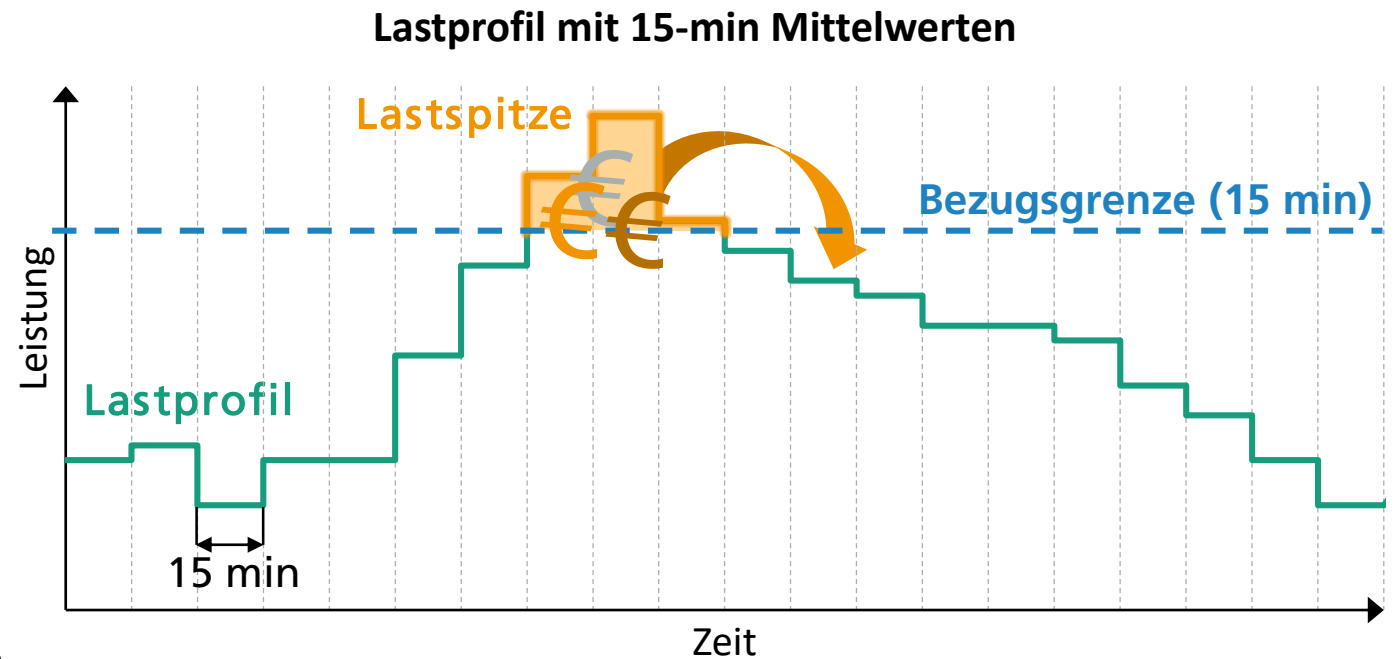
■ Intelligentes Energiemanagement: Berücksichtigung aller relevanten Zusammenhänge zwischen den Komponenten und Anwendung intelligenter Betriebsstrategien für:

- Lastspitzenreduktion → BHKW während Lastspitzen zuschalten
- Effizienzerhöhung → BHKW möglichst dauerhaft betreiben
- Eigenversorgungsoptimierung → BHKW für lokale Strom- und Wärmeversorgung einsetzen

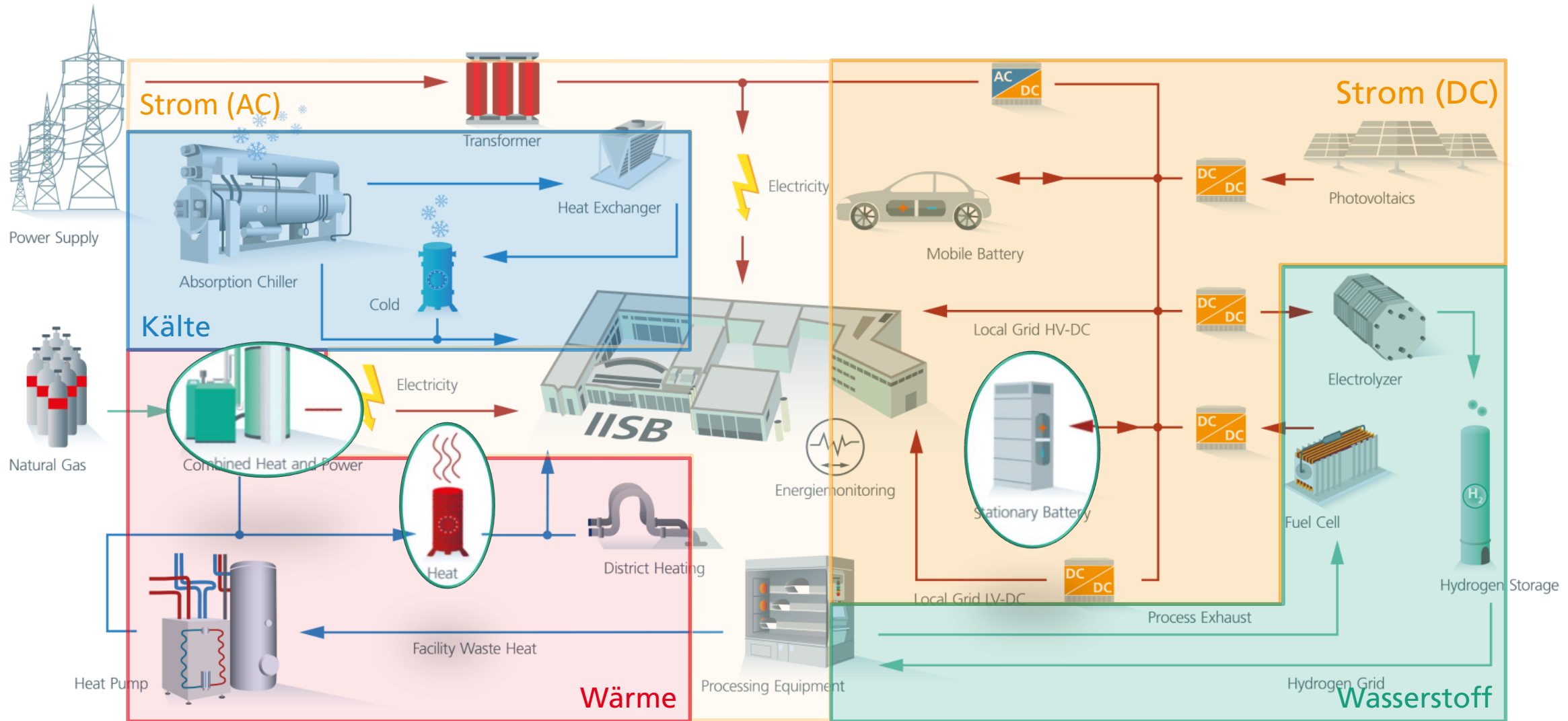
Einleitung

Definition von Lastspitzen

- Ausgangssituation: Lastprofil (bzw. Lastgang) mit den Mittelwerten der vom Energieversorger bezogenen Leistung
- Festlegung einer Bezugsgrenze (maximal zulässige Leistung innerhalb einer Mittelwertperiode)
 - Bezugsgrenze kann konstant oder zeitlich variabel sein
 - Lastspitze wird sichtbar
- Höchste Lastspitze im Abrechnungszeitraum ist für Stromkosten relevant
 - Maximaler 15 min Mittelwert soll auf Bezugsgrenze reduziert werden
 - 1 min Werte dürfen diese überschreiten



