

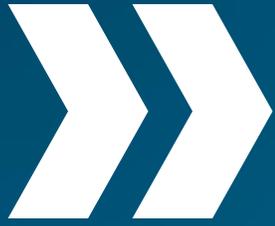
A modern, multi-story office building with a glass facade and a prominent glass balcony. The building is surrounded by greenery and a paved plaza. A white flag with the Fraunhofer logo is visible on the left. The sky is blue with some clouds.

Kognitive Energiesysteme

- Entwicklungen, Technologien und mögliche Anwendungen -

VDE-Symposium 2024: Einsatz und Anwendung
künstlicher Intelligenz in der Energiewirtschaft
Erfurt, 27.11.2024

Prof. Dr. Peter Bretschneider, Fraunhofer IOSB-AST



IOSB GESAMT

822 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

- ca. 190 Studierende
- Hauptsitz: Karlsruhe

75 Millionen Euro Haushalt
Betrieb und Investitionen 2023

17 Wissenschaftliche Abteilungen

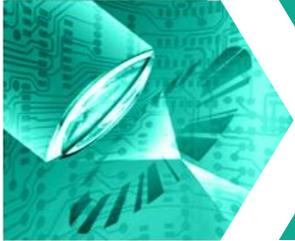
5 Geschäftsfelder

8 Standorte



Kernkompetenzen

Optronik – Systemtechnik – Bildauswertung



Optronik

Verständnis und Kontrolle der Erzeugung von Licht, seiner Strahlformung, Ausbreitung und Umwandlung in elektronische Signale



Systemtechnik

Fähigkeit der Analyse, des Verständnisses, der Modellierung, der Entwicklung und Beherrschung komplexer Systeme



Bildauswertung

Aufbereitung, Echtzeitverarbeitung sowie automatische und interaktive Informationsgewinnung aus Bildern und Videos



Intelligente, cross-sektorale Lösungen und Datenräume für Quartiere und Gewerbe
Bundesweite Quartier- und Gewerbelösungen für cross-sektorale und klimaneutrale Innovationslösungen im Rahmen des Open Digital Hub (ODH) Data sind mit der ersten Ansprechpartner in der Fraunhofer-Gesellschaft.



UV-Technologien
F&E-Auftragsforschung für Analytiklösungen sowie individualisierte, hochwirksame Desinfektionsanwendungen mit modernsten UV-LEDs.



Lernlabor Cybersicherheit
State-of-the-Art Forschung im Bereich der IT-Cybersicherheit für kritische Infrastrukturen. Umfassendes Schulungsportfolio. Individuelle Kundenberatung vor Ort.



Intelligente E-Mobilität
Netzdienliche und kostenoptimale Ladelösungen.



DEDAVE
Tiefentaugliches, autonomes Unterwasserfahrzeug für vielfältige Explorations- und Inspektionsaufgaben.



Automationslösungen für mobile Arbeitsmaschinen
F&E-Auftragsforschung für Assistenzsysteme und autonome Zusatzfunktionen von der Konzeptentwicklung bis zur Validierung im Realbetrieb.



Smarte Quartiere
Cross-sektorale Energiemanagementlösungen für die Energiewende in der Stadt.



Quantencomputing
Neue Ansätze für energiewirtschaftliche Berechnungen.
© Fraunhofer IISW, © IBM Research



Was sind Kognitive Energiesysteme?

Definition Fraunhofer IOSB-AST 2020

Ein **Kognitives Energiesystem** ist in der Lage, mittels informationserfassenden und -verarbeitenden Systemen seine **Situation** zu **erfassen** (Messwerterfassung), diese **in Bezug** auf die **Sollsituation** zu **bewerten** (Soll-Ist-Vergleich), **selbständig Maßnahmen** zur **Erreichung** einer **nichttrivialen Sollsituation** zu ergreifen (Steuerung und Regelung) und **eigenständig** unter **Beachtung des** jeweils gültigen **Autonomielevels (1 bis 5)** die ergriffenen **Maßnahmen** hinsichtlich ihrer **Leistungsfähigkeit** zu bewerten und darauf basierend Modelle, Entscheidungskriterien, Zielfunktionen und/oder Betriebsführungsstrategien automatisch zu adaptieren (automatisches Lernen).

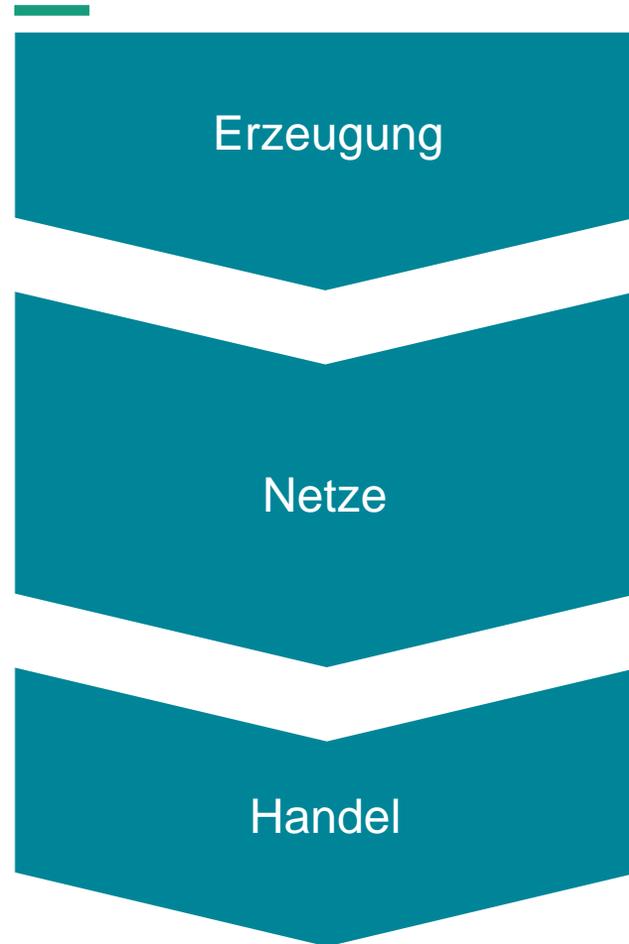
Autonomiestufen (Taxonomie)

- **0:** keine Assistenz („Operatormodus“), der Operator führt das Energiesystem selbst
- **1:** Operator-Assistenz. Bestimmte Assistenzsysteme unterstützen den Operator bei der Überwachung und Führung des Energiesystems, z.B. Entscheidungsvorschläge für den optimalen Anlageneinsatz / optimale Betriebsführung des Energiesystems
- **2:** Teilautomatisierung. Funktionen wie Datenplausibilität, Vorhersage, Datenverarbeitungsprozesse werden von den Assistenzsystemen übernommen. Der Operator überwacht die korrekte Abarbeitung der Prozesse.
- **3:** Bedingungsautomatisierung. Der Operator muss das System nicht dauernd überwachen. Die Assistenzsysteme führen selbstständig Funktionen für die Vorhersage, Steuerung, Regelung und Betriebsführung des Energiesystems durch. Der Operator wird bei Bedarf innerhalb einer Vorwarnzeit vom System informiert, wenn teilautomatisierte Verarbeitungsschritte abgeschlossen sind und der Anstoß von Folgeprozessen durch das Expertenwissen des Operators vorzunehmen ist.
- **4:** Hochautomatisierung. Die Systemführung (Steuerung und Regelung sowie Betriebsführung) des Energiesystems wird dauerhaft von den Assistenzsystemen übernommen. Werden die Systemführungsaufgaben von den Assistenzsystemen nicht mehr bewältigt, wird der Operator automatisch aufgefordert, die Systemführung im Fall eingeschränkter Funktionalität oder der Verletzung der zu erreichenden Prozessgüte zu übernehmen, bzw. manuell einzugreifen und die Entscheidungsvorschläge durch sein Expertenwissen zu bewerten und zur automatisierten Abarbeitung freizugeben.
- **5:** Vollautomatisierung. Kein Operator erforderlich. Außer dem Festlegen der Zielfunktion ist kein menschliches Eingreifen erforderlich.

In Anlehnung an Quelle: <https://www.iks.fraunhofer.de/de/themen/kognitive-systeme.html>; Abruf 25.11.2024

Wo werden KI-Anwendungen im Energiesektor gesehen?

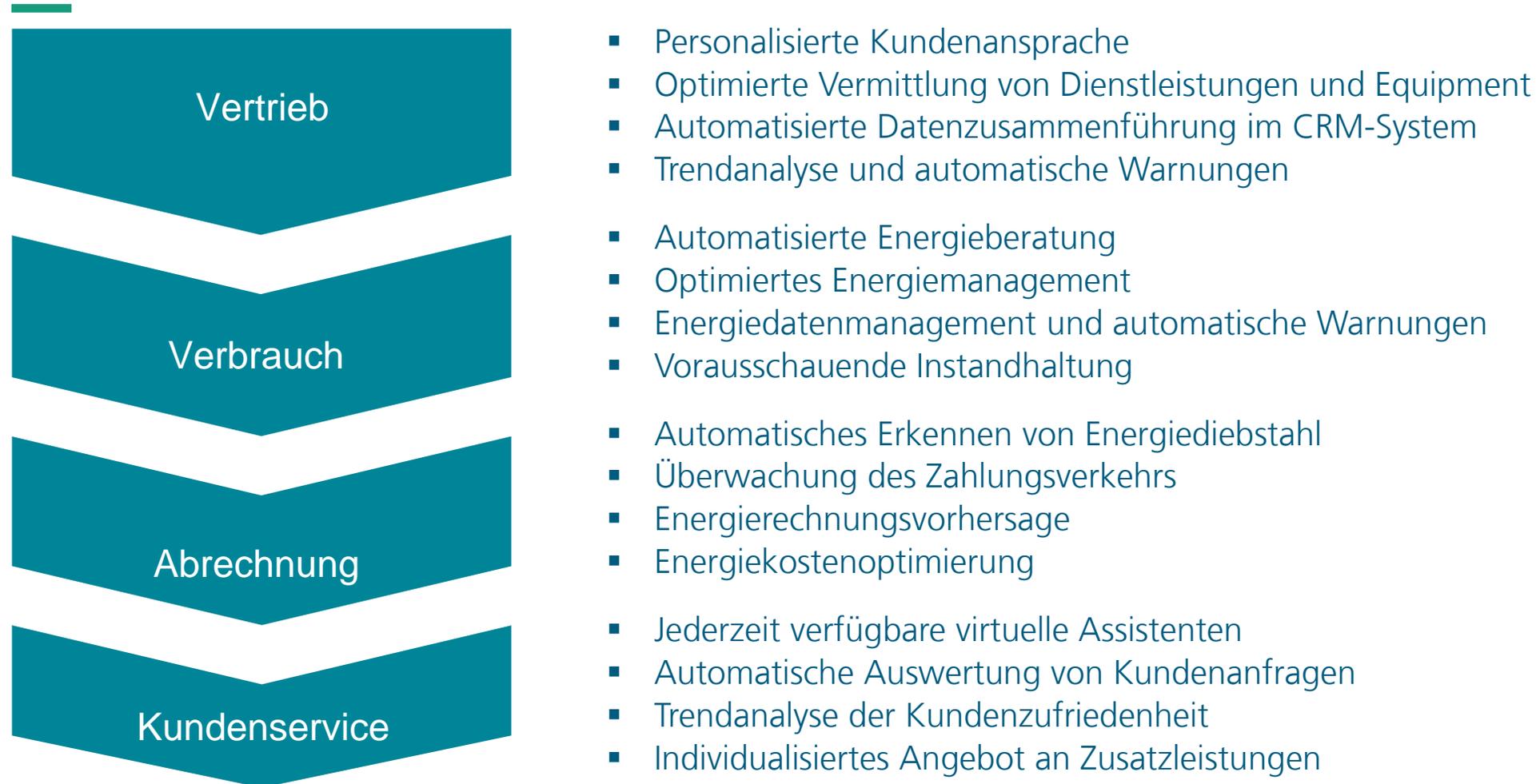
Anwendungen entlang der Wertschöpfungskette



- Ertragsoptimierung
 - Optimierung von Einsatzplanung und Portfoliomanagement
 - Vorausschauende und autonome Instandhaltung
-
- Datenaufbereitung und Unterstützung der Netzplanung
 - Prognosen zur optimierten Netzsteuerung
 - Automatisiertes Demand-Side-Management
 - Vorausschauende und autonome Instandhaltung
-
- Optimierte Last- und Ertragsprognose
 - Optimierte Marktanalyse und Preisprognosen
 - Automatisierter Flexibilitätshandel
 - Optimiertes Bilanzkreismanagement

Wo werden KI-Anwendungen im Energiesektor gesehen?

