



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Die Landesregierung
Nordrhein-Westfalen



FlexAqua: Ein holistischer Ansatz zur flexiblen Energienutzung in der Wasserwirtschaft

Leon Springorum

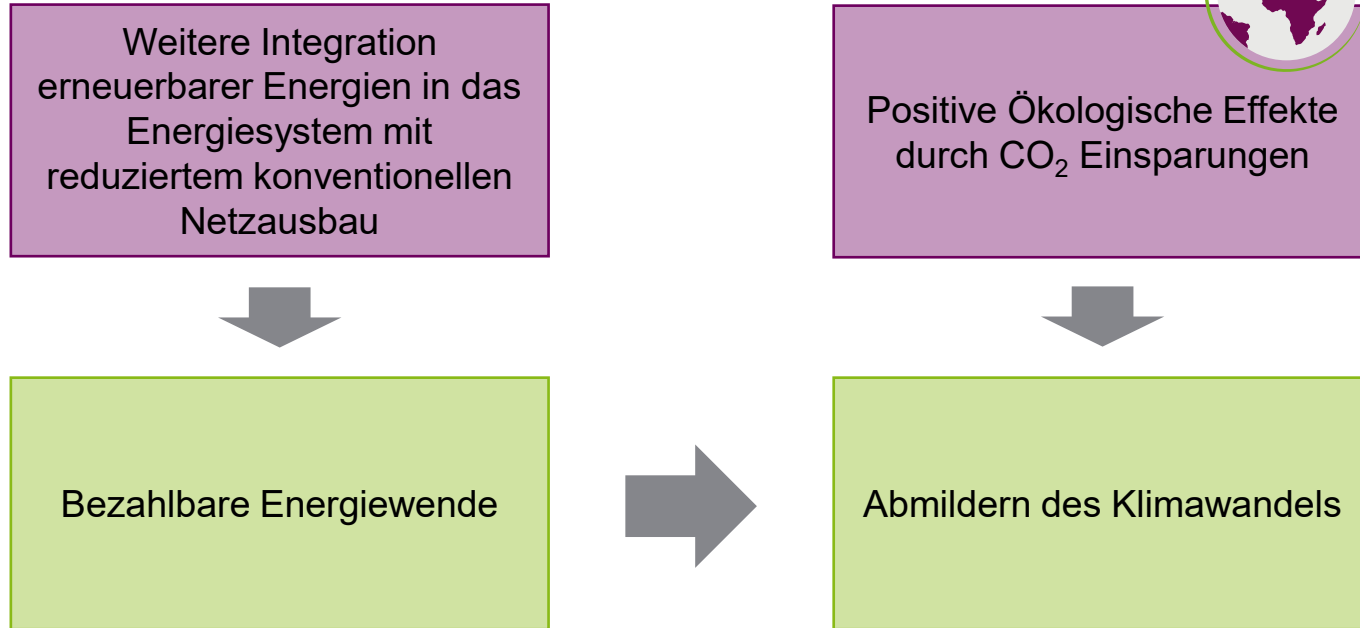
Wuppertal, 12.02.2026



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Einleitung und Motivation

Motivation 1 – Voranbringen der Energiewende



Einleitung und Motivation

Motivation 2 – Gesteigerte Wirtschaftlichkeit

Stabilität elek. Energiesystem
=
Gleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch

Substitution
konventioneller
Kraftwerke durch EE



Steigende Fluktuation
der Erzeugung

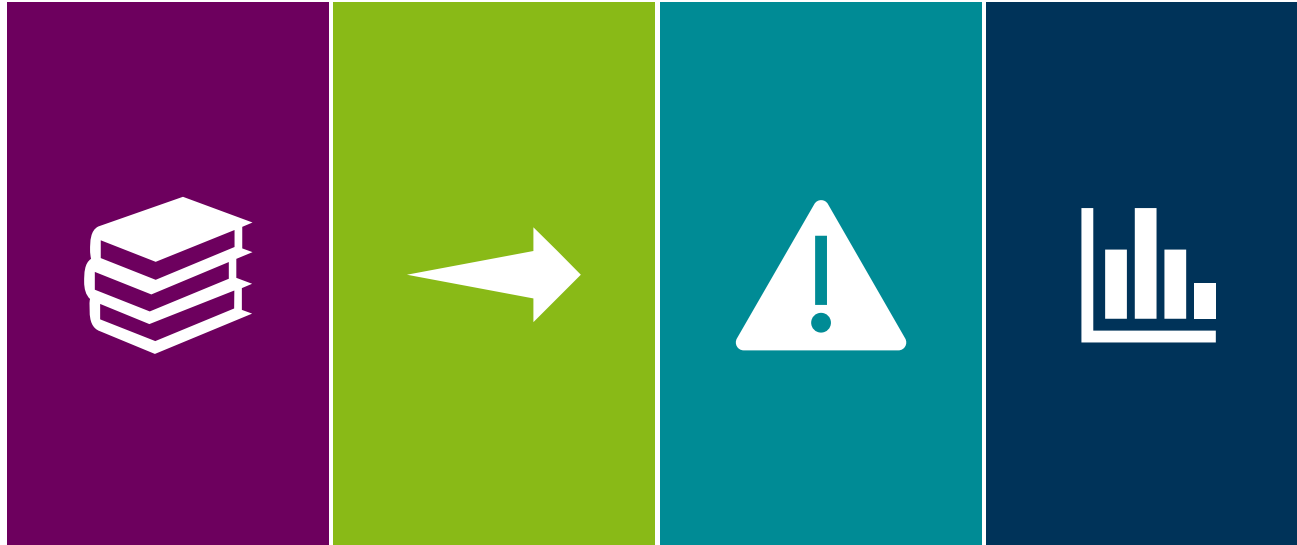
Sinkende Prognose-
genauigkeit der
Erzeugung



Steigender Bedarf an
Flexibilität im System

Steigendes
wirtschaftliches
Potential vermarkteter
Flexibilitätsoptionen

Agenda



Agenda



Agenda



Grundlagen
Energie-
flexibilität



Aufbau und
Vorgehensweise im
Projekt FlexAqua



Agenda



Grundlagen
Energie-
flexibilität



Aufbau und
Vorgehensweise im
Projekt FlexAqua



Identifizierte
Herausforderungen



Agenda



Grundlagen
Energie-
flexibilität



Aufbau und
Vorgehensweise im
Projekt FlexAqua



Identifizierte
Herausforderungen



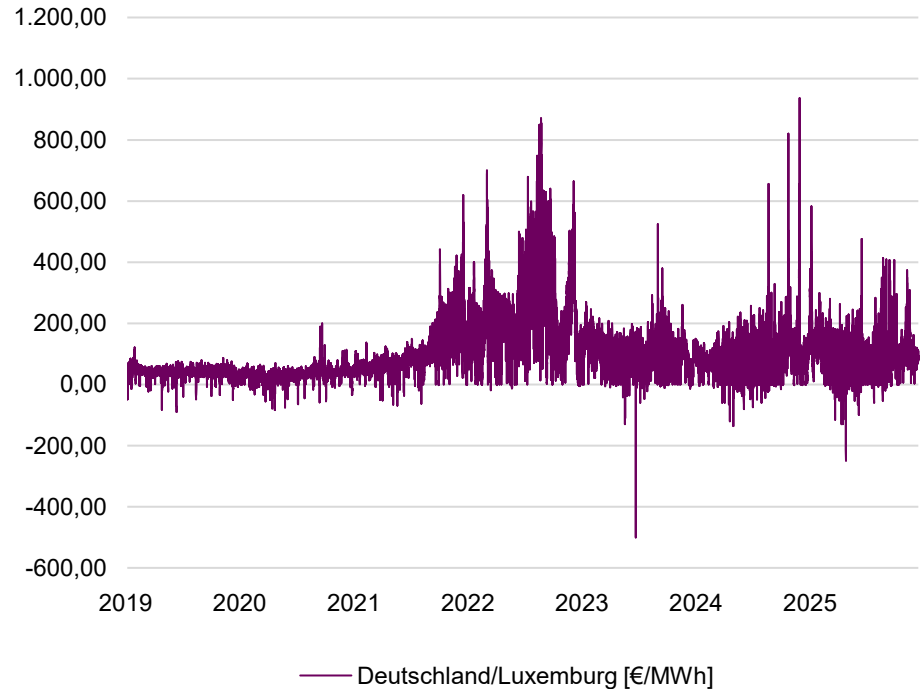
Erste
Analyseergebnisse

Grundlagen Energieflexibilität

Reaktion auf ein externes Signal (Preissignal oder Aktivierung)



