



Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology IISB



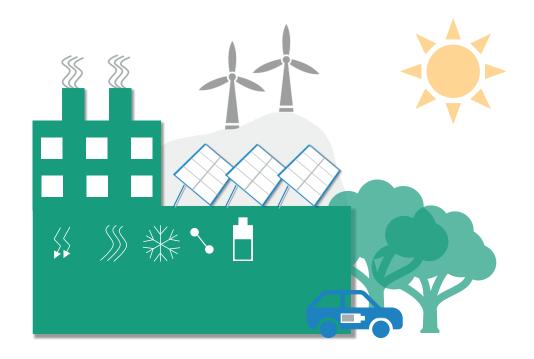
Kommunale Wärmeversorgung – Herausforderungen und Lösungen

# Simulationsbasierte Entwicklung von Betriebsstrategien für Wärmenetze und -komponenten

Dr. Christopher Lange, Christian Rettenbeck

### **Inhalte des Vortrags**

- 1. Motivation für die simulationsbasierte Entwicklung Wo liegen die Schwierigkeiten bei der Optimierung von Energiesystemen?
- 2. Optimierung von Energiesystemen
  Wie sehen Betriebsstrategien aus und wie werden Simulationen eingesetzt?
- 3. Kurzvorstellung von VK Energie Flexibilität optimal für die Energiewende nutzen
- **4. Optimierung von Wärmenetzen**Mehrstufige simulationsgestützte Betriebsoptimierung





### **Motivation**



**Motivation für Einsatz von Simulationen** 

Komplexität, Vorgehen

Public



### **Motivation**

Was macht die Optimierung von Energiesystemen so schwierig?

# Komplexe Energieinfrastrukturen mit enger Kopplung der (Sub)Systeme

#### Gekoppelte Energiesysteme mit verschiedenen Energiesektoren

- Elektrische Netze (AC und DC)
- Wärme & Kälte (Heizung, Lüftung, Klimatisierung, Prozesskühlung)
- Gase (Wasserstoff, Erdgas, Prozessgase)
- Druckluft, Vakuum

#### Die Energiesektoren sind über Erzeugungsanlagen gekoppelt

- Optimierung einer Komponente oder eines Subsystems führt nicht unbedingt zu einer Verbesserung des Gesamtsystems
- Daher müssen bei der Optimierung alle Zusammenhänge zwischen den Komponenten und Netzen bei berücksichtigt werden

# Hohe Anzahl von Randbedingungen, Einschränkungen und Optimierungszielen

#### Randbedingungen der Komponenten

- Verschiedene Klassen von Komponenten: Import/Export, Erzeugungsanlagen, Energiespeicher and Verbraucher
- Jede Komponente besitzt individuelle Randbedingungen, wie z. B. Nennleistungen, Ladezustandsgrenzen, dynamisches Verhalten...

#### Typische Optimierungsziele in Energiesystemen

- Eigenversorgungsoptimierung durch erneuerbare Energien
- Effizienz der Erzeugungsanlagen und Energieverteilung
- Lastspitzenreduktion und -verschiebung
- → Emissionsreduzierung, Kosteneinsparungen
- Ganzheitliche Betrachtung des zu optimierenden Energiesystems nötig
- Hohe Komplexität erfordert Hilfsmittel bei der Optimierung

vgl. [1]



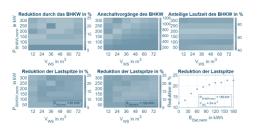
### **Motivation**

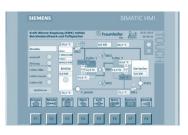
### Schritte bei der Energiesystemoptimierung

#### Vorgehen bei der Optimierung von Energiesystemen









Datenakquise und -analyse

- Aufbereitung
- Auswertung



- Entwicklung Betriebsstrategien
- Anlagenebene
- Energiemanagement

#### Simulation und Optimierung

- Modellierung, Szenarien
- Dimensionierung

#### Implementierung

- Automatisierung
- Monitoring



Unterstützung durch Simulationen (Analyse, Entwicklung, Optimierung)