Reallabor am Fraunhofer IISB als Plattform für angewandte Energieforschung



Reallabor am Fraunhofer IISB

KWK-Anlage

- **Blockheizkraftwerk (BHKW)**
 - Typ: Erdgas-BHKW
 - Elektrische Nennleistung: 150 kW
 - Wärmenennleistung: 210 kW
- **Wärmespeicher**
 - Typ: Sensible Verdrängungsspeicher
 - Speichervolumen: 24 m³
 - Besonderheit: unterteilt in zwei Speicher
 - serieller, paralleler und einzelner Betrieb
 - verschiedene Ladesysteme

Weitere Infos: <https://www.energy-seeds.org/>



© Kurt Fuchs / Fraunhofer IISB. KWK-Anlage am Fraunhofer IISB Wärmespeicher (links) und BHKW (rechts)

Reallabor am Fraunhofer IISB

KWK-Anlage

■ Blockheizkraftwerk (BHKW)

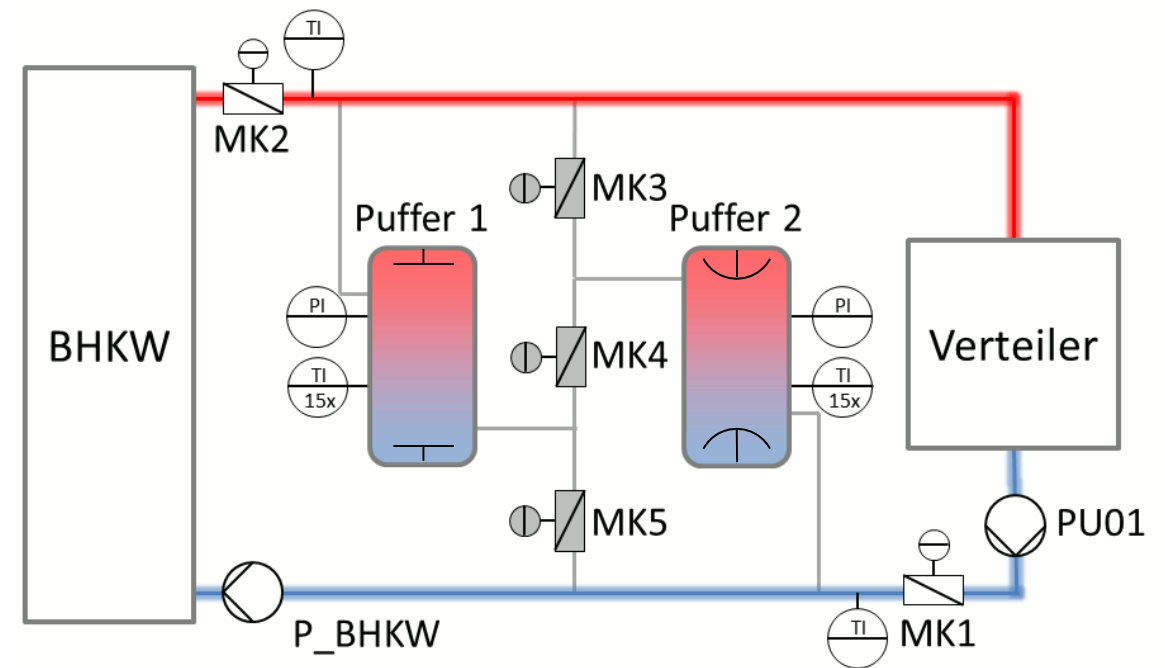
- Typ: Erdgas-BHKW
- Elektrische Nennleistung: 150 kW
- Wärmenennleistung: 210 kW

■ Wärmespeicher

- Typ: Sensible Verdrängungsspeicher
- Speichervolumen: 24 m³
- Besonderheit: unterteilt in zwei Speicher
 - serieller, paralleler und einzelner Betrieb
 - verschiedene Ladesysteme

Weitere Infos: <https://www.energy-seeds.org/>

Aktueller Modus
Aus



Hydraulische Verschaltung der KWK-Anlage mit
Wärmespeichern (Animation)

Reallabor am Fraunhofer IISB

Batteriespeicher

■ Batteriespeicher

- Modulares System mit 5 Batterieschränken á
 - Leistung: 100 kW
 - Kapazität: 20 kWh
- 14 Batteriemodule je Schrank mit integrierter Überwachungselektronik
- Batteriemanagementsystem (BMS) je Schrank (foxBMS: <https://foxbms.org/>)
- Batteriezellen: Lithiumionen-Akkumulatoren



© Kurt Fuchs / Fraunhofer IISB. Batteriespeicher und Leistungselektronik am Fraunhofer IISB

Weitere Infos: <https://www.energy-seeds.org/>

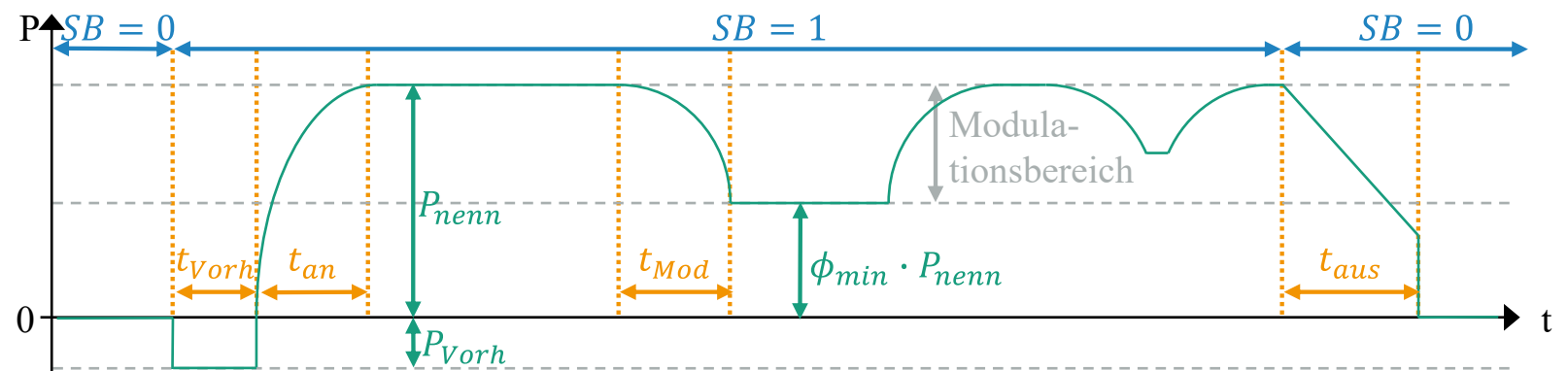
Modellierung der Komponenten

Blockheizkraftwerk

■ BHKW-Modell auf Basis eines „erwarteten Zeitverlaufs“ mit verschiedenen Kenngrößen

- Vorheizung (Dauer und elektrische Leistungsaufnahme)
- Anfahrverhalten (z. B. PT1-Verhalten oder lineares Anfahren)
- Verhalten bei Lastwechseln
- Abschaltverhalten
- Wirkungsgrade als Lookup-Tabellen