Jahr	Mittlerer stündlicher Spread (€/MWh)	Mittlerer innertäglicher Spread (€/MWh)
2019	3,37	30,08
2020	3,59	32,47
2021	9,12	80,31
2022	21,91	186,99
2023	10,91	97,88
2024	11,90	111,20
2025	13,24	124,13

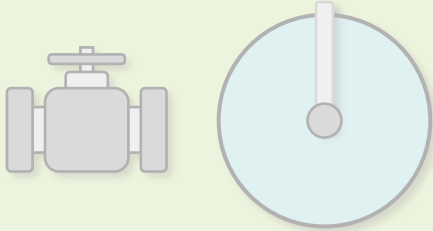


Grundlagen Energieflexibilität

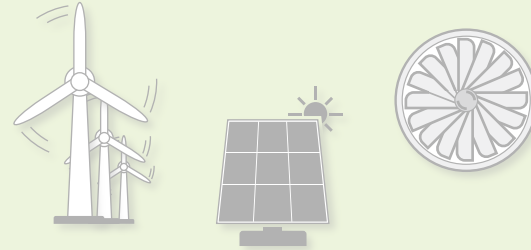
Flexibilitätsbausteine auf Kläranlagen



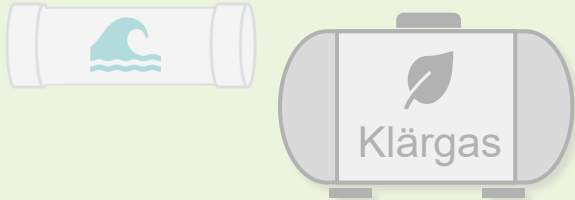
Verbrauchsanlagen



Erzeugungsanlagen



Speicher



Energieträger

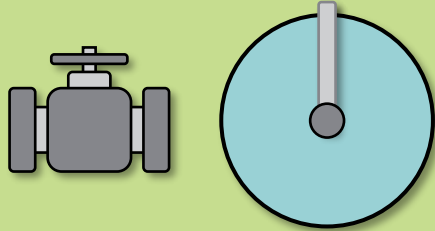


Grundlagen Energieflexibilität

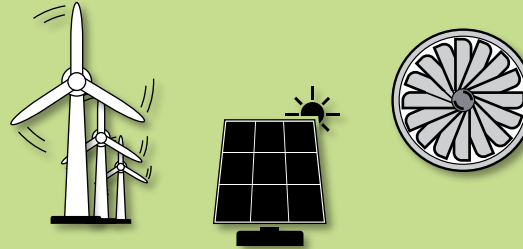
Flexibilitätsbausteine auf Kläranlagen



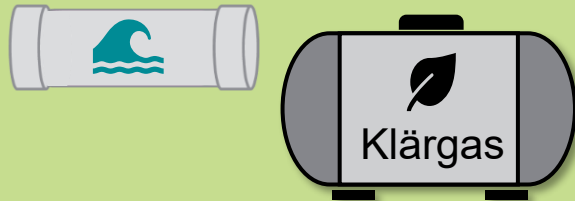
Verbrauchsanlagen



Erzeugungsanlagen



Speicher

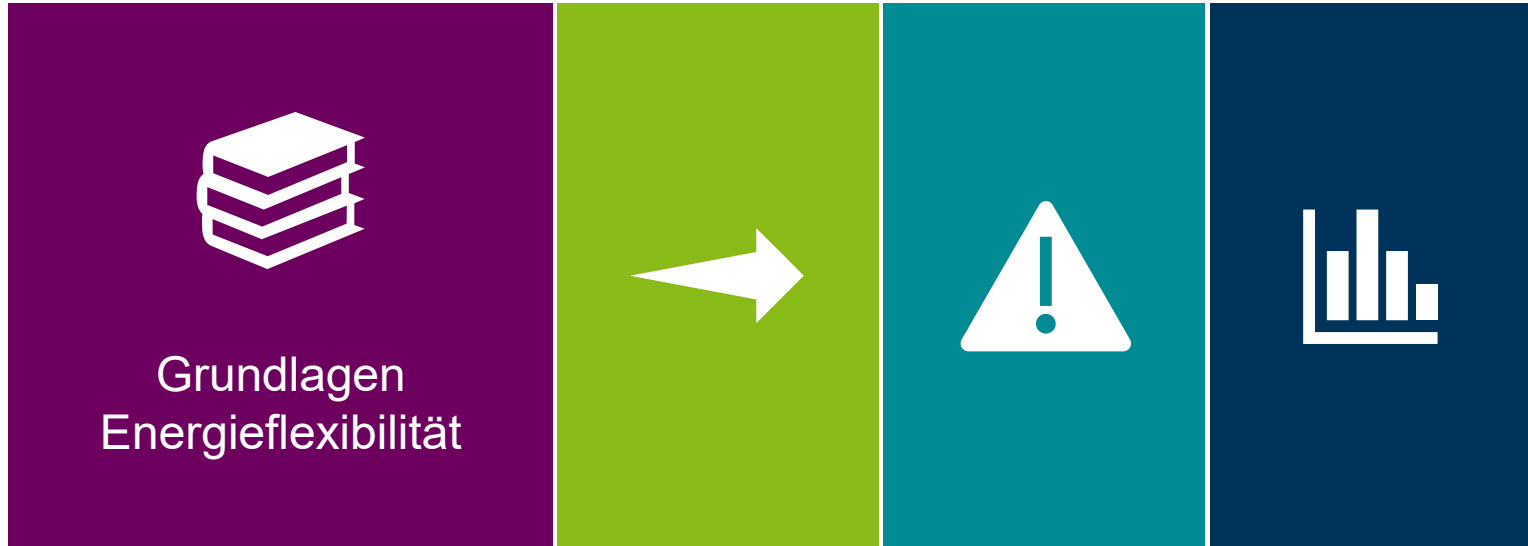


Energieträger



- Wasserwirtschaft geprägt durch vielfache verschiebbare Prozesse
- Anlage ist durch verschiedene Zuflussbedingungen schwankende Betriebszustände gewohnt