Public

Überführung in Realität



### Betriebsstrategien



**Optimierung von Energienetzen** Betriebsstrategien



Public

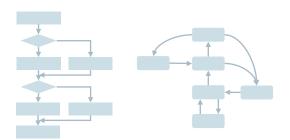
### Betriebsstrategien

### Formulierungsarten

#### Formulierung von Betriebsstrategien zur Umsetzung in realen Anlagen

Betriebsstrategien können in verschiedenen Formen formuliert werden und verschiedene Komponenten beinhalten

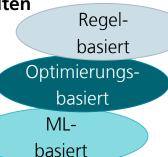
- Entscheidungsbäume oder Programmablaufpläne ("if/elsif/else")
- Deterministische, endliche Zustandsautomaten bzw. -maschinen
- Mathematische Zusammenhänge, z. B. Verfahren wie PID-Regler oder MPC (Model Predictive Control)
- Optimierungsfunktionen, z. B. MILP (Mixed-Integer Linear Programming)
- Machine learning (z. B. lineare Regression, Support Vector Machine, K-Nearest Neighbor, Random Forest etc.) oder deep learning (z. B. künstliches neuronales Netzwerk) Modelle
- → Es sind auch Kombinationen aus mehreren der gezeigten Formen möglich



$$y_k = K_p \cdot \left[ e_k + \frac{\Delta t}{T_I} \sum_{j=0}^k e_j + \frac{T_d}{\Delta t} \cdot (e_k - e_{k-1}) \right]$$
 with  $e_k = u_k - x_k$ 

Maximize  $c^T x$ Subject to Ax + s = b,  $s \ge 0, x \ge 0$ , and  $x \in \mathbb{Z}^n$ 







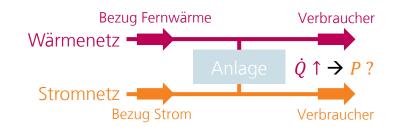
### Betriebsstrategien

### Wirkungsweise

#### Kategorisierung der Anlagen

#### Gründe für die Unterteilung in Kategorien

- verschiedene Wirkungsweisen von enthaltenen Speichern
- unterschiedliche Einflüsse auf die gekoppelten Netze



#### Beispiel: Wirkungsweise auf elektrisches Netz

#### **Elektrische Speicher**

**Entladung** führt zu (temporär) verringertem elektrischen Bedarf

→ geringere Bezugsleistung

Speicher stellt die benötigte elektr. Leistung direkt bereit (Entladung)

Beispiele: Lithium-lonen-Batterie,

Redox-Flow-Batterie



#### **Zuschaltbare Erzeuger**

**Zuschaltung** führt zu (temporär) erhöhter lokaler Erzeugung

→ geringere Bezugsleistung

Speicher nimmt die "überschüssige" Sekundärenergie (z. B. Wärme) auf

Beispiele:

Blockheizkraftwerk,

Brennstoffzelle



#### **Abschaltbare Verbraucher**

**Abschaltung** führt zu (temporär) verringertem elektrischen Bedarf

→ geringere Bezugsleistung

Speicher übernimmt in der Zwischenzeit die (teilweise) Versorgung

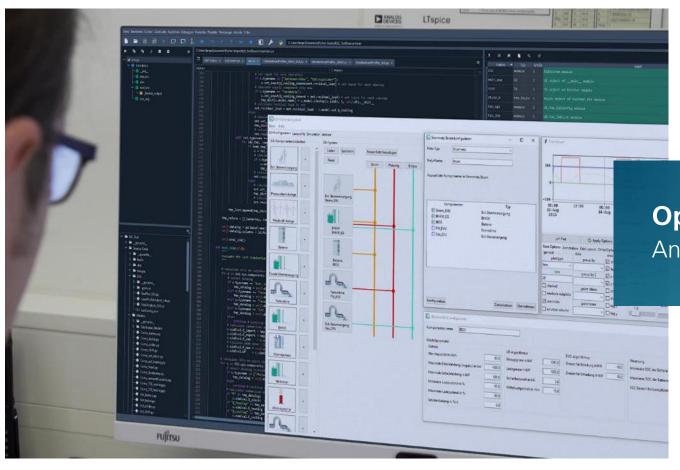
Beispiele:

Kältemaschine,

Wärmepumpe







Public

**Optimierung von Energienetzen** Anwendung von Simulationen



### Grundlagen

#### Von der Simulation zum realen System

#### Was ist eine Simulation?

- Nachbildung eines realen Prozesses, Systems oder Ereignisses mit Hilfe eines Modells
- Einsatz: Vorhersage, Analyse und Verständnis des Verhaltens und der Auswirkungen des realen Systems
- Manipulation von Variablen und Eingangsparametern, um verschiedene Szenarien zu untersuchen und mögliche Ergebnisse abzuleiten
- → Abbildung auch von sehr komplexen Systemen, die nicht (vollständig) theoretisch und formelmäßig beschreibbar sind

#### **Warum Simulationen statt Experimente?**

Untersuchung am realen System zu aufwendig/teuer/gefährlich/..., reales System existiert (noch nicht), reales System zu komplex etc.

#### Wozu werden Simulationen im Bereich der Energiesysteme eingesetzt?

- Planung und Optimierung, z. B. Integration erneuerbarer Energien
- Lastprognose, z. B. für den effizienten Einsatz der vorhandenen Erzeugungsanlagen
- Netzanalyse und –management, z. B. Untersuchung von Störungen und Netzstabilität
- Energieeffizienzerhöhung, z. B. durch intelligente Betriebsstrategien und Regelungsverfahren
- etc.

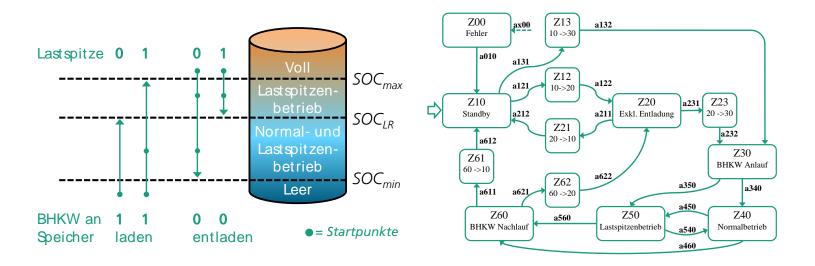


### Beispiel vom IISB



#### Nutzung BHKW zur Wärme-/Stromversorgung und zur Lastspitzenreduktion

- 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







#### Blockheizkraftwerk des Jahres 2020

#### BHKW des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB

"BHKW des Monats Juni 2020" von Energie & Management

Betreiber: Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementeterhnologie IISB

BHKW-Lieferant: Tuxhorn Blockheizkraftwerke GmbH

Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie 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 überzeugte die Jury. Das hier gewählte Energieversorgungskonzept kann seine Vorbläcknirkung für Anlagen zur Energievende entfalten.







### Beispiel vom IISB

#### BHKW mit Wärmespeicher und Batterie

#### Vergleich Simulationsergebnis mit Messung aus dem Reallabor am Fraunhofer IISB

Zwei Lastspitzen erkennbar

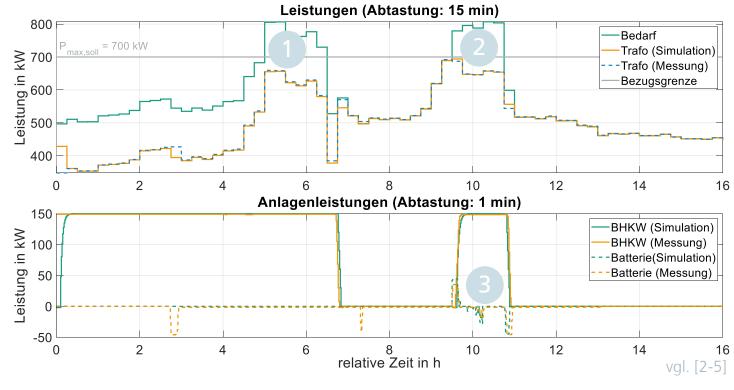
BHKW läuft bereits → keine Aktion erforderlich

BHKW wird zugeschaltet

 Batterie überbrückt bei den Anfahrvorgang des BHKW und wird mit überschüssiger Leistung geladen

#### **Ergebnisse**

- Reduktion der Lastspitze um 14 % → 15.000 € Ersparnis pro Jahr bei LP von 150 €/kW
- Simulation und Messungen stimmen sehr gut überein
  - MAE (Trafo 15 min) liegt bei 3,9 kW
  - Max. Abweichung liegt bei ca. 25 kW