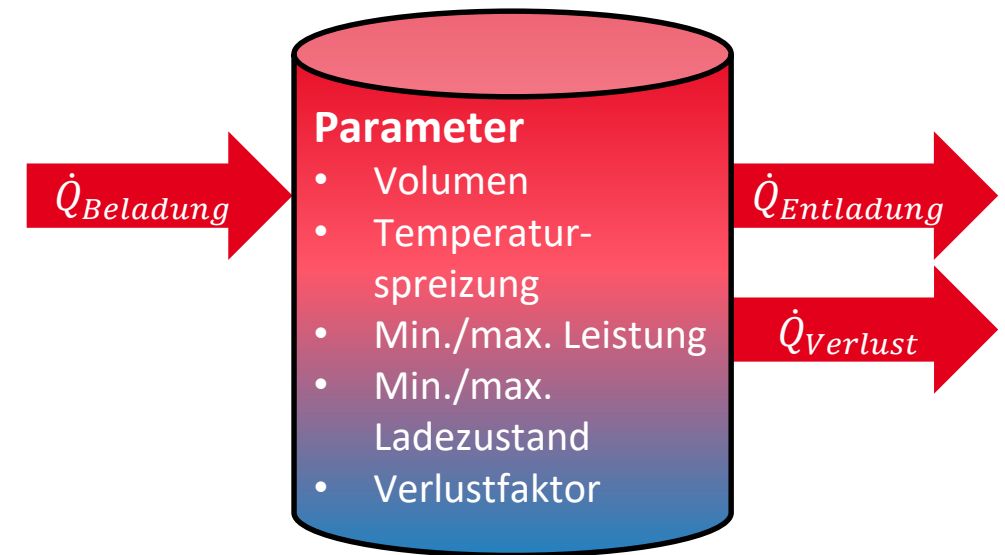
■ Automatisiertes Lernen der BHKW-Parameter auf Basis von Messdaten



Modellierung der Komponenten

Energiespeicher

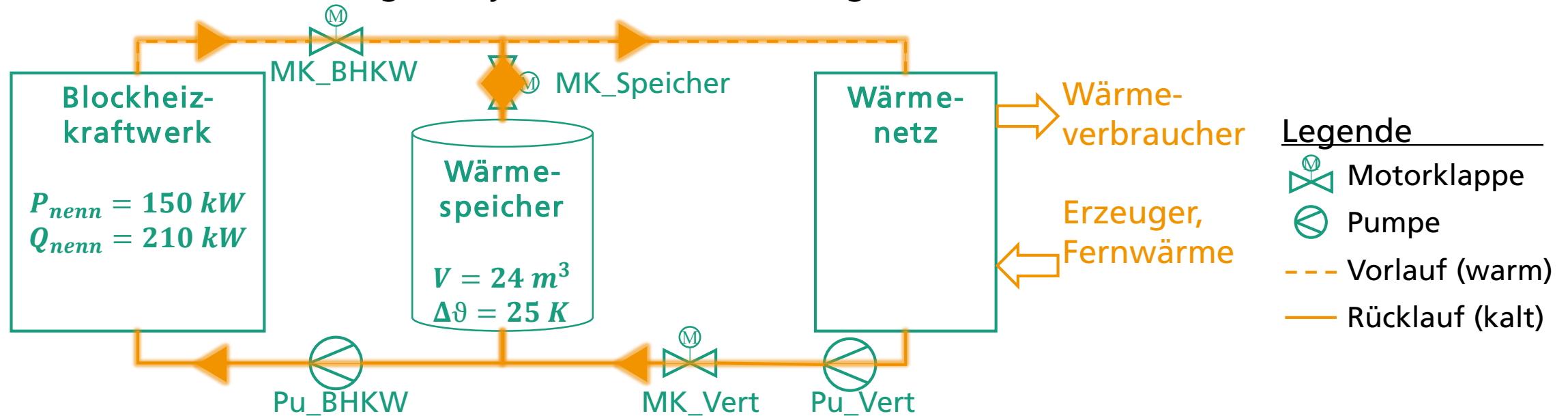
- Energiespeichermodell mit Berücksichtigung von
 - Nennkapazität und -leistung
 - Ladezustandsgrenzen (minimaler und maximaler Ladezustand)
 - zulässige Leistung für Be- und Entladung (abhängig von Ladezustand)
 - Wirkungsgrad (abhängig von Leistung)
 - Selbstentladung
- Realisierung als Energiebilanzmodell
- Umsetzung von
 - Batteriespeicher
 - Thermischer Speicher



Betriebsstrategie

Hydraulisches Schema

- Anforderungen
 - Wärme- und stromgeführten Betrieb außerhalb von Lastspitzen („Normalbetrieb“)
 - Außerplanmäßige Zuschaltung des BHKW bei einer ext. Anforderung („Lastspitzenmodus“)
- Schematische Darstellung der hydraulischen Einbindung



Betriebsstrategie

Wärmespeicher

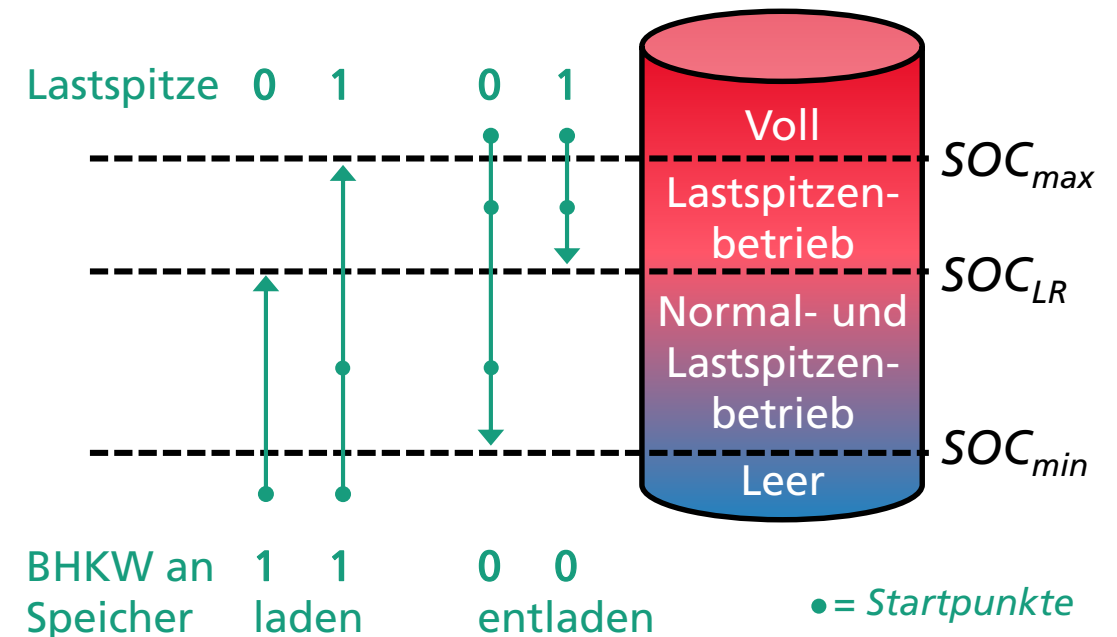
■ Vorgehen

- Wärmespeicher wird virtuell in Ladezustandszonen unterteilt
- Eine dieser Ladezustandszonen wird exklusiv für die Lastspitzenreduktion reserviert
- Zustandsautomat zur Ablaufsteuerung sowie zur Ansteuerung der Stellglieder