Agenda



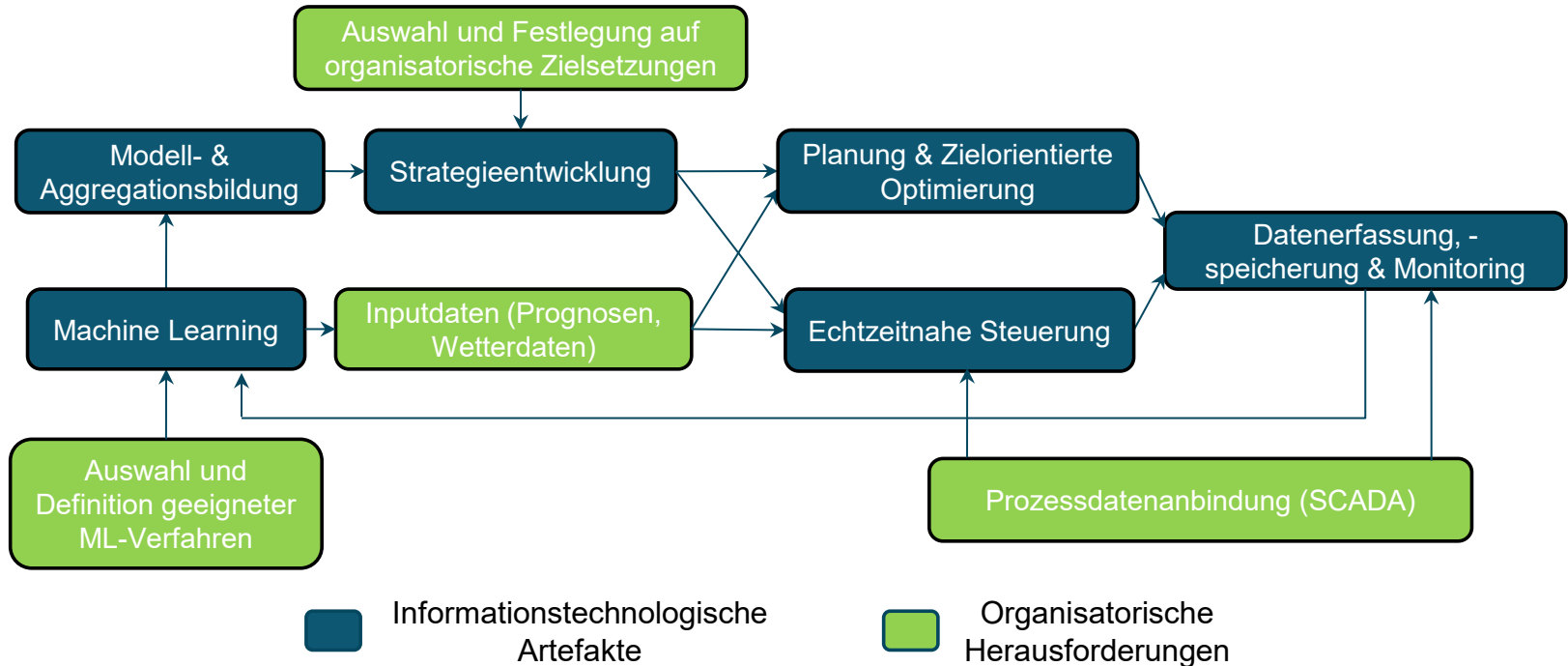
Agenda



Aufbau und
Vorgehensweise im
Projekt FlexAqua



AUFBAU UND VORGEHENSWEISE IM PROJEKT FLEXAQUA: GESAMTARCHITEKTUR

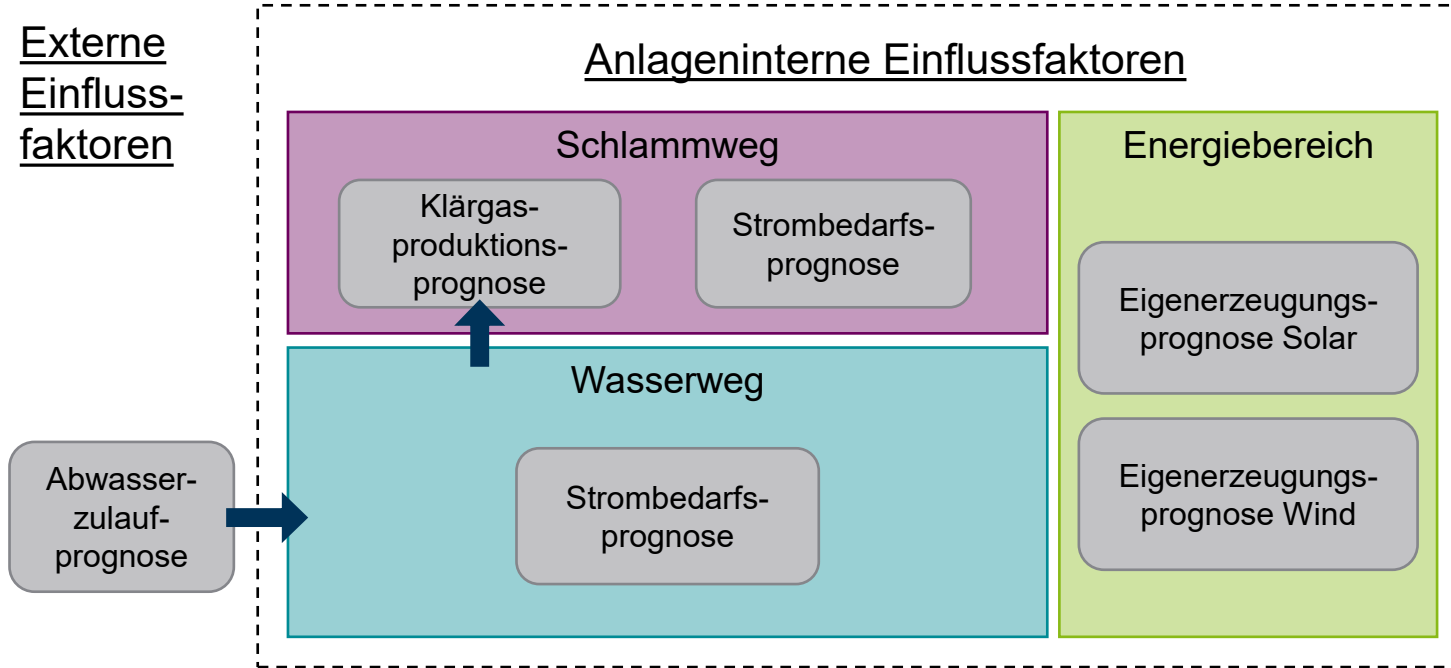


Aufbau und Vorgehensweise im Projekt FlexAqua

Prognosen und Machine-Learning



Externe Einflussfaktoren



Optimierungszielprognosen

Strompreisprognose

- Day-Ahead
- Intra-Day
- Regelleistung

Emissionsprognose

- AEF
- MEF

FlexAqua: Ein holistischer Ansatz zur flexiblen Energienutzung in der Wasserwirtschaft

Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik | Leon Springorum | S. 15

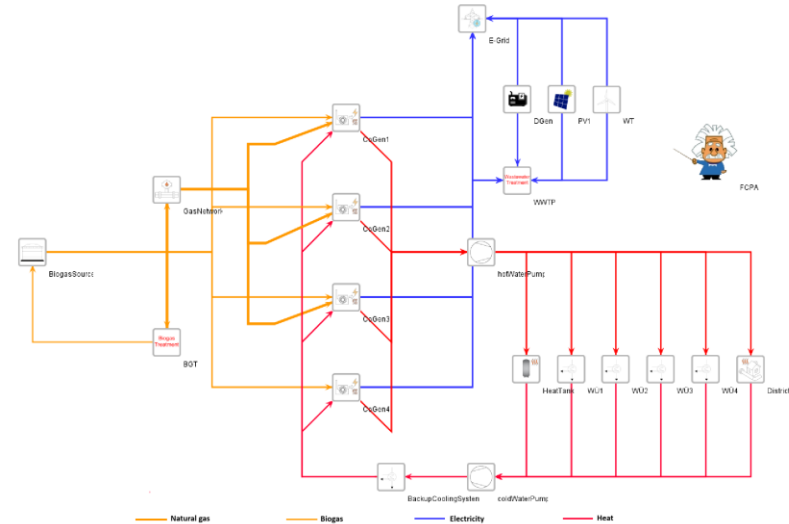
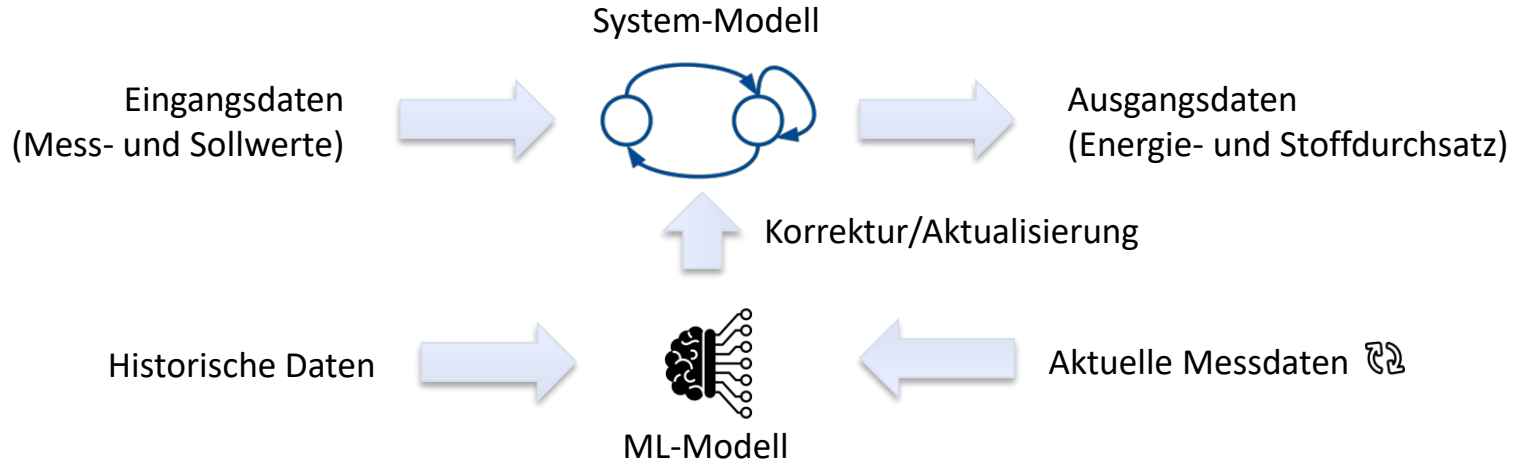
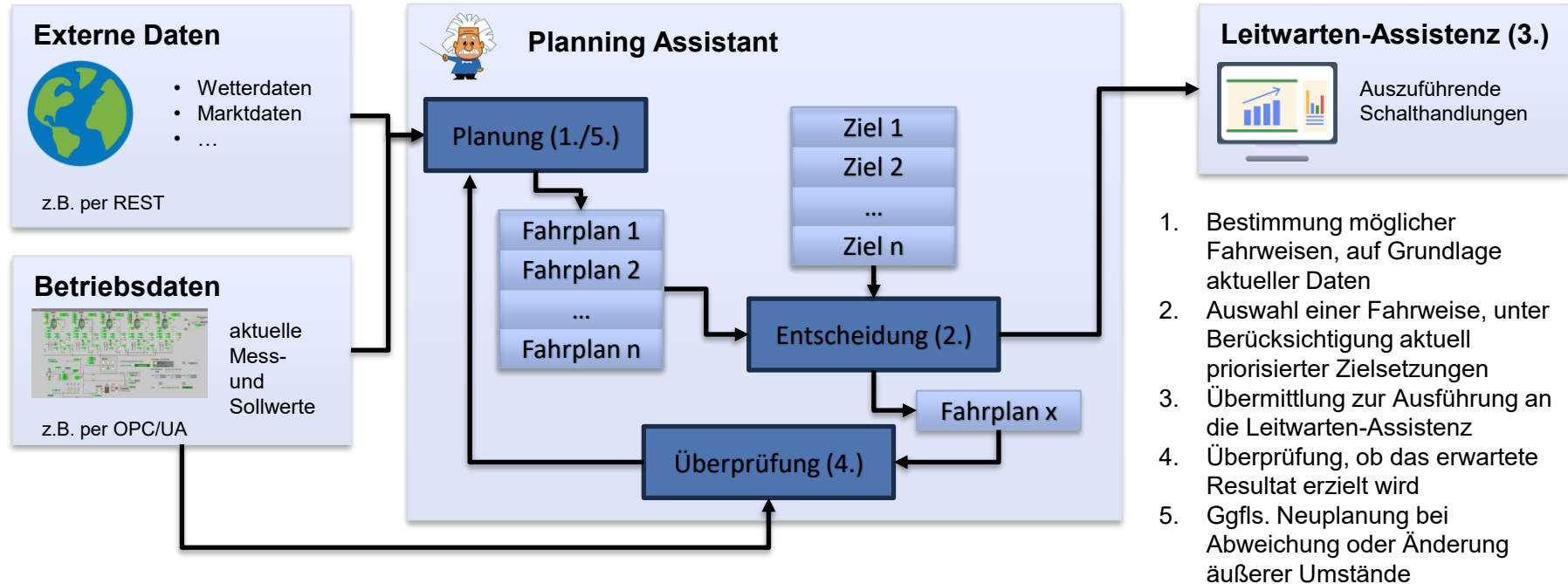