Public

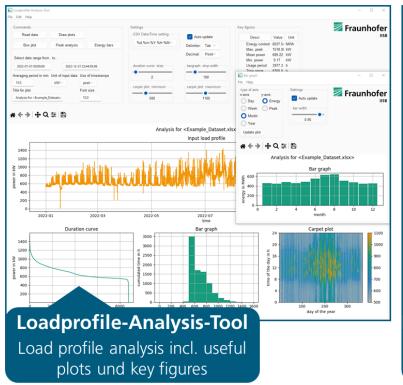


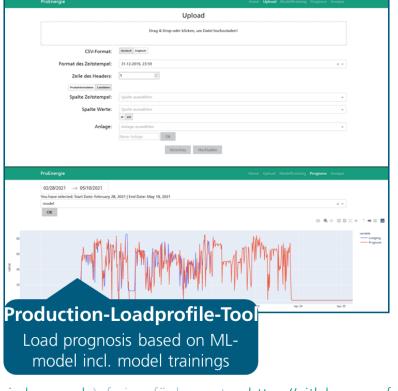
Open-Source Softwaretoolbox für die Optimierung der EGI

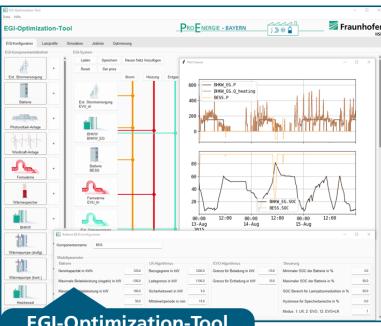
PRO FNERGIE - BAYERN



#### Übersicht über die Softwaretoolbox







**EGI-Optimization-Tool** 

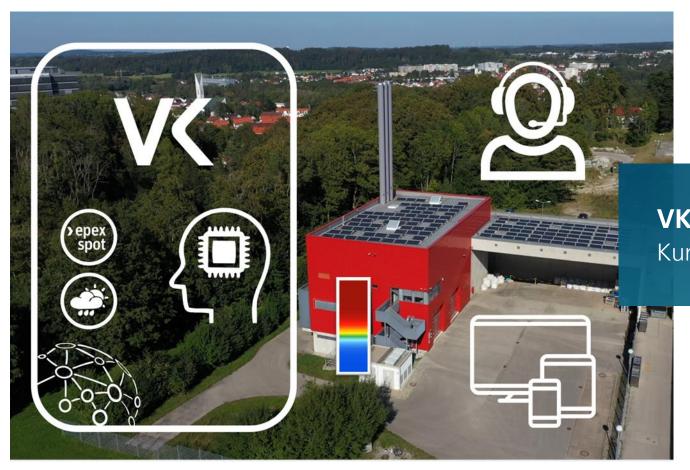
Simulation and optimization of the free configurable EGI

Screenshots der ProEnergie-Softwaretools (<a href="https://proenergie-bayern.de">https://proenergie-bayern.de</a>), frei verfügbar unter: <a href="https://gitlab.cc-asp.fraunhofer.de/proenergie-bayern.de">https://gitlab.cc-asp.fraunhofer.de/proenergie</a>

vgl. [6,7]