→ Vorteil: Auch bestehende Systeme können mit dieser Betriebsstrategie nachgerüstet werden

■ Ladezustands-Berechnung:

$$SOC = \frac{\sum_{k=1}^N (T_k - T_{RL}) \cdot dh_k \cdot a_k}{[H - \sum_{k=1}^N dh_k \cdot (1 - a_k)] \cdot (T_{VL} - T_{RL})}$$



SOC : engl. State of Charge (Ladezustand), LR: Lastspitzenreduktion

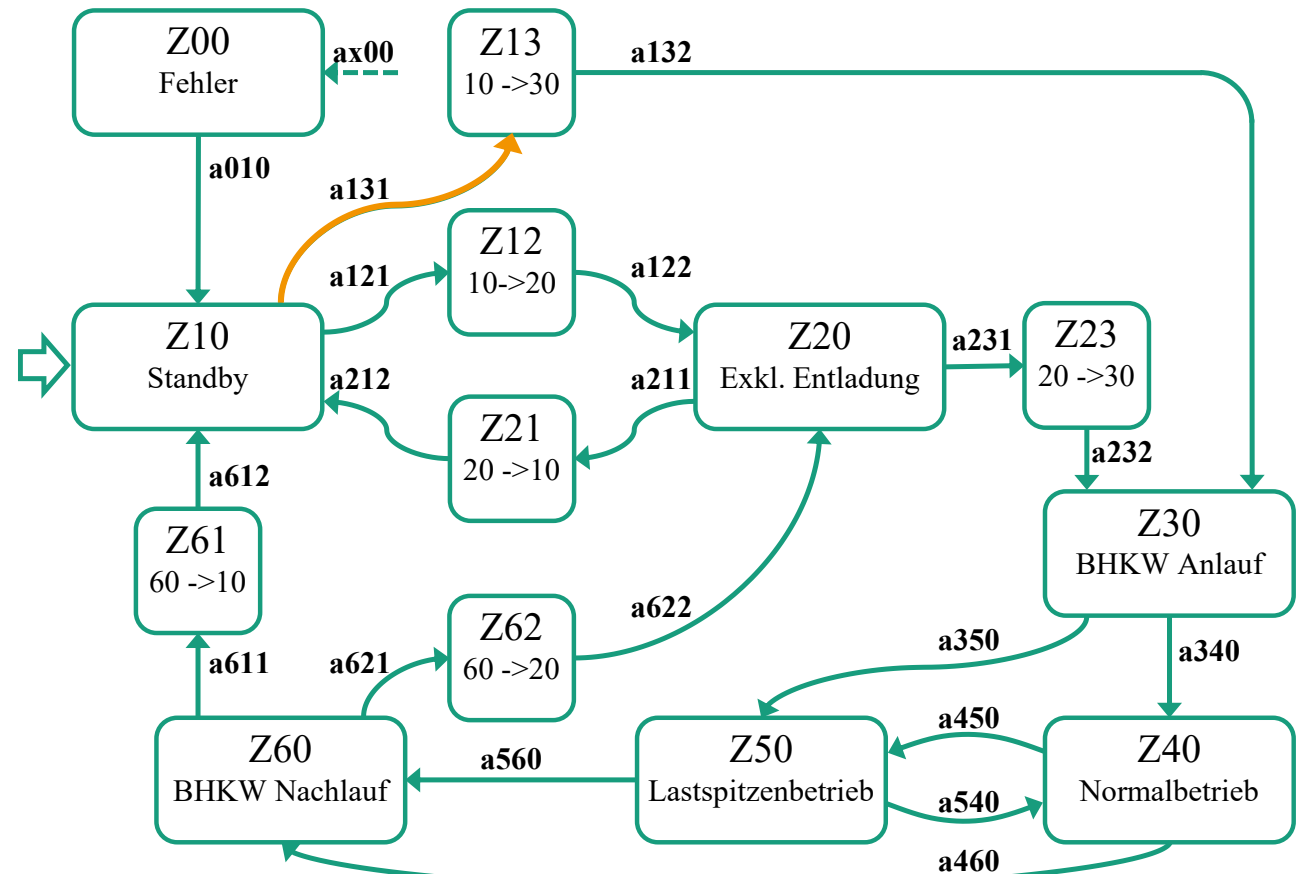
Betriebsstrategie

Zustandsautomat

- Deterministischer, endlicher Zustandsautomat zur
 - Herstellung des Betriebszustand
 - Ansteuerung der Aktoren
 - Ansteuerung des BHKW
- Die Logik steckt in den Übergangsbedingungen (Transitionen)
 - hinter jedem Pfeil steckt eine Gleichung

Beispiel: Zuschaltung BHKW → a131

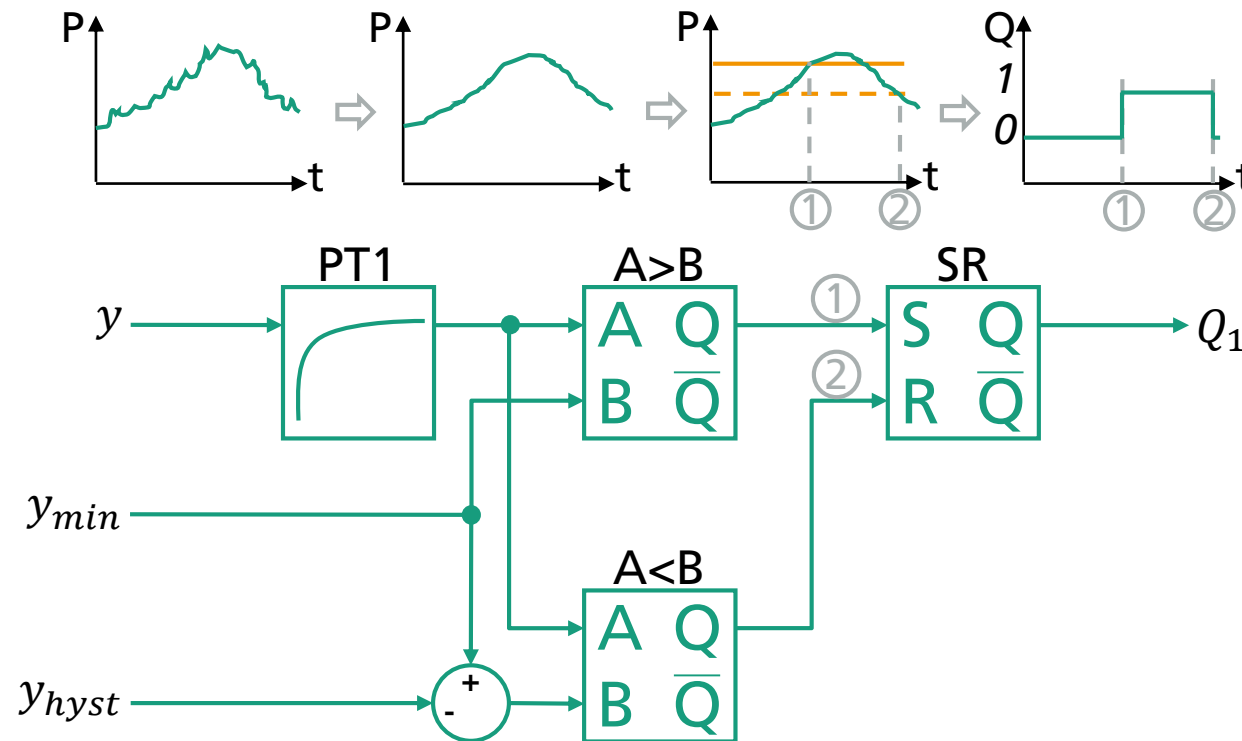
$$a_{131} = (t_{BHKW,aus} \geq t_{Standzeit,min}) \wedge [(\dot{Q}_{Wärme} \geq \dot{Q}_{min}) \wedge (P_{Bedarf} \geq P_{min}) \wedge (SOC_{WS} \leq SOC_{WS,min}) \wedge \overline{SB_{BHKW,LR}} \vee (SOC_{WS} \leq SOC_{WS,LR}) \wedge SB_{BHKW,LR}]$$