Abbildung der gesamten Anlage

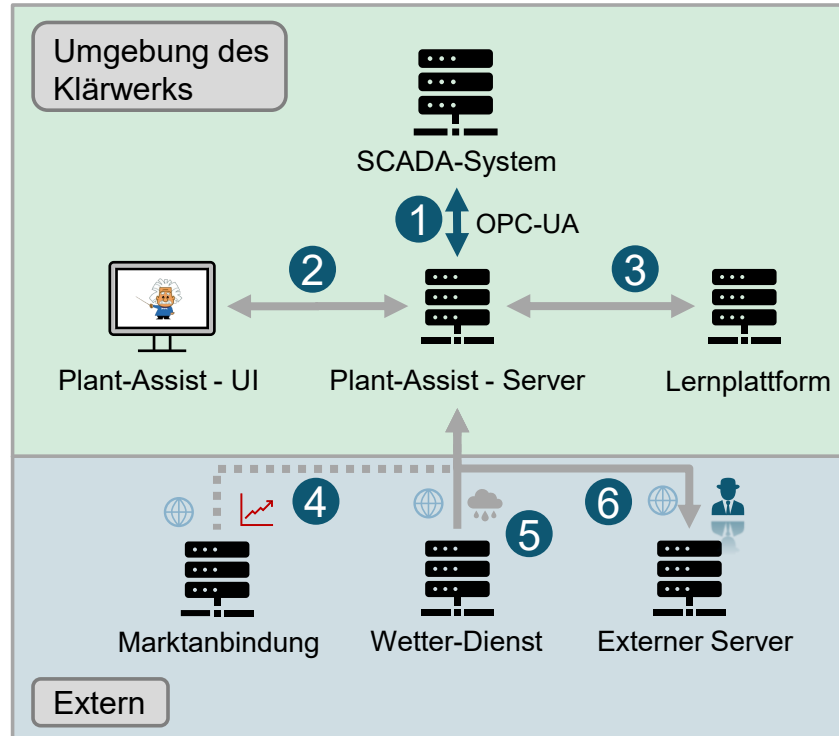
- Detaillierte Modelle der Einzelanlagen, wo operativ nutzbare Flexibilität vorhanden ist
- Vereinfachende Blackbox-Modelle, wo dies nicht der Fall ist
- Zusammenfassung zu Gesamtmodell als Grundlage für das Assistenzsystem