### **VK Energie**



**VK Energie** 

Kurzvorstellung und Leistungen



### **VK Energie**

optimieren wir erfolgreich Energiesysteme

seit 2017 > 100 Kunden

aus Energieversorgung und Industrie

>300 MW

elektrische Leistung in unserem Anlagenportfolio

20 Personen

arbeiten für Ihren Erfolg

Public



Seite 15 15 05 2024 © VK Energie

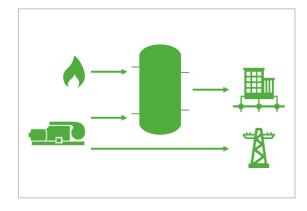
### **VK Energie**

### Unsere Leistungen

### **V** Betriebsoptimierung



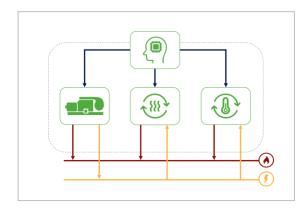
Einsatzbereiche



**KWK-Anlagen** 

### **V** Simulation





iKWK-Systeme

### **V** Redispatch





**Dezentrale Energiesysteme** 



### **Optimierung von Wärmenetzen**



Optimierung von Wärmenetzen
Simulationsgestützte Betriebsoptimierung



### **VK Betriebsoptimierung**

Seite 18

15.05.2024

Mehrstufiger Optimierungsprozess

#### Langzeitoptimierung täglich Einhaltung von Jahres- und Monatszielen Flexprämie, Primärenergiefaktor, iKWK-Referenzwärme etc. **Day-Ahead Optimierung** täglich Optimierter Fahrplan für alle Erzeuger an allen Märkten > epexspot KI-basierte Prognosen Aktives Wärmespeichermanagement alle 15 min **Intraday Optimierung** Berücksichtigung von live Preissignalen, Störungen etc. > epexspot KI-basierte Prognosen Fahrplantreue & Vermeidung von Ausgleichsenergie **Echtzeitregelung** live Einhaltung der Wärmeverpflichtung Dynamische Erzeugerpriorisierung Leistungsregelung aller Erzeuger (Störungsvermeidung und optimale Speicherausnutzung) Ständiges Monitoring der Ergebnisse/Messdaten durch das VK-Operations-Team



© VK Energie Public

### **VK Betriebsoptimierung**

Multi Market Optimierung



# **EIN Optimierungsmodell**

Bestandteil der **V**(Betriebsoptimierung

vgl. [8]



Seite 19 15.05.2024 © VK Energie **Public** 

### Referenz: Stadtwerke Georgsmarienhütte

CO<sub>2</sub>-Einsparung durch Abwärmenutzung

#### CO2-Einsparung durch Abwärmenutzung

- BHKW-Betrieb (Biomethan) in Kombination mit Abwärmenutzung aus einem Stahlwerk
- Zusätzliche laufende Prognose der Stahlwerk-Abwärme
- Spotmarktoptimierung mit gleichzeitiger Regelleistungsvermarktung