Betriebsstrategie

Lastspitzenanforderung

- Berechnung der Lastspitzenanforderung mittels eines PT1-Elements mit hysteresebehafteten Schaltausgängen



Herleitung der Schaltausgänge

$$y_{(k)} = \frac{\Delta t}{\Delta t + T} \cdot (K \cdot u_{(k)} - y_{(k-1)}) + y_{(k-1)}$$

$$Q1_{(k)} = \begin{cases} 1 & \text{für } y_{(k)} > y_{min} \\ 0 & \text{für } y_{(k)} < y_{min} - y_{hyst} \\ Q1_{(k-1)} & \text{sonst} \end{cases}$$

$$Q2_{(k)} = \begin{cases} 1 & \text{für } y_{(k)} < y_{max} \\ 0 & \text{für } y_{(k)} > y_{max} + y_{hyst} \\ Q2_{(k-1)} & \text{sonst} \end{cases}$$

u : Eingangswert, y : Ausgangswert, Q : Schaltausgang,
 Δt : Abtastung, T : Zeitkonstante, y_{hyst} : Hysterese
 y_{min} , y_{max} : Grenzwerte

Betriebsstrategie

Batterie

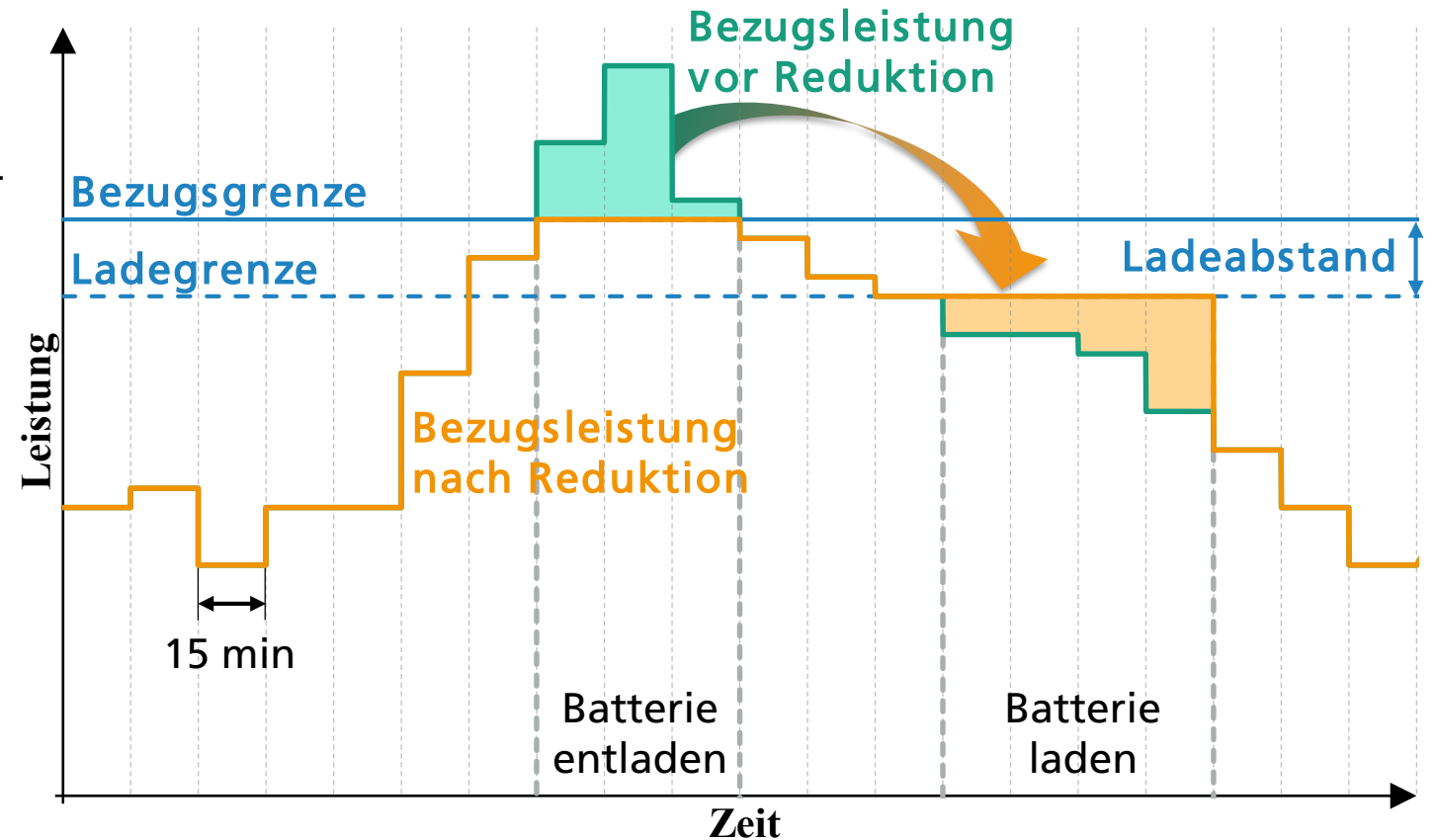
- Berechnung der Batterieleistung für jeden Zeitschritt (z. B. 1 min), um die Bezugs- und Ladegrenze in der Mittelwertperiode von 15 min einzuhalten

- Bezugsgrenze → Entladen

$$P_{Entl} = P_{Bat,ist} + P_{Trafo} - \bar{P}_{Trafo} + \frac{(\bar{P}_{Trafo} - P_{max,soll} + P_{Sicher}) \cdot T_{Mit}}{T_{Mit} - t_{per} + \Delta t}$$