Anwendungen entlang der Wertschöpfungskette



Quelle: BF Smart Service Welt II | Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE : „Anwendung von künstlicher Intelligenz in der Energiewirtschaft“, Berlin, 05/2019

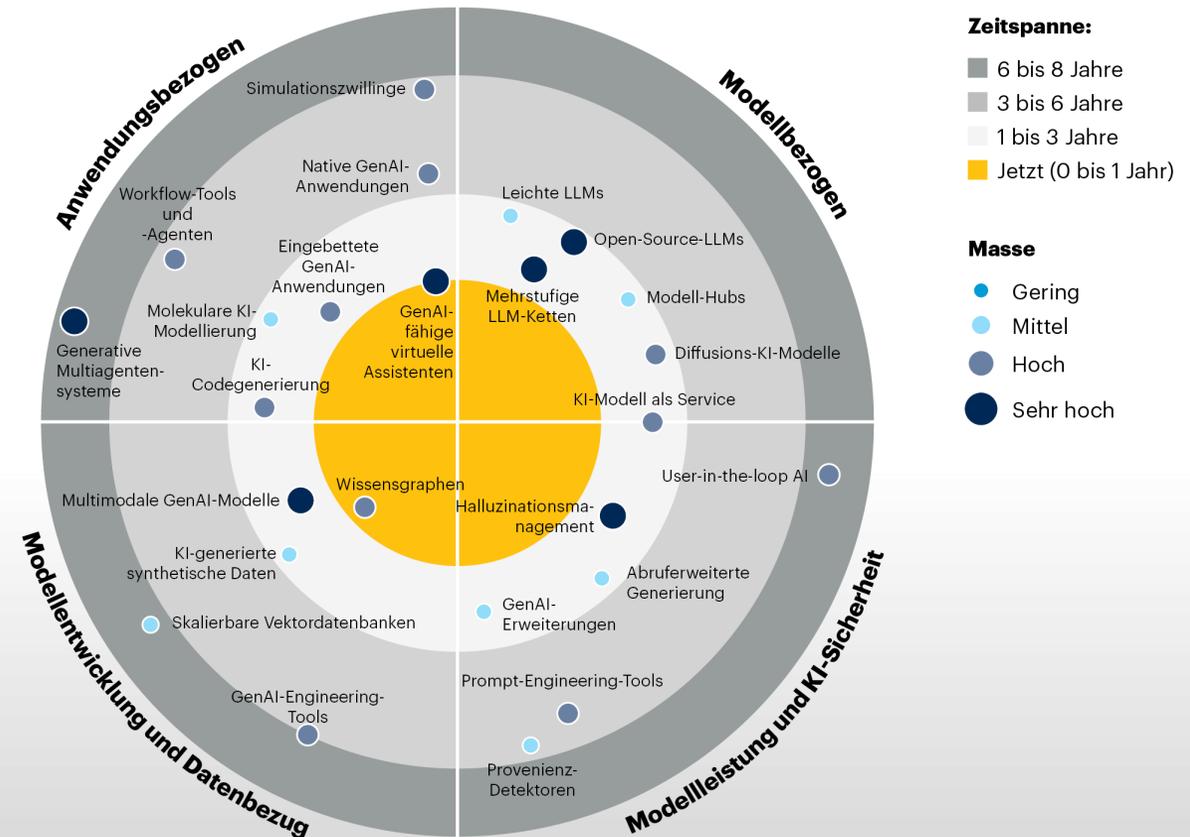
Welche Trends gibt es im KI-Bereich?

Gartner – Impact Radar zur generativen KI (genAI)

Empfehlungen für die Entwicklung von genAI-fähigen Produkten und Dienstleistungen:

- Erstellung eines Plans zum Einsatz und Testen
- Anwendungsfälle, die weit verbreitet sind und einen echten Mehrwert bieten
- Erstellung einer Investitions-Roadmap mit Prioritäten
- Identifikation von Anwendungsfällen, der mit genAI einen echten Wettbewerbsvorteil erlangen
- Wachsamkeit bei langfristigen Investitionen in die genAI-Technologie

Impact Radar für generative KI



Quelle: Gartner
© 2023 Gartner, Inc. und/oder deren Tochterunternehmen. Alle Rechte vorbehalten. 2683355

Gartner

<https://www.gartner.de/de/artikel/gen-ai-mit-dem-gartner-impact-radar-verstehen>; Abruf 05.11.2024

Welche Trends gibt es im KI-Bereich?

Kategorien des Trendradars zur generativen KI

Kategorie 1: Modellbasierte Innovationen

- Mittelpunkt der Angebotspalette von genAI
- elementare Komponenten wie große Sprachmodelle (LLMs)
- innovative Ansätze für Geschäftsmodelle wie Modelle als Dienstleistung (Models as a Service, MaaS)

Kategorie 2: Modellleistung und KI-Sicherheit

- Verringerung der Risiken und der Festlegung von Richtlinien für Anbieter zum verantwortungsvollen Umgang mit genAI durch Anwender

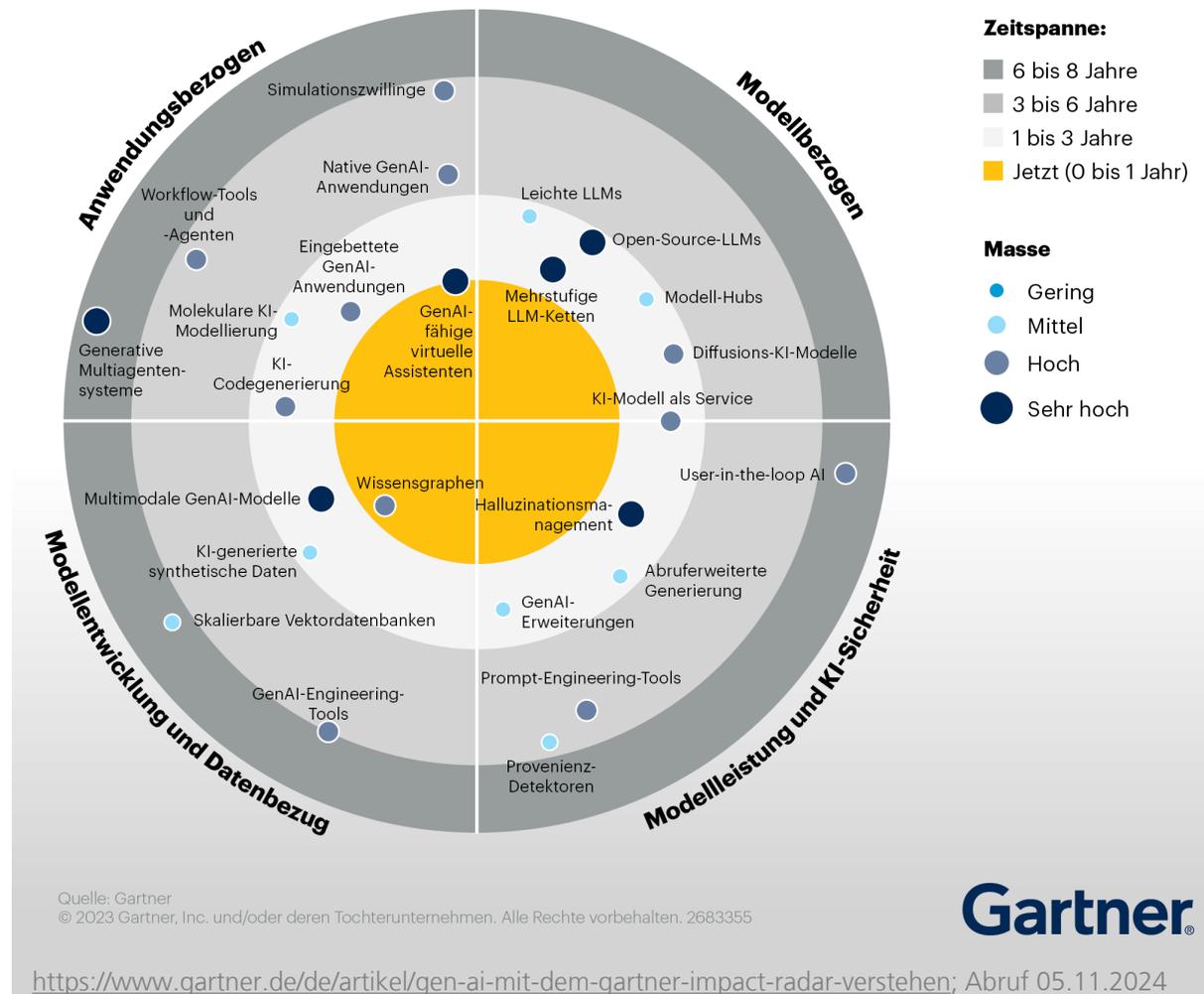
Kategorie 3: Modellentwicklung und Datenbezug

- Behandlung einiger entscheidender Schritte und Entscheidungen bei Aufbau und Weiterentwicklung eines genAI-Modells

Kategorie 4: KI-gestützte Anwendungen

- Neuartige Anwendungen, für neue als auch bestehende Anwendungsfälle

Impact Radar für generative KI



Welcher Wandel unserer Energieversorgung zu erwarten?