### Mehrerlöse

80 € pro MWh Mehrerlöse

330.000 € pro Jahr

**CO<sub>2</sub>-Einsparung** 

220 Tonnen pro Jahr

Public



#### Anlagensteckbrief Georgsmarienhütte



1 x 2 MW<sub>el</sub> BHKW



1 x 2,5 MW<sub>th</sub> Gaskessel



1 x 4,5 MW<sub>th</sub> Ölkessel



3.800 m<sup>3</sup> Wärmespeicher

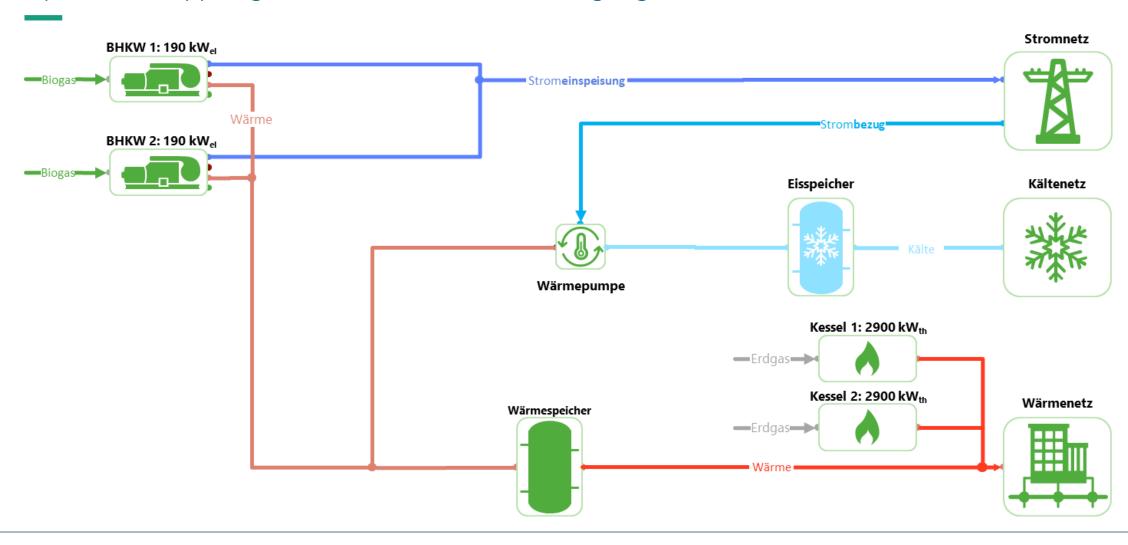




Seite 20

### **Referenz: REWAG**

Optimierte Kopplung von Wärme- und Kälteerzeugung





### Referenz: REWAG

Optimierte Kopplung von Wärme- und Kälteerzeugung

#### Optimierte Kopplung von Wärme- und Kälteerzeugung

- Stabile Kälteversorgung im Sommer bei gleichzeitiger optimaler Abwärmenutzung im Fernwärme-Netz
- Prognose f
  ür K
  älte- und W
  ärmebedarf
- Simultanes Wärmespeichermanagement für Eis- und Heißwasserspeicher
- Reduktion des Biomethaneinsatzes durch optimierte Nutzung von Abwärme aus der Kälteerzeugung

### Mehrerlöse

49 € pro MWh Mehrerlöse

**40.000 €** pro Jahr

**CO<sub>2</sub>-Einsparung** 

220 Tonnen pro Jahr



## Anlagensteckbrief Marina Quartier



2 x 190 kW<sub>el</sub> BHKW



2 x 2,9 MW<sub>th</sub> Gaskessel



2 x 300 kW<sub>th</sub> Kältemaschinen



20 m³ Wärmespeicher

7 m<sup>3</sup> Eisspeicher



Seite 22 15.05.2024 © VK Energie Public

### Relevante Publikationen

- C. Lange, R. Öchsner, J. Geiling, A. Rueß. "Intelligent Energy Management". Presentation (2022). Fraunhofer IISB. DOI: 10.13140/RG.2.2.33911.29602.
- C. Lange. "Energiesektoren-übergreifende Lastspitzenreduktion mit elektrischen und thermischen Energiespeichern". PhD-Thesis, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) (2021). URN: urn:nbn:de:bvb:29-opus4-169778.
- C. Lange. "BHKW des Jahres 2020. BHKW mit Wärmespeicher und Batterie zur Strom-/Wärmeversorgung sowie Lastspitzenreduktion". Presentation. BHKW 2021 Innovative Technologien und neue Rahmenbedingungen, 09.11.2021 – 10.11.2021, Magdeburg (2021). DOI: 10.13140/RG.2.2.26423.80803.
- C. Lange, A. Rueß, A. Nuß, R. Öchsner, M. März. "Dimensioning battery energy storage systems for peak shaving based on a real-time control algorithm". Applied Energy 280 (2020), 115993. ISSN: 306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115993.
- R. Öchsner, A. Nuß, C. Lange, A. Rueß. "Research Platform: Decentralized Energy System for Sector Coupling". Chemical Engineering & Technology 42.9 (2019), S. 1886–1894. DOI: 10.1002/ceat.201800714.
- A. Trenz, C. Hoffmann, C. Lange, R. Öchsner. "Increasing energy efficiency and flexibility by forecasting production energy demand based on machine learning". Manufacturing Driving Circular Economy. Hrsg. von Kohl, H., Seliger, G., Dietrich, F. GCSM 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-031-28839-5 50.
- IISB. "Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen durch intelligentes Energiemanagement: Open-Source-Softwaretoolbox für Unternehmen". Press release (2023). Available online: <a href="https://www.iisb.fraunhofer.de/en/press">www.iisb.fraunhofer.de/en/press</a> media/press releases/pressearchiv/archiv 2023/open-source-softwaretoolbox.html (access: 29.04.2024).
- A. Zeiselmair, A. Möbius, J. Jungwirth und T. Kern. "Optimierte Intraday-Vermarktung von dezentralen Wärme- und Kälteerzeugern". Energiewirtschaftliche Tagesfragen 73 Jahrgang 2023, Heft 11.





Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology IISB



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit





Dr.-Ing Christopher Lange Fraunhofer IISB Schottkystraße 10 | 91058 Erlangen

<u>christopher.lange@iisb.fraunhofer.de</u> <u>www.iisb.fraunhofer.de</u> Christian Rettenbeck VK Energie GmbH Goethestraße 25 a | 80336 München

<u>christian.rettenbeck@vk-energie.de</u> <u>www.vk-energie.de</u>