- Ladegrenze → Beladen

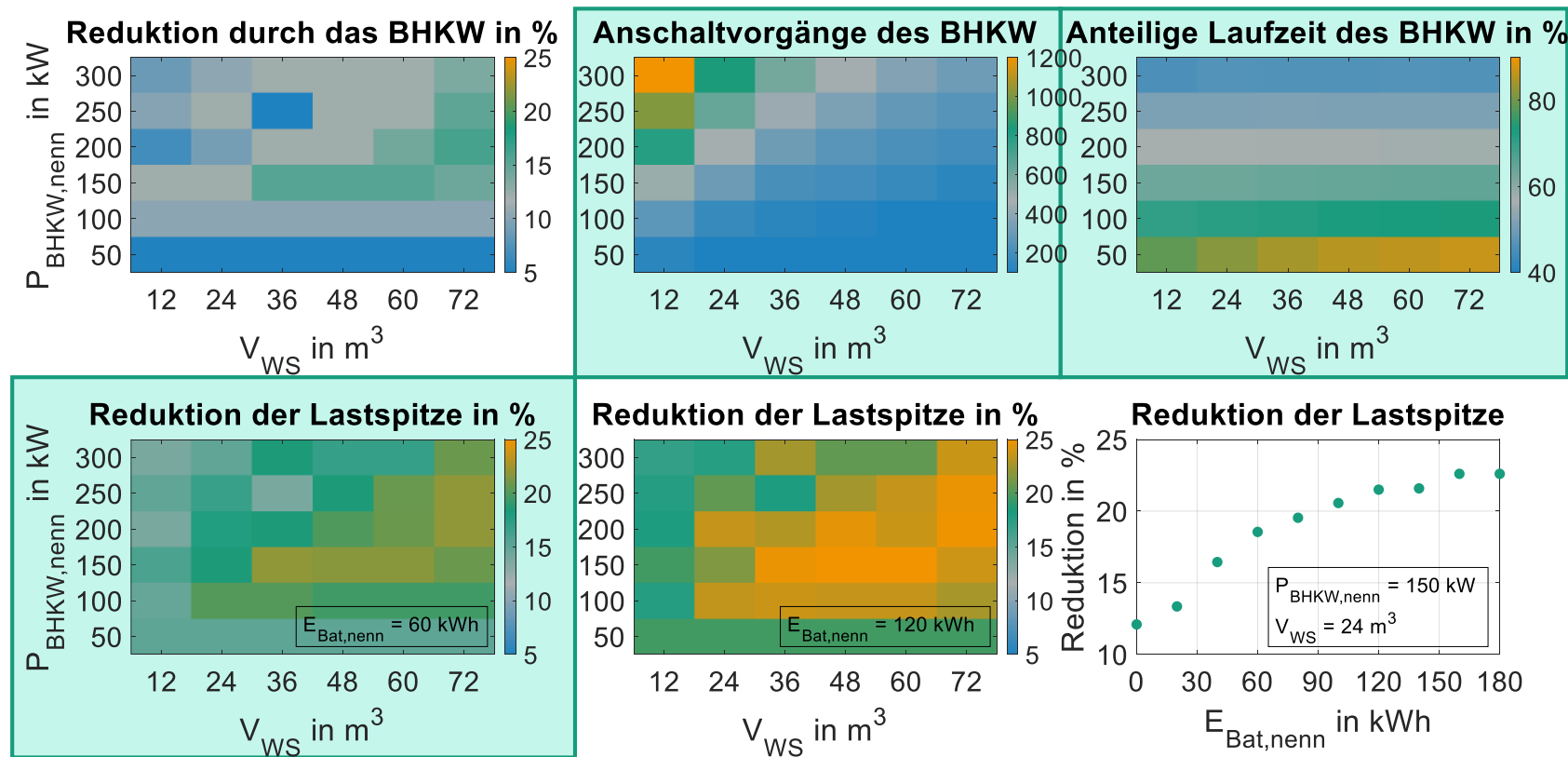
$$P_{Bel} = P_{Bat,ist} + P_{Trafo} - \bar{P}_{Trafo} + \frac{(\bar{P}_{Trafo} - P_{laden,soll} + P_{Sicher}) \cdot T_{Mit}}{T_{Mit} - t_{per} + \Delta t}$$



P_{Entl} : Entladeleistung, P_{Bel} : Beladeleistung, P_{Trafo} : Bezugsleistung,
 $P_{max,soll}$: Bezugsgrenze, $P_{laden,soll}$: Ladegrenze, T_{Mit} : Mittelwertperiode, t_{per} : aktuelle Periode, Δt : Abtastung

Ergebnisse Auslegung

■ Auslegung von BHKW, Wärmespeicher und Batterie mittels dynamischer Programmierung



- Obere Reihe:
Lastspitzenreduktion
ohne Batteriespeicher
- Untere Reihe:
Lastspitzenreduktion
mit Batteriespeicher
→ „Festsetzung“ von
Freiheitsgraden