Sektorenkopplung wird zum Standard – Die Elektrifizierung von Wärme, Verkehr und Industrie

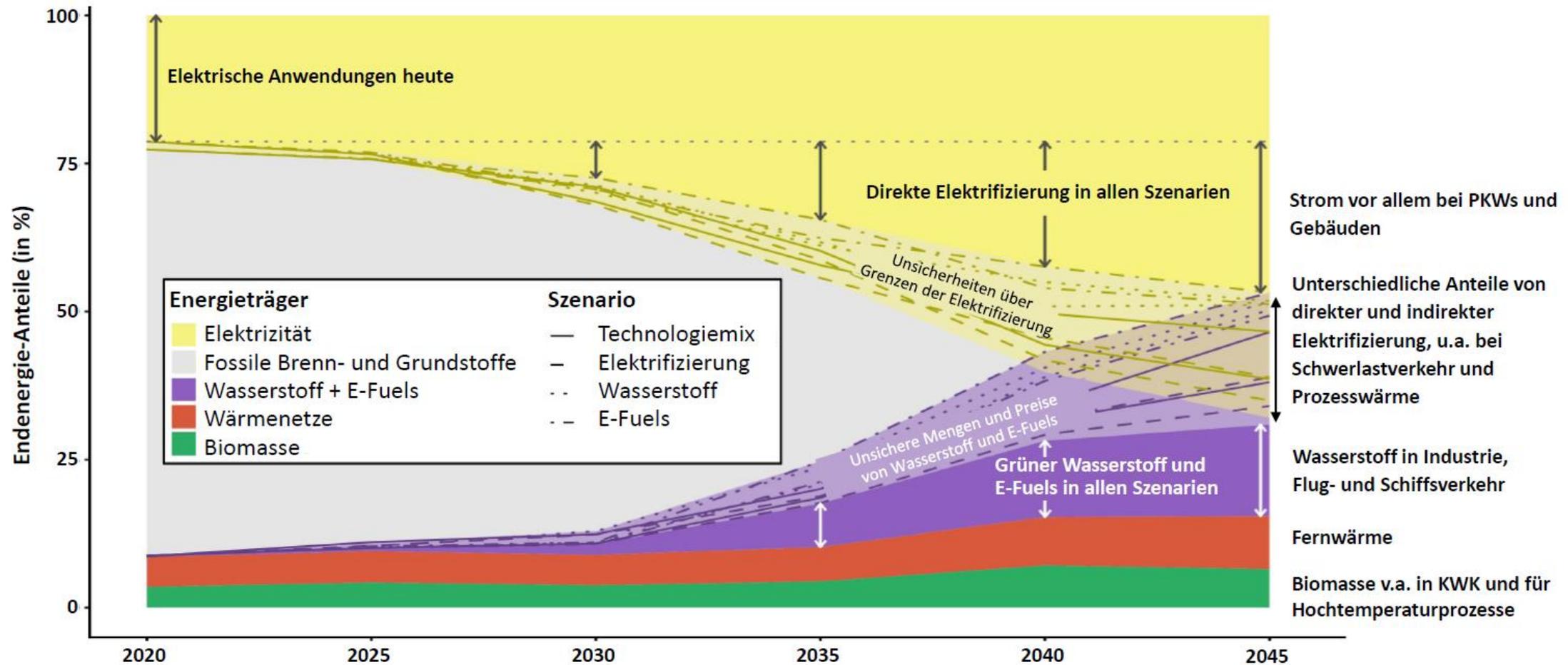
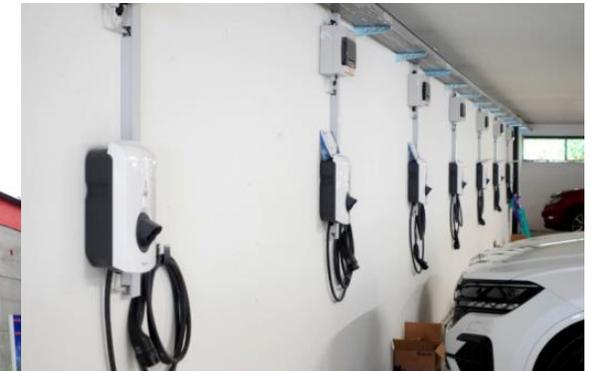


Abbildung: Ariadne Kurzdossier 2021: Durchstarten trotz Unsicherheit, 16.11.2021, <https://ariadneprojekt.de/publikation/eckpunkte-einer-anpassungsfaehigen-wasserstoffstrategie/>

Welcher Wandel unserer Energieversorgung zu erwarten?

Wichtigste Flexibilitätstechnologien vor Ort

- PV-Batteriesysteme
- Wärmepumpen und Wärmespeicher
- Ladeinfrastruktur und E-Mobilität
- KWK (Quartier, Gewerbe/Industrie, kommunal)

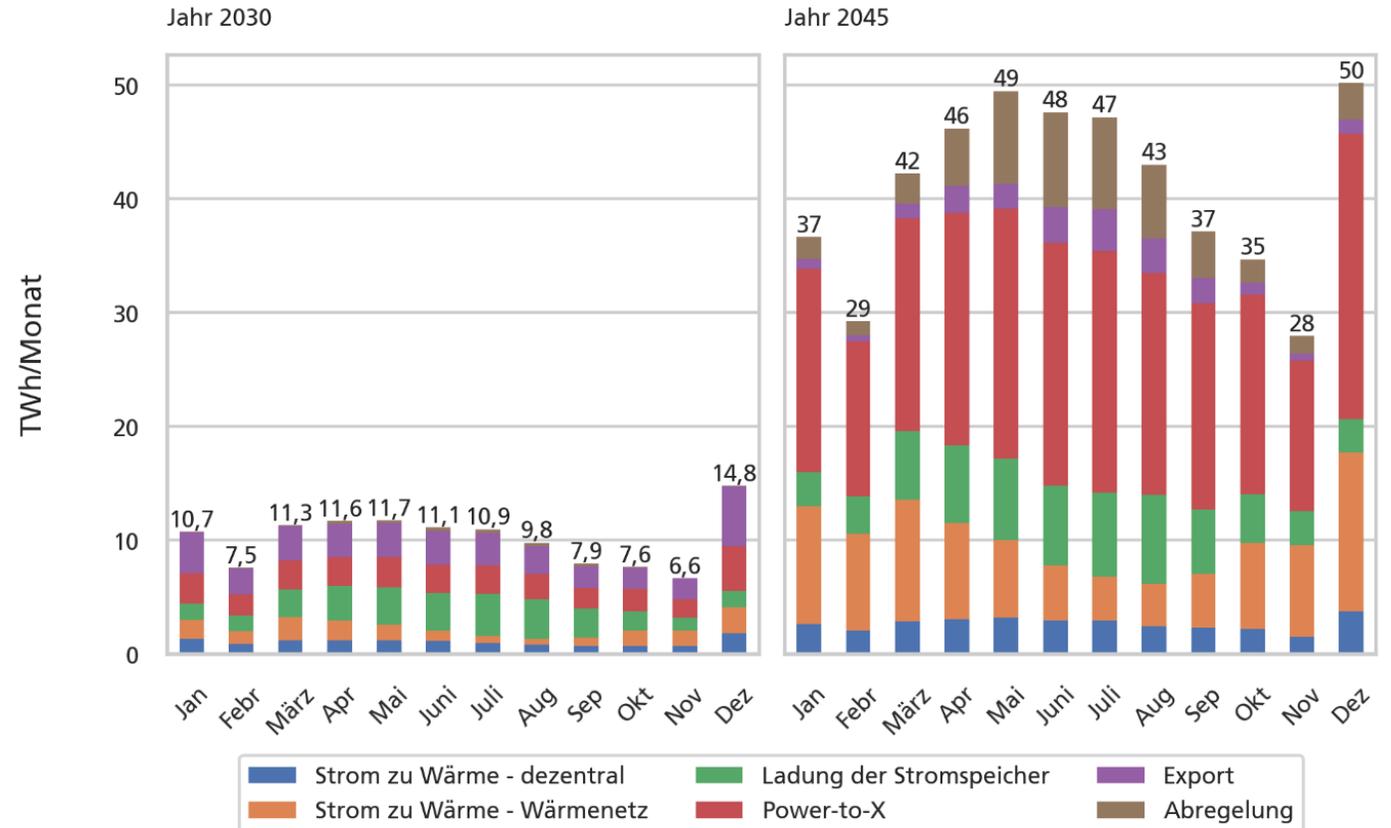


Welcher Wandel unserer Energieversorgung zu erwarten?

Zukünftiger Flexibilitätsbedarf und dessen Deckung (Studie Fraunhofer ISE 2021)

Flexibilitätsbedarf (negative Residuallast) 2030 und 2045 und dessen Deckung durch

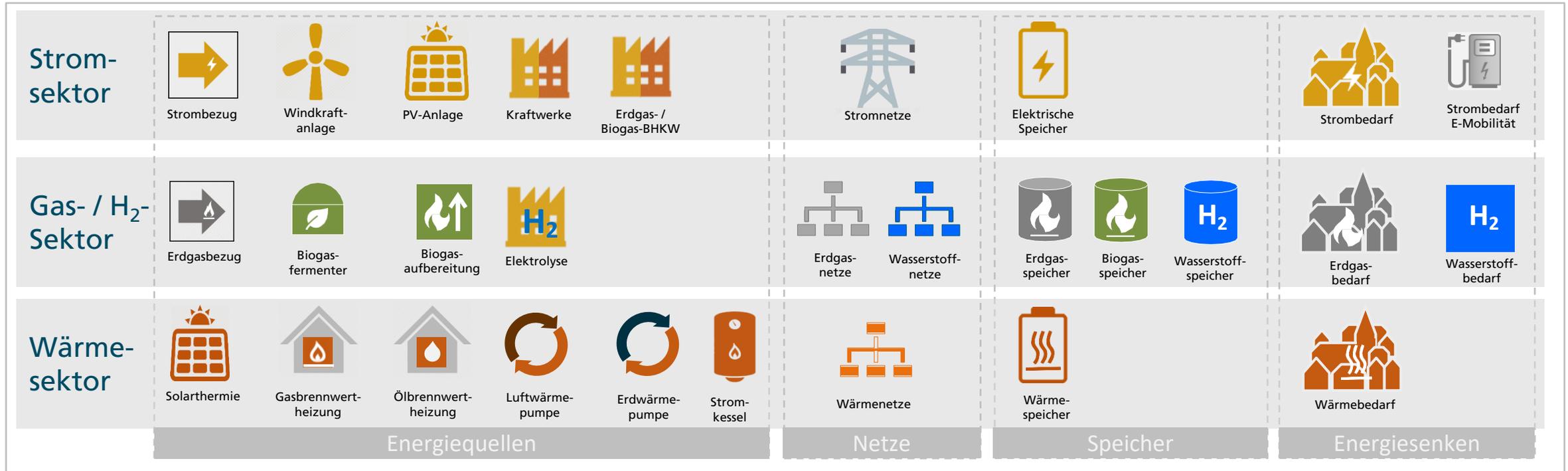
- Wärmepumpen Einzelgebäude
- Wärmepumpen in Wärmenetzen
- Batterien (stationär, mobil)
- Elektrolyse/Power-to-X
- Export
- Abregelung



Studie: Fraunhofer ISE, Wege zu einem Klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen, Update November 2021: Klimaneutralität 2045.

Welcher Wandel unserer Energieversorgung zu erwarten?