Ergebnisse

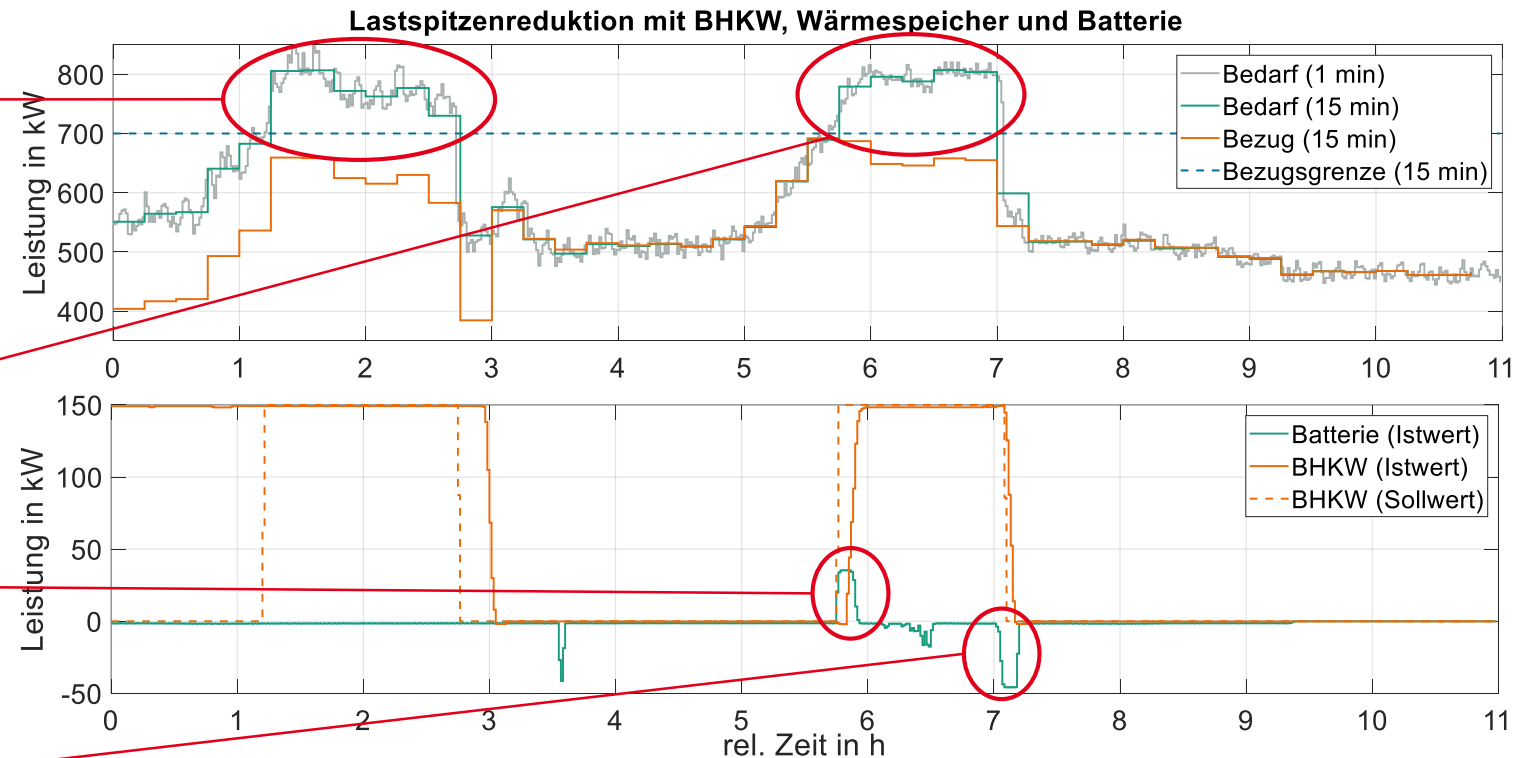
Messung im Reallabor

1. Lastspitze: BHKW läuft bereits (durch wärmegeführten Betrieb), daher keine weiteren Maßnahmen nötig

2. Lastspitze: BHKW muss zugeschaltet werden, reservierte Speicherkapazität wird genutzt

Batteriespeicher überbrückt den Anfahrvorgang des BHKW

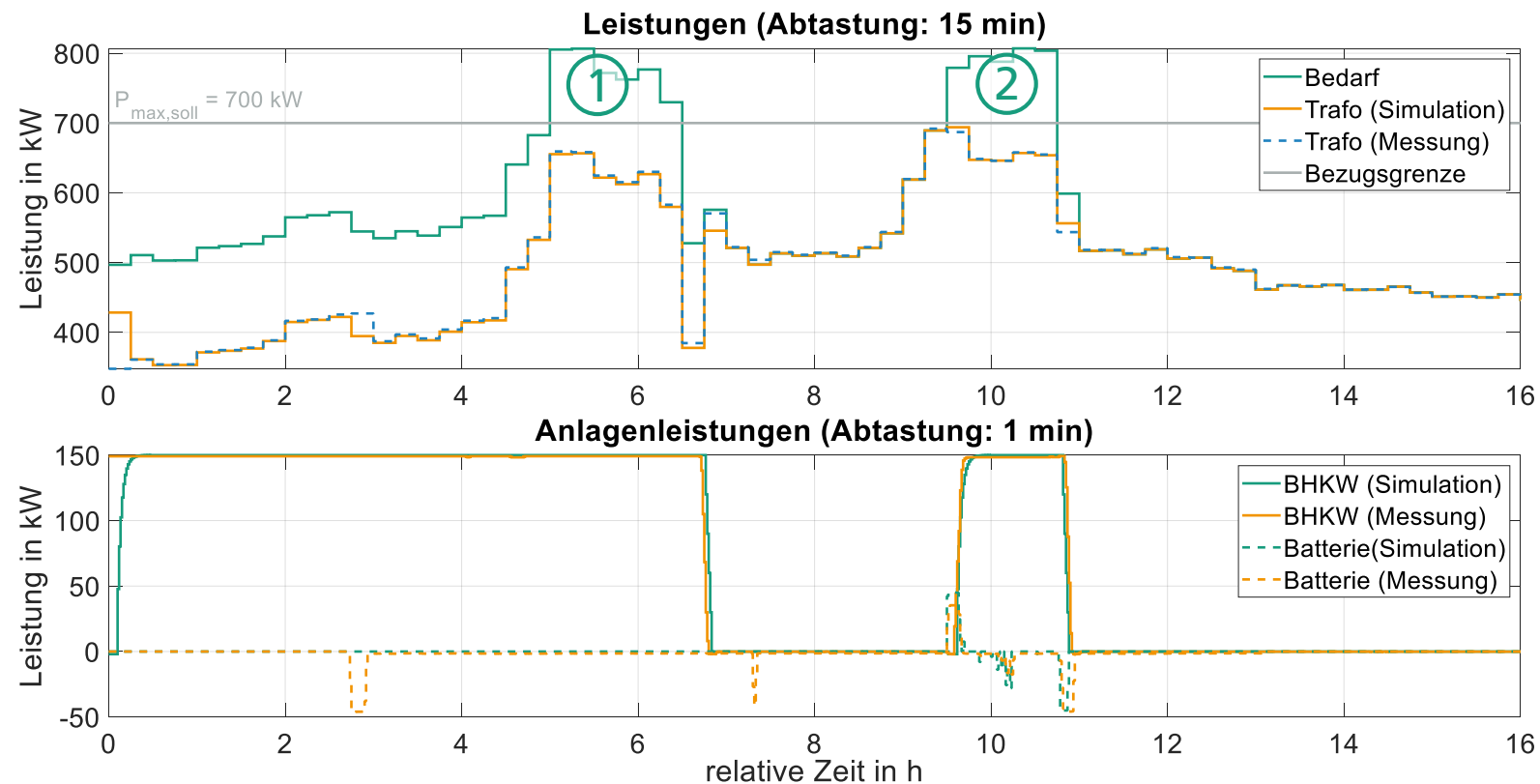
Batteriespeicher wird mit „überschüssiger“ Leistung beladen



Ergebnisse

Vergleich von Simulation und Messung

■ Ermittlung der Simulationsgenauigkeit durch eine nachträgliche Simulation



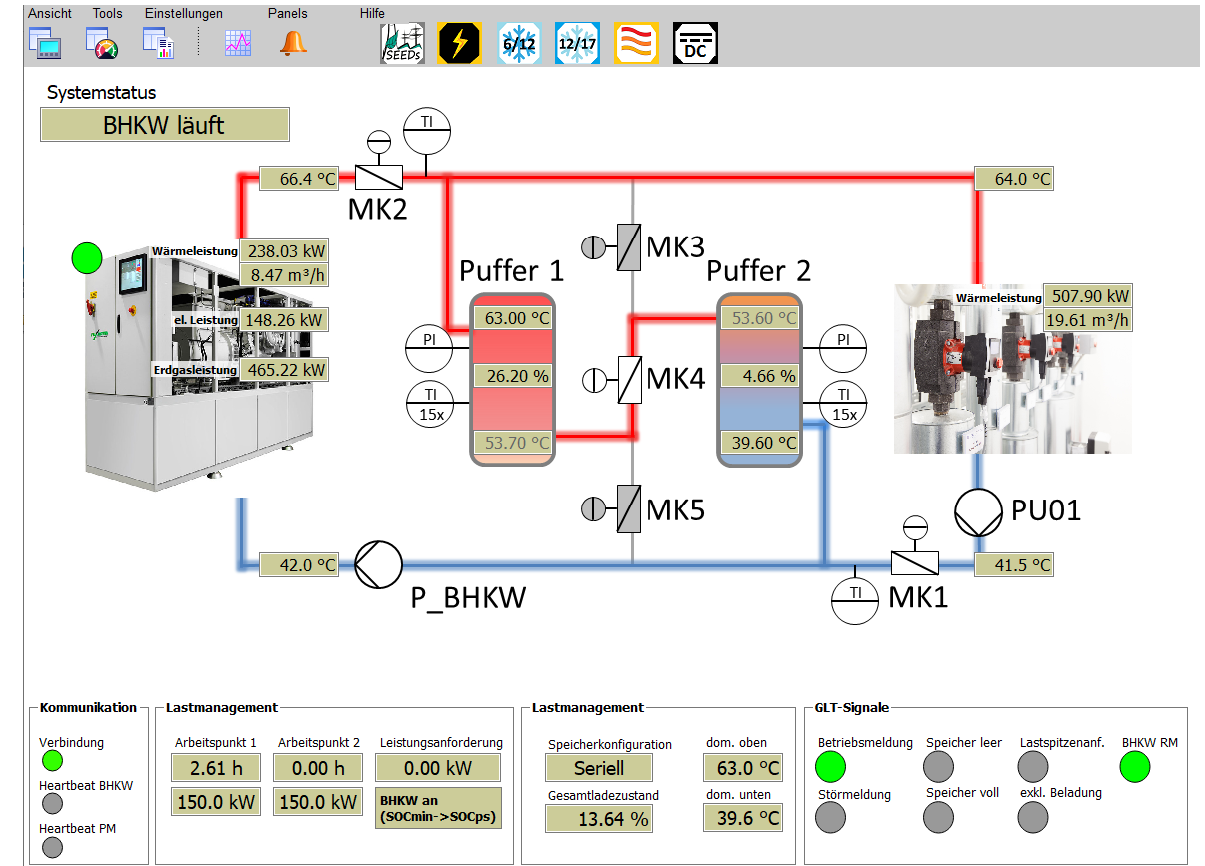
- Reduktion um 14 %
- Simulation und Messungen stimmen gut überein
- MAE (Trafo 15 min) liegt bei 3,9 kW
- Max. Abweichung liegt bei ca. 25 kW

Ergebnisse

Betriebsdaten der KWK-Anlage

Zeitraum: Mitte Juli 2019 bis Dezember 2020

- Laufzeit
 - BHKW zugeschaltet: 7552 h
 - betrachteter Zeitraum: 12097 h
 - Anteil: entspricht 62 %
- Energiebilanz
 - elektrische Energie: 1,12 GWh
 - Wärmeenergie: 1,69 GWh
 - benötigte Erdgasenergie: 3,26 GWh
- Gesamtwirkungsgrad im Betrieb: 86,2 %
- Laufzeit pro Taktung: 17 h



Visualisierung des BHKW sowie Aufzeichnung der Messwerte und internen Größen im EMS des Fraunhofer IISB

Zusammenfassung und Fazit

- Simulation als wichtiges Werkzeug für
 - Entwicklung der Betriebsstrategie
 - Dimensionierung von BHKW, Wärmespeicher und Batterie→ Simulationen und Messungen zeigen eine hohe Übereinstimmung
- Batteriespeicher wird zusätzlich zum Wärmespeicher benötigt, um
 - Dynamik auf der elektrischen Seite zu erhöhen
 - Vorheiz- und Anfahrvorgänge zu überbrücken
 - „kleinere“ Lastspitzen eigenständig zu reduzieren→ Die Kombination aus BHKW, Wärmespeicher und Batterie ermöglicht eine flexible und gleichzeitig effiziente Strom- und Wärmeversorgung

E&M
ENERGIE & MANAGEMENT


Bundesverband
Kraft-Wärme-Kopplung e.V.

Blockheizkraftwerk des Jahres 2020

BHKW des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Systeme
und Bauelemententechnologie IISB

„BHKW des Monats Juni 2020“ von Energie & Management

Betreiber: Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme
und Bauelemententechnologie IISB

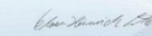
BHKW-Lieferant: Tuxhorn Blockheizkraftwerke GmbH

Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelemententechnologie IISB aus Erlangen hat eine neu entwickelte intelligente Betriebsstrategie zur Lastspitzenreduktion umgesetzt.

Das Zusammenspiel von Anlagentechnik, Strom- und Wärmeversorgung sowie intelligenter Betriebsstrategie einerseits und Wissenschaft andererseits hat zu einem beeindruckenden Ergebnis beim Anlagenkonzept geführt und überzeuge die Jury. Das hier gewählte Energieversorgungskonzept kann seine Vorbildwirkung für Anlagen zur Energiewende entfalten.

Berlin, den 1. Dezember 2020


Heidi Roder
Redakteurin
Energie & Management


Claus-Henrich Stahl
Präsident
Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V.


Hagen Fühl
Vizepräsident
Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V.

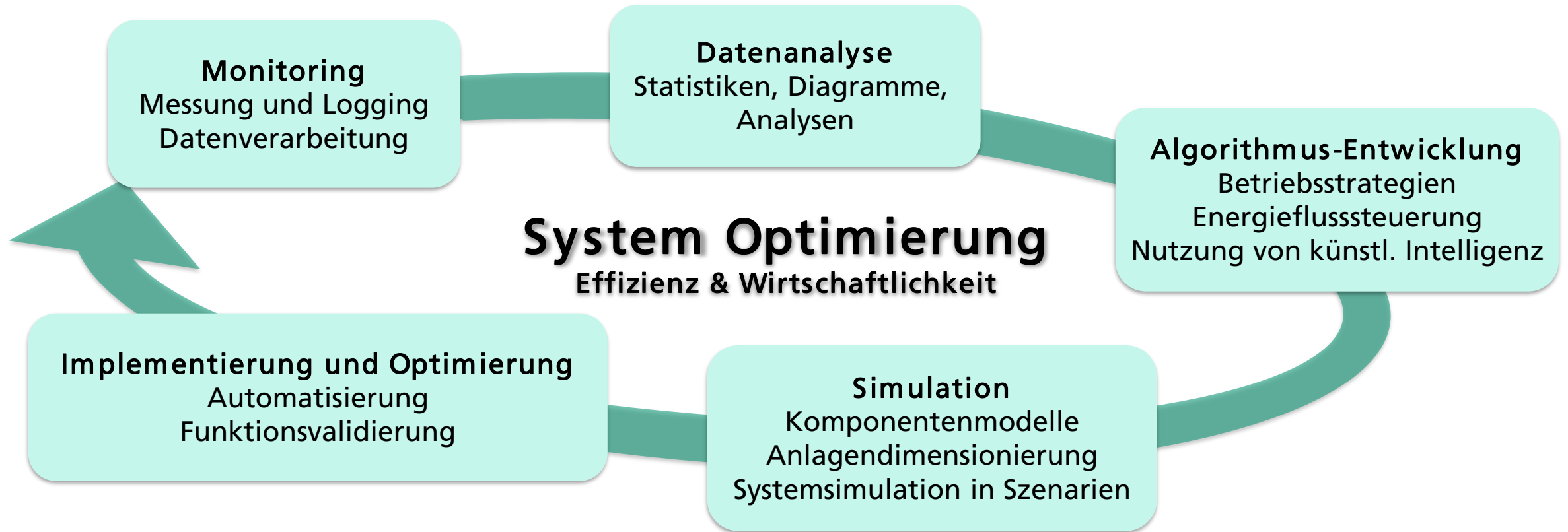
Urkunde für das „Blockheizkraftwerk des Jahres 2020“



© Thomas Richter / Fraunhofer IISB.
Urkundenübergabe durch B.KWK Präsident
Hr. Stahl an Institutsleiter Prof. Schulze

Zusammenfassung und Fazit

Was wir als Forschungspartner bieten



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dr.-Ing. Christopher Lange

Fraunhofer-Institut für
Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB
Schottkystr. 10, 91058 Erlangen, Germany

Tel.: +49 (0) 9131 761-107

Mail: Christopher.Lange@iisb.fraunhofer.de

www.iisb.fraunhofer.de

www.energy-seeds.org

PROENERGIE - BAYERN



Effizienz- und Flexibilitätsgewinn durch
Optimierung von Betriebsstrategien der energetischen Gebäudeinfrastruktur
basierend auf prognostizierten Energiebedarfen der Produktion

Gefördert durch:



Bayerische
Forschungsförderung

Infos zum Projekt:

[Link zur Projektseite bei der BFS](#)