Betrachtungsrahmen und Fragestellungen für das Energieversorgungssystem der Zukunft

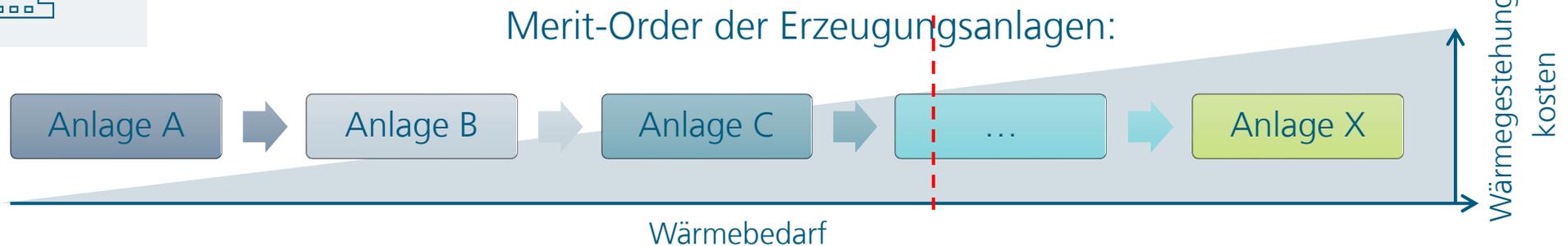
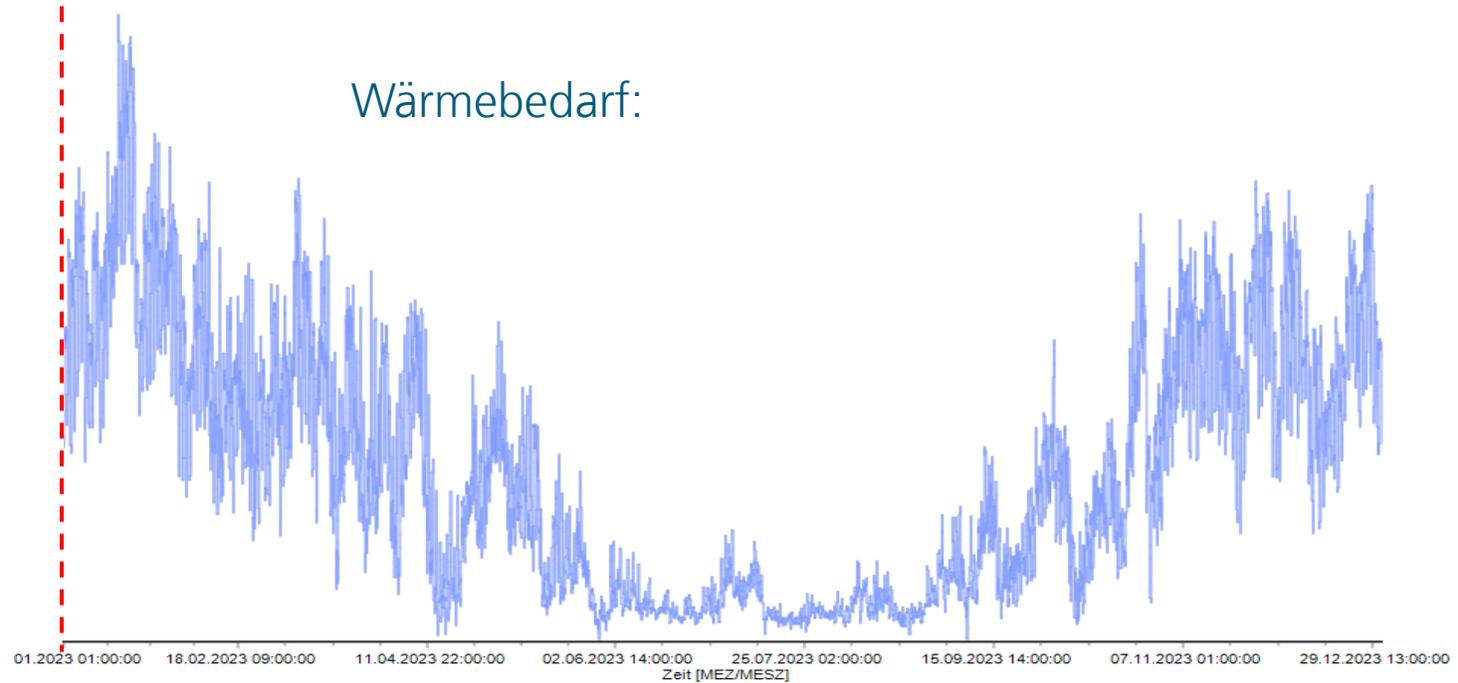
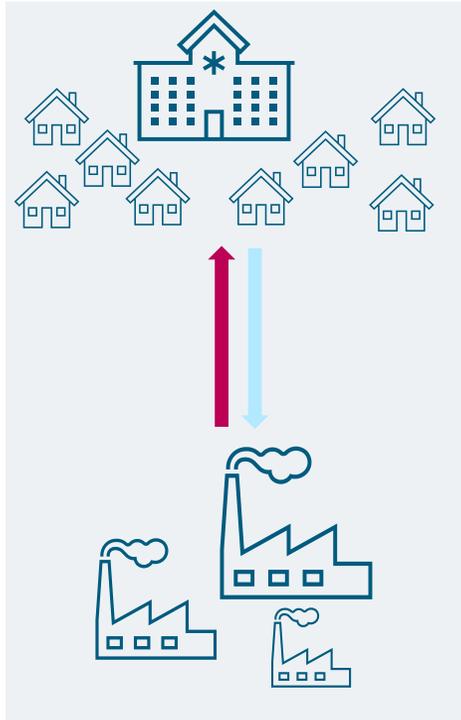


→ Was ist der optimale Technologiemix und Transformationspfad zur Weiterentwicklung der Energieversorgung entsprechend dem Zieldreieck Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Zuverlässigkeit?

→ Welche Technologien benötigen wir für einen optimalen und sicheren Systembetrieb?

Welcher Wandel unserer Energieversorgung zu erwarten?

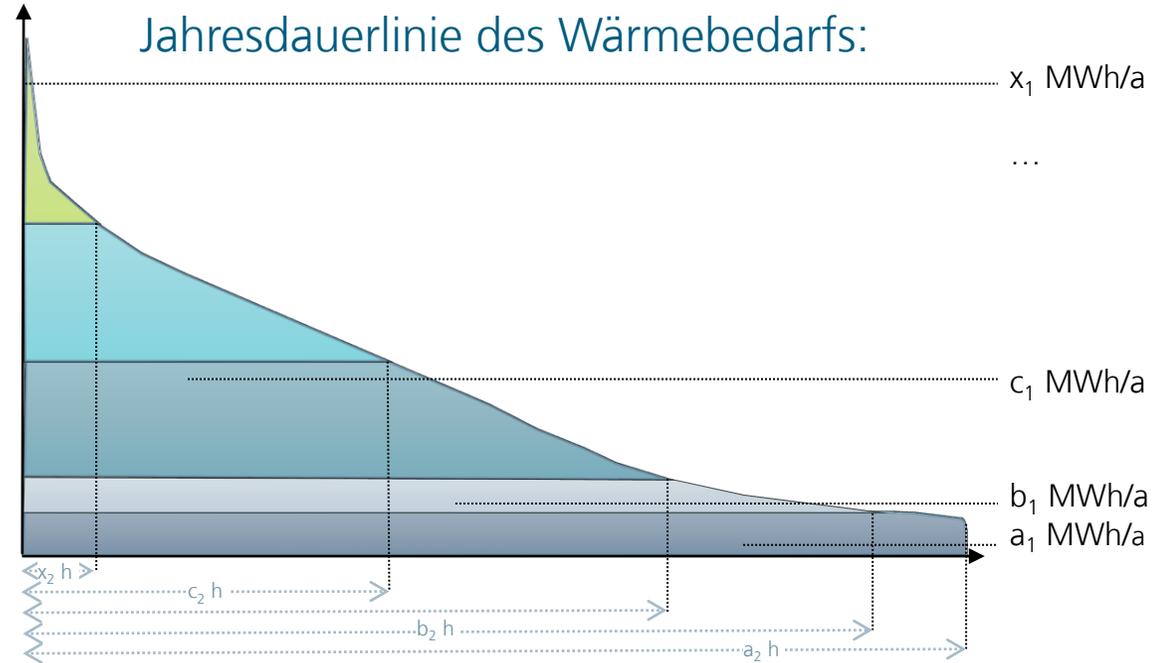
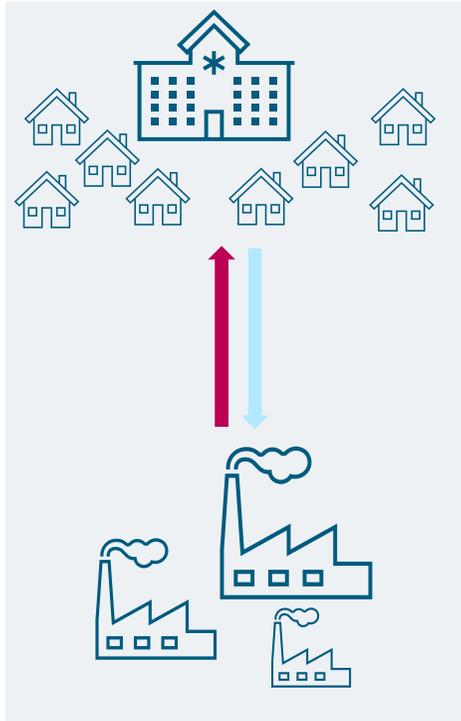
Wärmebedarf und Merit Order der Erzeugungsanlagen



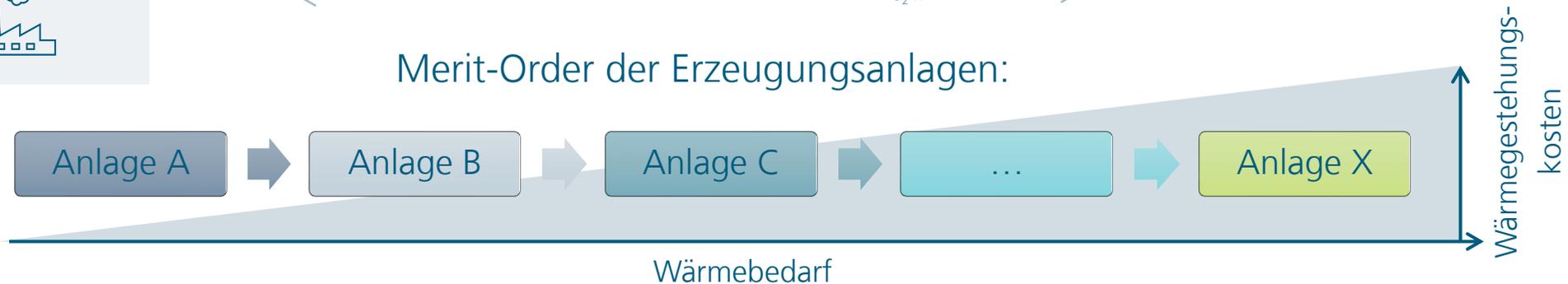
Anlageneinsatz

Welcher Wandel unserer Energieversorgung zu erwarten?

Wärmebedarf und Merit Order der Erzeugungsanlagen



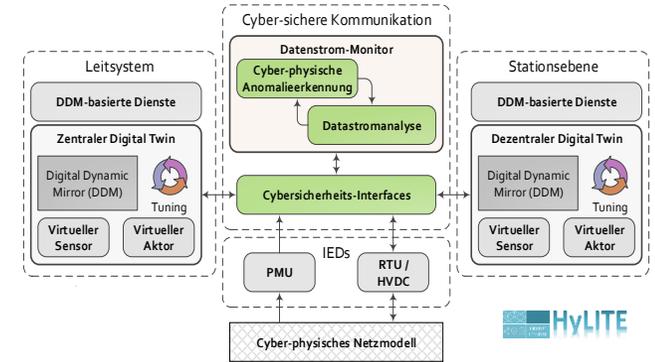
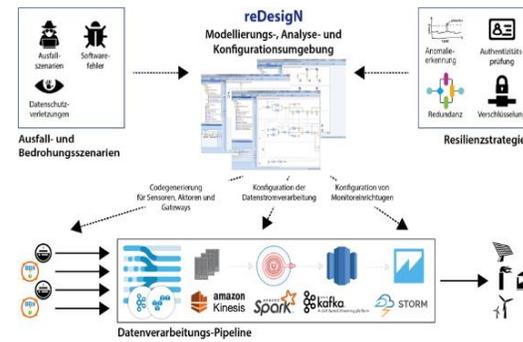
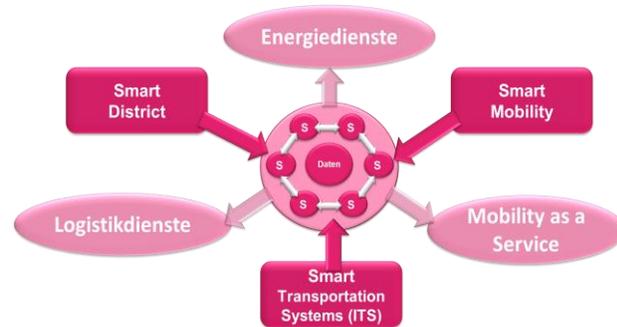
Merit-Order der Erzeugungsanlagen:



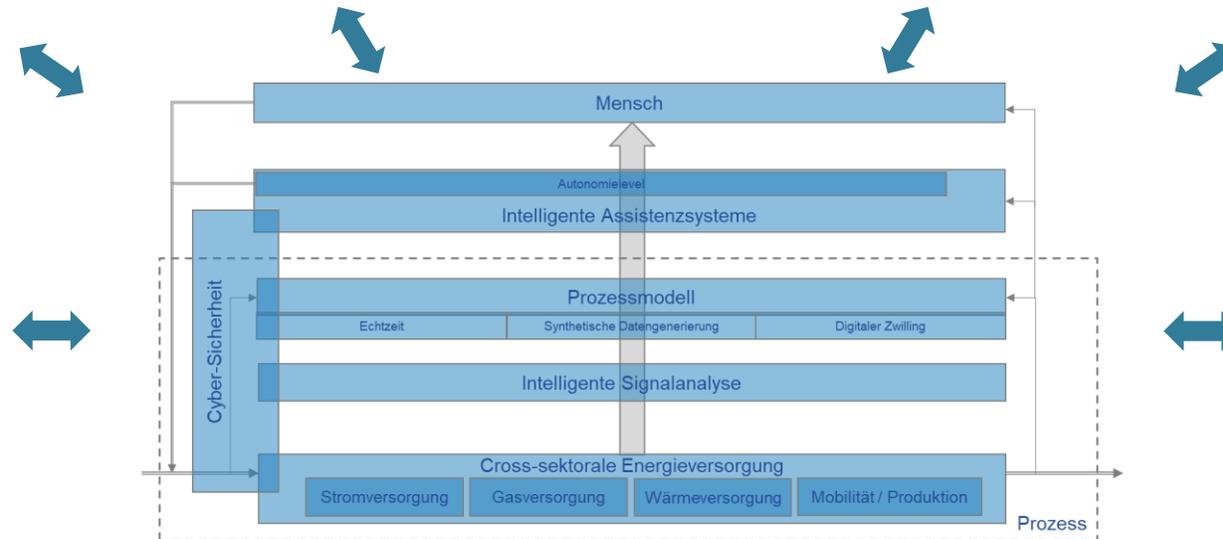
Wirtschaftlichkeit

Was wird für die Energieversorgung der Zukunft benötigt?

Assistenzsysteme für die optimale Betriebsführung und sicheren Netzbetrieb



ODH: Offenes, nutzerorientiertes und skalierbares IKT-Ökosystem für die wirtschaftliche, cross-sektorale Energieversorgung im Quartier

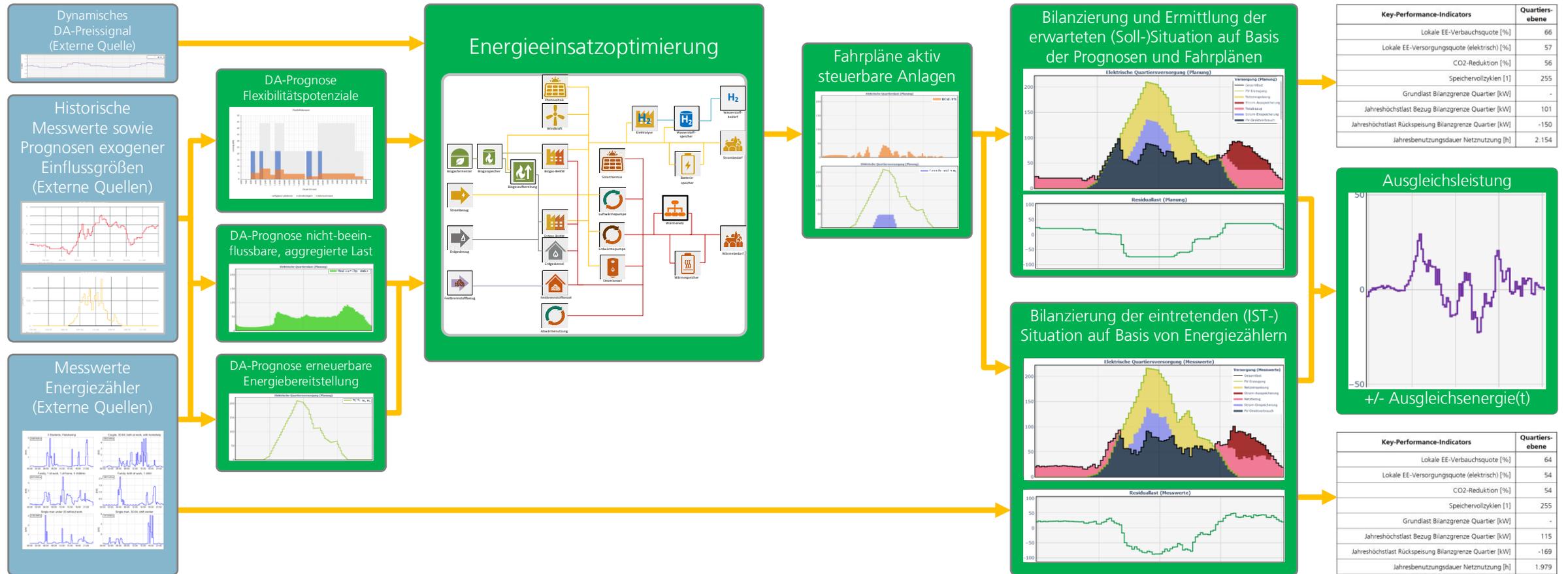


Lernlabor Cyber-Sicherheit für die Energie- und Wasserversorgung



Optimale Betriebsführung des Energieversorgungssystems

Automatische Datenerfassung, Datenaufbereitung, Vorhersage, Einsatzoptimierung und Bilanzierung



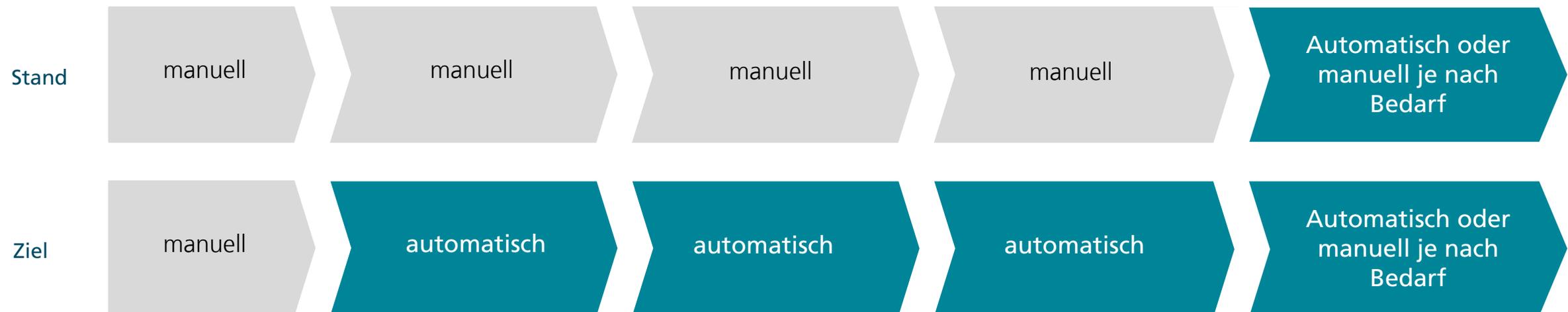
Optimale Betriebsführung des Energieversorgungssystems

Phasen für die Projektierung und Inbetriebnahme von EMS-Lösungen deren Automatisierung

Projektierungs- und Inbetriebnahmephasen



Automatisierungsgrad



Optimale Betriebsführung des Energieversorgungssystems

KI-Methodik für die automatische Datenplausibilisierung

Herausforderungen

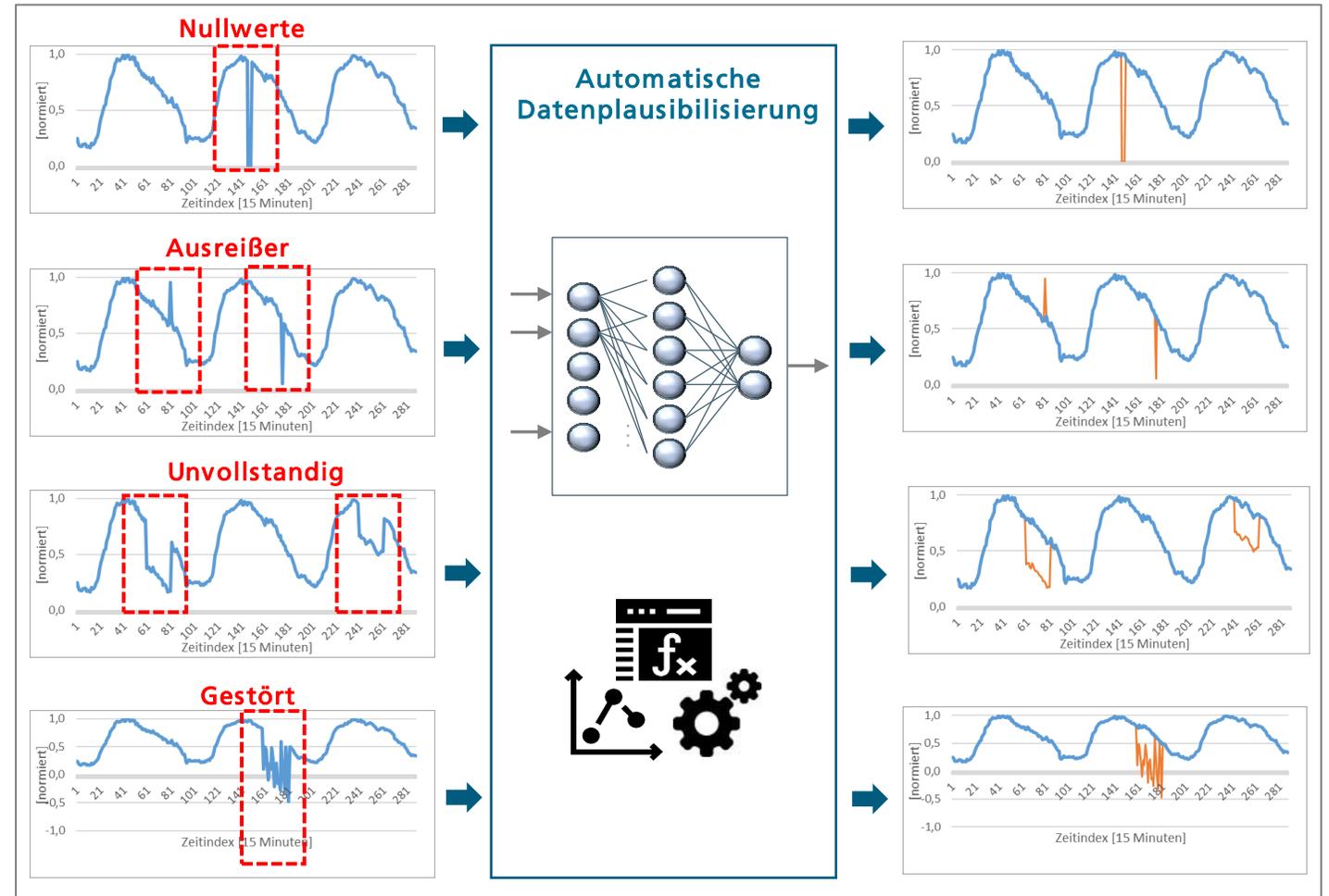
- Verfälschung der Prozessinformationen
Fehler bei Erfassung, Übertragung, Speicherung und gestörter Informationen
- Zunehmend ansteigendes Datenaufkommen durch Digitalisierung

Ansatz

- Machine Learning basierende Methoden
- Klassifikation unterschiedlicher Anomalietypen
- Data Replacement je Anomalietyp

Lösungstand

- **Softwarewerkzeug** mit nachgewiesener Funktionsfähigkeit verfügbar
- Automatische Fehlererkennung und Korrektur **auch für unbekannte Zeitreihen**
- Effiziente, skalierbare automatische Plausibilisierung **von Zeitreihen**



Optimale Betriebsführung des Energieversorgungssystems

Umfassende Methodenbibliothek zur Zeitreihenvorhersage

Herausforderungen:

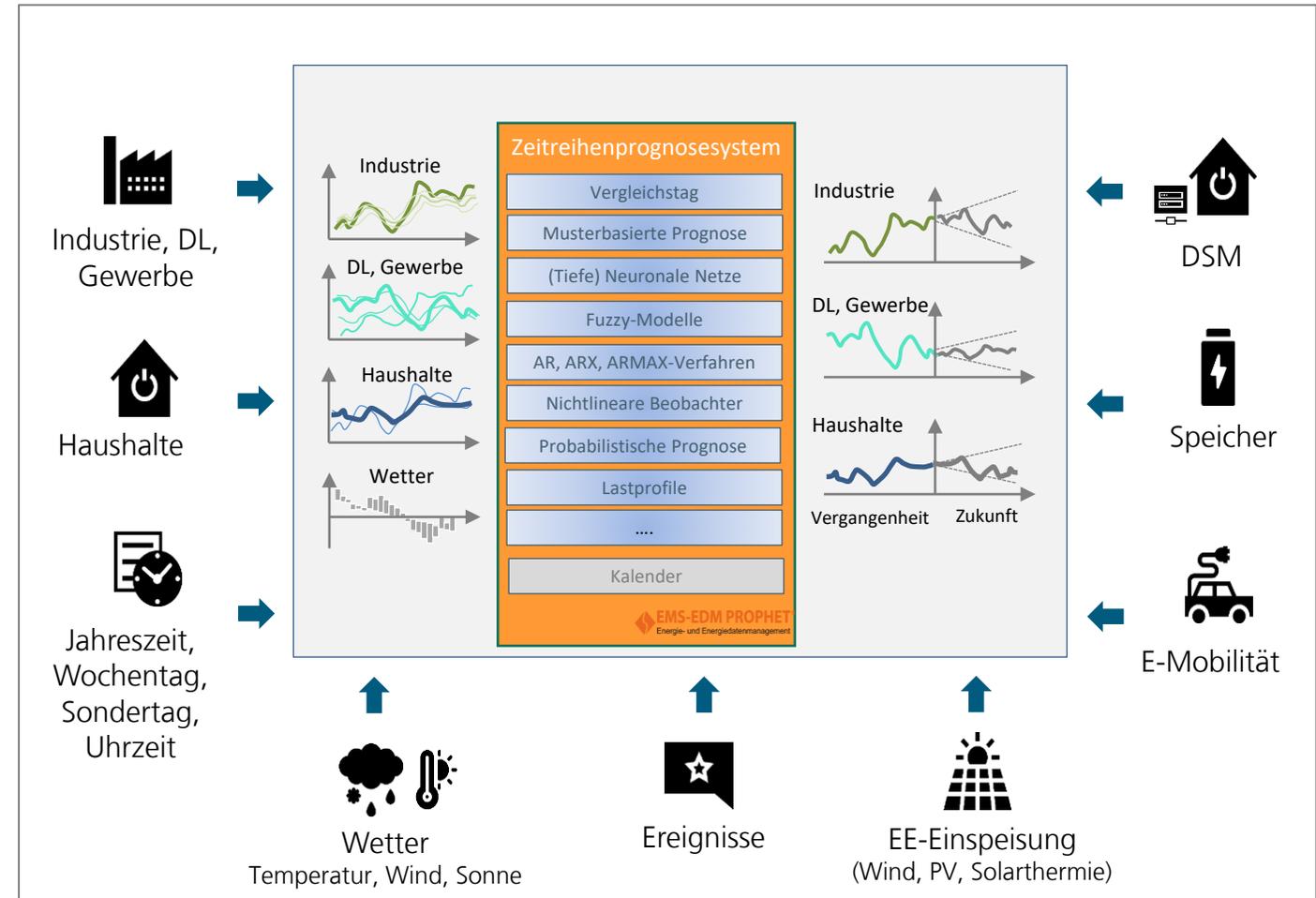
- Zunehmende kleinteiligere Betrachtung der Energieversorgung im Zuge der Digitalisierung
- Erschließung der Sektoren Strom, Gas, Wärme/Kälte und Mobilität in Anbetracht der Sektorenkopplung
- Hoher Engineering-Aufwand und umfassendes Expertenwissen

Ansatz:

- Zeitreihenprognosebibliothek unterschiedlichster Verfahren einschließlich KI-basierter Methoden
- Machine Learning basierende Methoden

Lösungsstand:

- Softwarelösung EMS-EDM PROPHET® verfügbar
- Methodenbibliothek für Strom, Gas und Wärme
- Transfer-Learning-Ansätze in Umsetzung



Optimale Betriebsführung des Energieversorgungssystems

KI-Methodik für die Vorhersage beeinflusster Zeitreihen

Herausforderungen

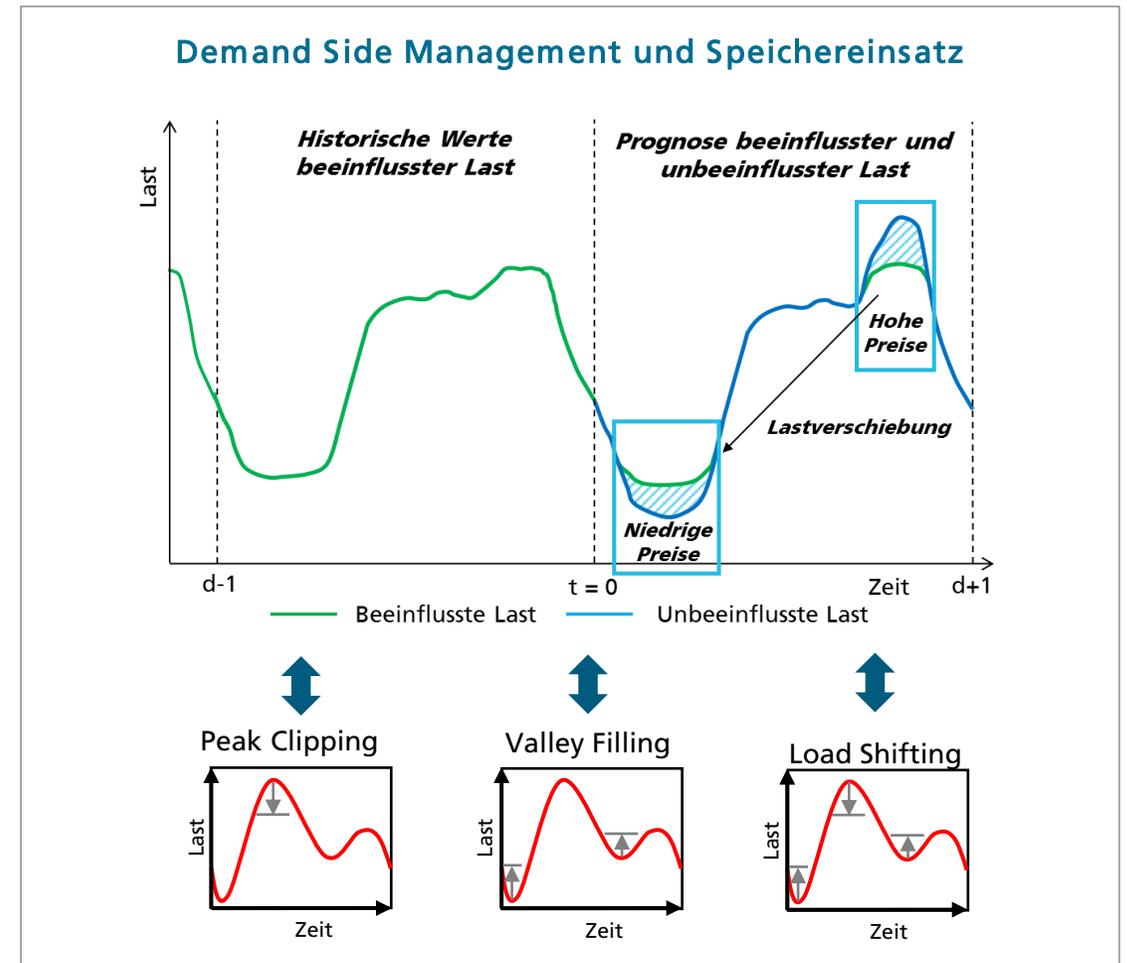
- Auswirkung v. Demand Response, Demand Side Management
- Veränderung und Dynamisierung der Verbrauchsgänge durch Erschließung von Flexibilitäten (Strom-, Wärmespeicher)
- Speichereffekte in Wärmenetzen
- ➔ Erhöhte Unsicherheit bei der Lastprognose (Verschlechterung des Prognosefehlers gegenüber dem unbeeinflussten Verbrauch zwischen ca. 14% bis 40%)*

Ansatz

- Prognosemethode für preisbeeinflusste Verbrauchslastgänge unter Beachtung von Systemrückkopplungen und zeitversetzten Verbrauchsreaktionen (Totzeiten)

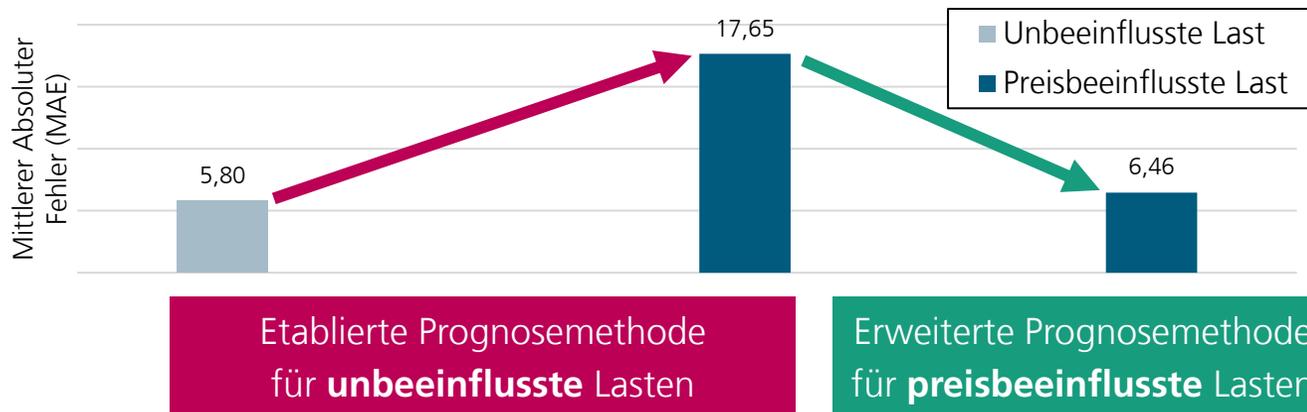
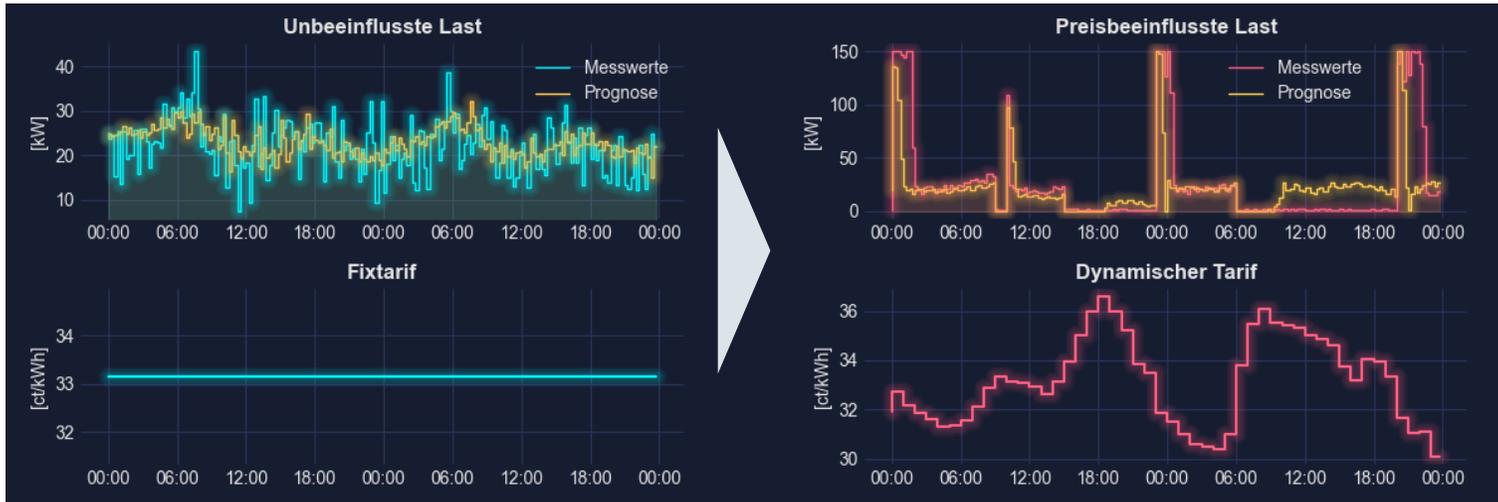
Lösungstand

- **Softwarewerkzeug** mit nachgewiesener Funktionsfähigkeit
- Entwurf, Konzeption und wissenschaftliche Untersuchung der neuen Prognosemethode erfolgreich abgeschlossen
- Entwicklungspfad für beeinflusste Zeitreihen zur Kompensation der erhöhten Unsicherheiten in Vorbereitung



Optimale Betriebsführung des Energieversorgungssystems

Zeitreihenprognose der preisbeeinflussten elektrischen Wärmepumpenlast mittels erweiterter KI-Ansatz



Fehlermaß [kW]	Etablierte KI-Methode	Erweiterte KI-Methode	Verbesserung
MAE	17,65	6,46	↑ 63,4 %
RMSE	28,35	9,73	↑ 65,7 %
ME	-2,04	-0,19	↑ 90,7 %

Optimale Betriebsführung des Energieversorgungssystems

KI-Methodik für die wissensbasierte Prognoseauswahl

Herausforderungen

- Exaktes Prognosemodell basiert auf fundierter Datenanalyse und Modellentwurf
- Expertenwissen und hoher Engineering-Aufwand notwendig

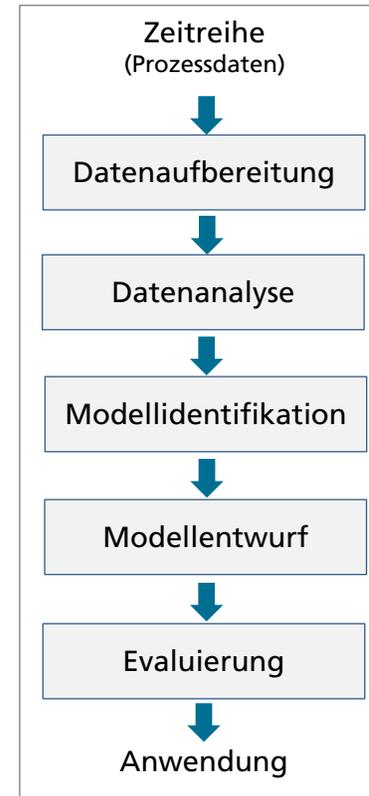
Ansatz

- KI-unterstützte wissensbasierte Modellauswahl
- Wissensbasis enthält nötiges Expertenwissen
- Automatische Auswahl anhand identifizierter Merkmale
- Automatische Qualitätsbewertung
- Automatische Einrichtung des Verarbeitungsworkflows

Lösungstand

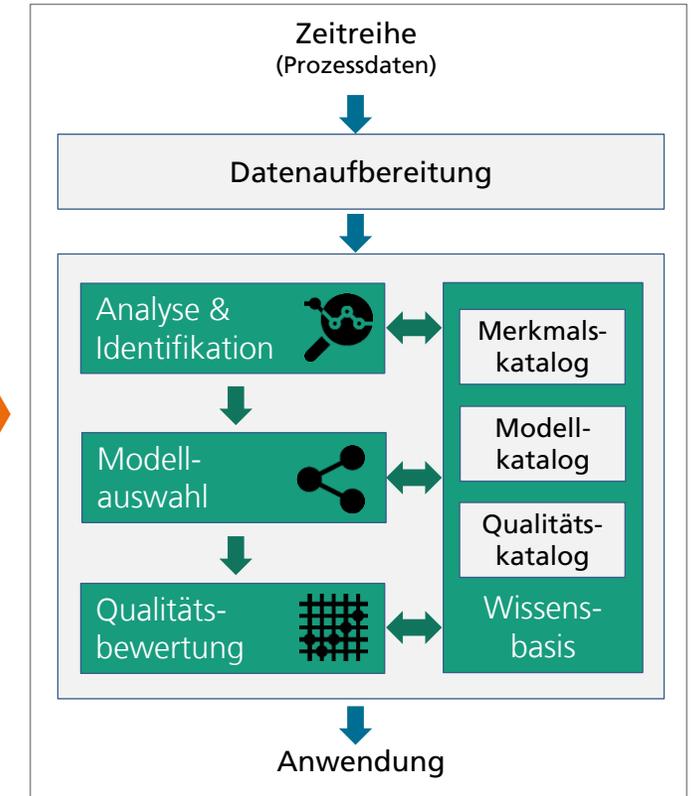
- **Softwarewerkzeug** mit nachgewiesener Funktionsfähigkeit
- Automatische Prognoseauswahl für unbekannte Zeitreihen
- Bisher erreichte Qualität der automatischen Modellauswahl für Lastzeitreihen (Strom, Gas, Wärme) → 85 % der Fälle bestes Modell ermittelt, 10% nicht bestes Modell, 5% nicht möglich

Entwurfsprozess (manuell)



Expertenwissen erforderlich

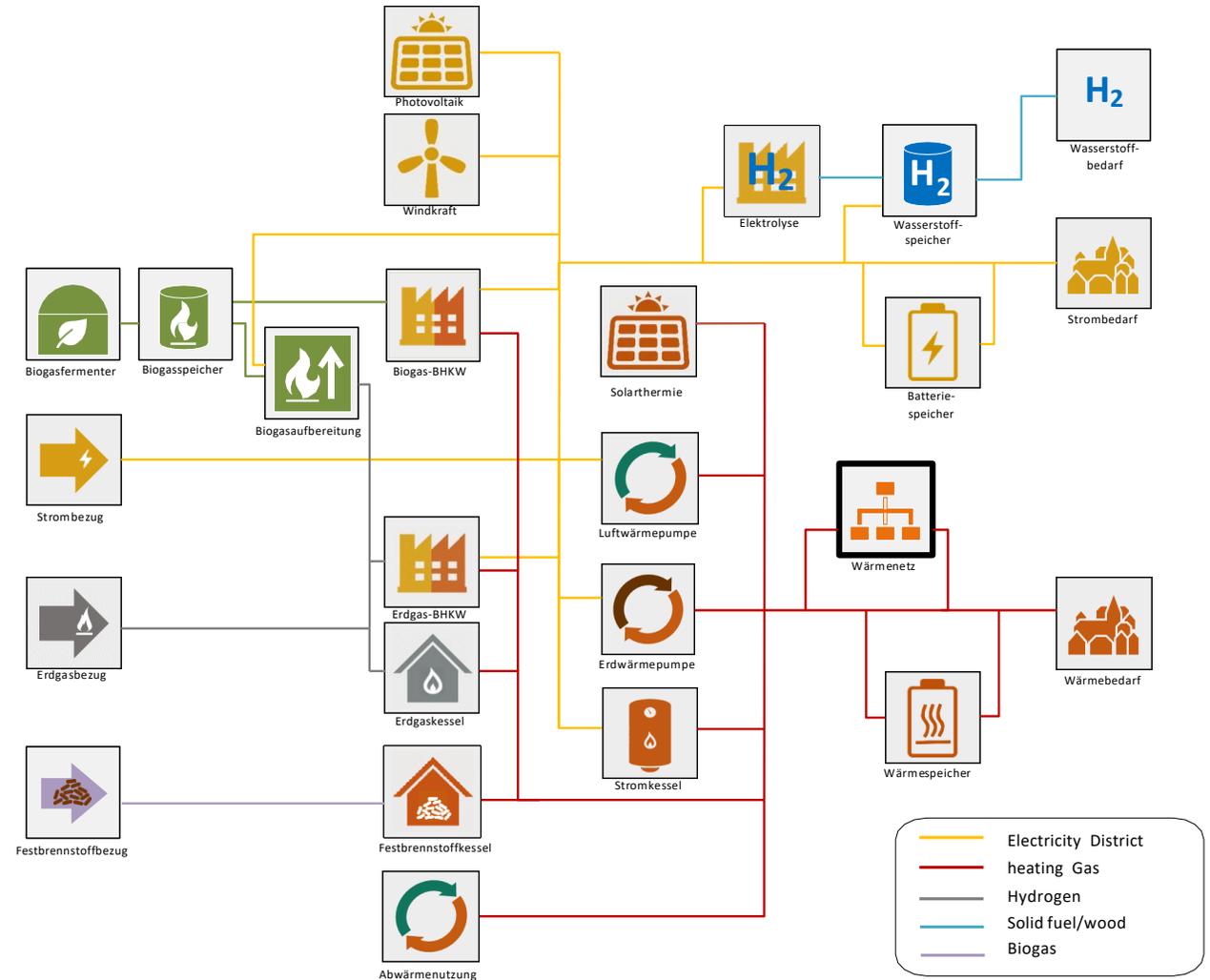
Wissensbasierte Prognoseauswahl (automatisiert)



Optimale Betriebsführung des Energieversorgungssystems

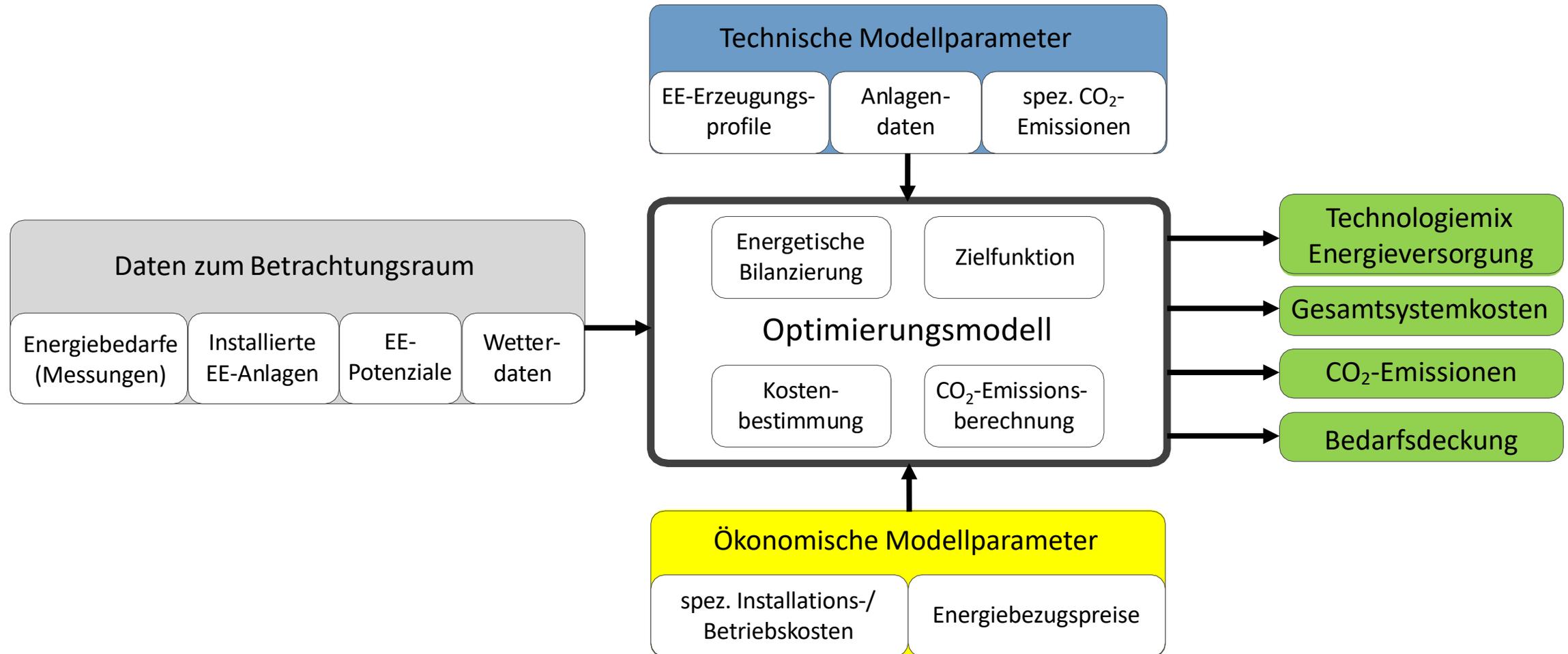
Einsatzplanung mittels prädiktiver Optimierung (1)

- Eingangsgrößen der sektorenübergreifenden Optimierung (Ressourcenplanung)
 - **Prognosen** (Verfügbarkeiten, nicht steuerbare Erzeugung und Verbrauch,...) und **Messwerte**
 - **Kenngößen** und Charakteristik der Anlagen und Verträge
- **Komponentenweise Abbildung** der technischen und wirtschaftlichen Restriktionen von
 - Energiesystemkomponenten
 - Verträgen
 - Märkten
 - durch Gleichungs- und Ungleichungsbedingungen
- **Ergebnis: Optimale Fahrweise der steuerbaren Anlagen und Betriebsmittel**



Optimale Betriebsführung des Energieversorgungssystems

Einsatzplanung mittels prädiktiver Optimierung (2)



Optimale Betriebsführung des Energieversorgungssystems

Einsatzplanung mittels prädiktiver Optimierung (3)

- Sektorenübergreifende Ressourcenplanung
- Eingangsgrößen:
 - Prognosen (Verfügbarkeiten, nicht steuerbare Erzeugung und Verbrauch,...) und Messwerte
 - Kenngrößen und Charakteristik der Anlagen und Verträge
- Komponentenweise Abbildung der technischen und wirtschaftlichen Restriktionen von Energiesystemkomponenten, Verträgen und Märkten durch Gleichungs- und Ungleichungsbedingungen
- Mittels mathematischer Optimierung werden für alle flexiblen Erzeugungsanlagen, Speicher, Verbraucher, aber auch Bezugs- und Lieferverträge optimale Fahrpläne erzeugt

Optimization in general

Minimize $f(x)$ subject to:

$g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m$ (inequality constraint)

$h_j(x) = 0, j = 1, \dots, p$ (equality constraint)

With $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$,

$g_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, \dots, m$

and $h_j: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, j = 1, \dots, p$

Optimale Betriebsführung des Energieversorgungssystems

Einsatzplanung der Anlagen nach dem Merit Order Regelwerk (1)

Einsatzplanung nach Merit Order Regelwerk

Anwendung einer Merit Order zur Planung bedingt feste Einsatzregel für jede flexible Erzeugungs-, Verbrauchs- und Speicherkomponenten

- Festlegung von Wärmegestehungskosten für Wärmepumpen
- Festlegung von Wärmegestehungskosten für ausgespeicherte Wärme
- Festlegung eines Grenzpreises für die Einspeicherung von Wärme

Abhängig vom Strompreis und exogenen Einflussgrößen

Abhängig von den Kosten der eingespeicherten Wärme und dem Speicherwirkungsgrad

Abhängig von den Opportunitätskosten bei der Ausspeicherung

- Komplexe Einsatzregeln bei Beachtung zeitschrittübergreifender Randbedingungen (z.B. Mindestbetriebszeiten...)

Prüfung und Sicherstellung der Randbedingungen müssen gewährleistet werden

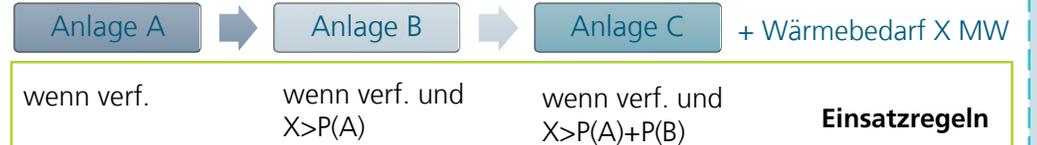
- Abbildung der Wechselwirkung zu Strommärkten in den Einsatzregeln (WP, KWK,...)

Mehrere Merit Orders – Zusammenspiel muss festgelegt werden

- Neue Systemkomponenten können die Einsatzregeln aller anderen flexiblen Assets ändern

Beeinflussen sich evtl. gegenseitig und müssen bei Integration neuer flexibler Assets angepasst werden

Beispiel



Optimale Betriebsführung des Energieversorgungssystems

Einsatzplanung der Anlagen nach dem Merit Order Regelwerk (2)

Einsatzplanung nach Merit Order Regelwerk

Anwendung einer Merit Order zur Planung bedingt feste Einsatzregel für jede flexible Erzeugungs-, Verbrauchs- und Speicherkomponenten

- Festlegung von Wärmegestehungskosten für Wärmepumpen
- Festlegung von Wärmegestehungskosten für ausgespeicherte Wärme
- Festlegung eines Grenzpreises für die Einspeicherung von Wärme

Abhängig vom Strompreis und exogenen Einflussgrößen

Abhängig von den Kosten der eingespeicherten Wärme und dem Speicherwirkungsgrad

Abhängig von den Opportunitätskosten bei der Ausspeicherung

- Komplexe Einsatzregeln bei Beachtung zeitschrittübergreifender Randbedingungen (z.B. Mindestbetriebszeiten...)

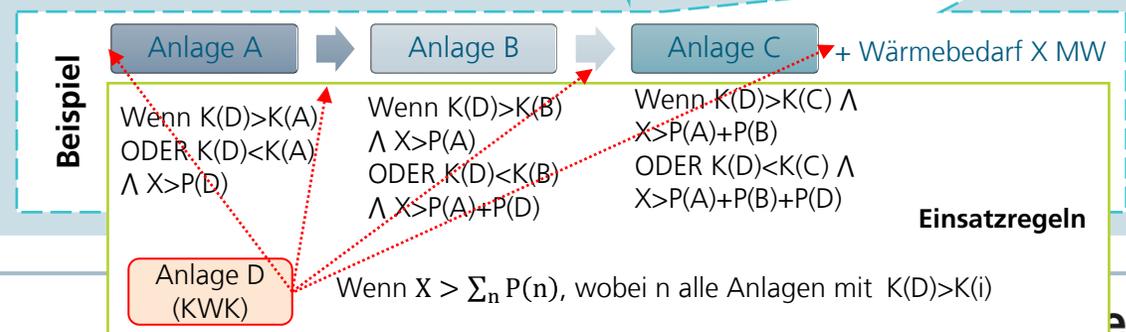
Prüfung und Sicherstellung der Randbedingungen müssen gewährleistet werden

- Abbildung der Wechselwirkung zu Strommärkten in den Einsatzregeln (WP, KWK, ...)

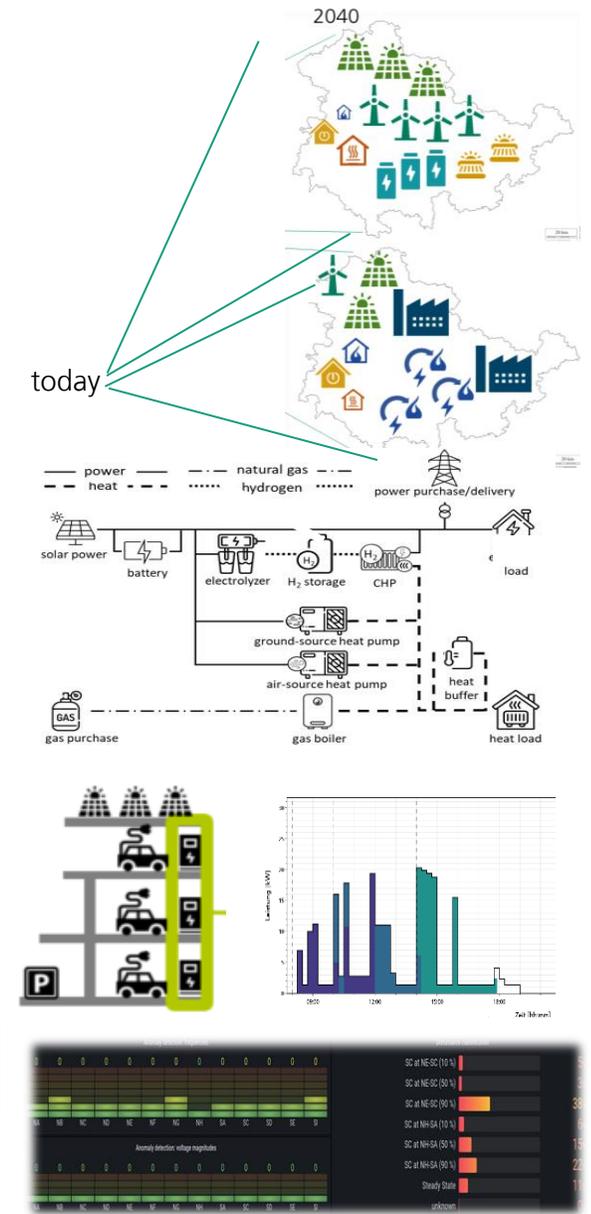
Mehrere Merit Orders – Zusammenspiel muss festgelegt werden

- Neue Systemkomponenten können die Einsatzregeln aller anderen flexiblen Assets ändern

Beeinflussen sich evtl. gegenseitig und müssen bei Integration neuer flexibler Assets angepasst werden



Unsere Unterstützungsangebote





Kontakt:

Fraunhofer IOSB, Institutsteil Angewandte Systemtechnik IOSB-AST

Prof. Dr. Peter Bretschneider
Direktor des Fraunhofer IOSB-AST
Am Vogelherd 90 | 98693 Ilmenau
peter.bretschneider@iosb-ast.fraunhofer.de
www.iosb.fraunhofer.de