- **Theoretische Modelle sind nicht perfekt und können veralten**
- **Fortlaufendes Training eines ML-Modells mit Messdaten des realen Systems**
- **Dadurch Korrektur/Aktualisierung des Systemmodells im laufenden Betrieb**



AUFBAU UND VORGEHENSWEISE IM PROJEKT FLEXAQUA: DATENINFRASTRUKTUR



- 1** Austausch von definierten Signalen (ca. 900)
- 2** Anzeige der Fahrpläne und Rückmeldungen zur Umsetzung
- 3** Speichern der Anlagendaten und Rückgabe neu trainierter Modelle
- 4** Import von Strompreisen
- 5** Import von Wetterdaten
- 6** Softwareupdates mit Funktionsupdates

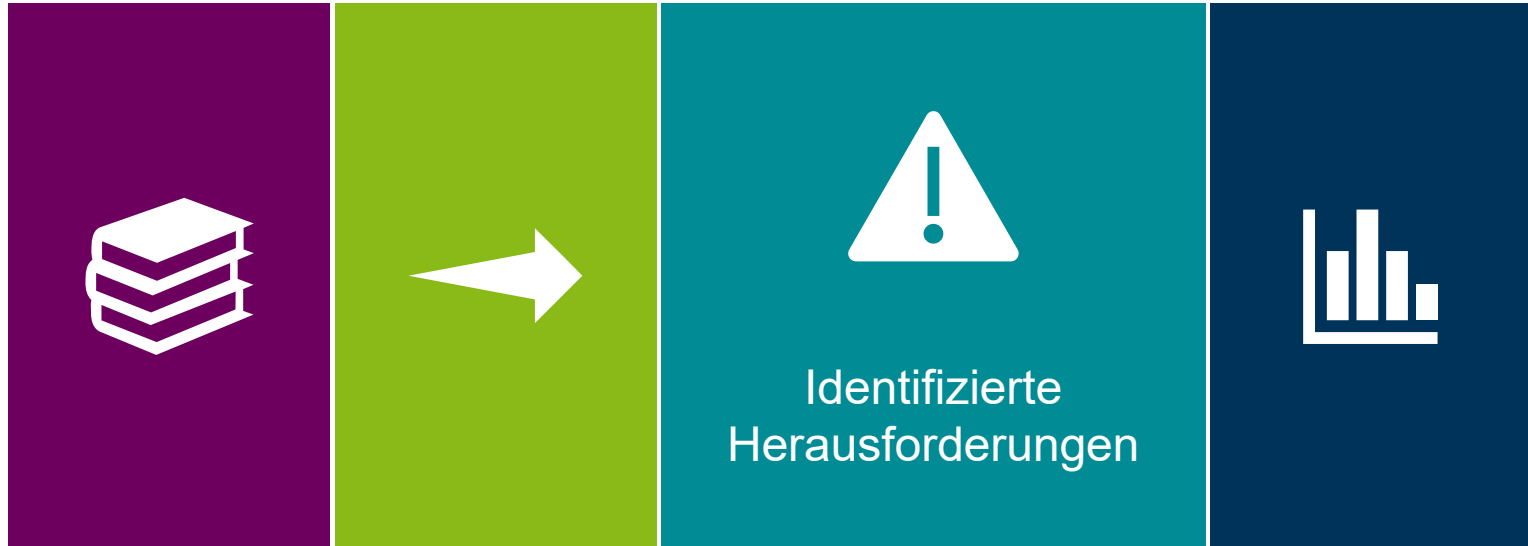
Agenda



Aufbau und
Vorgehensweise im
Projekt FlexAqua



Agenda



Identifizierte Herausforderungen

Technische, betriebliche und energiewirtschaftliche Herausforderungen



Technische Herausforderungen

- Prozesstechnische Sicherheit als oberstes Ziel
- Modellgenauigkeit
- Erhöhte Beanspruchung der Betriebsmittel durch häufigeres Schalten
- Ablauf von Prognose bis zur Steuerung muss auf Kurzfristigkeit ausgelegt sein, um auf Signale zu reagieren

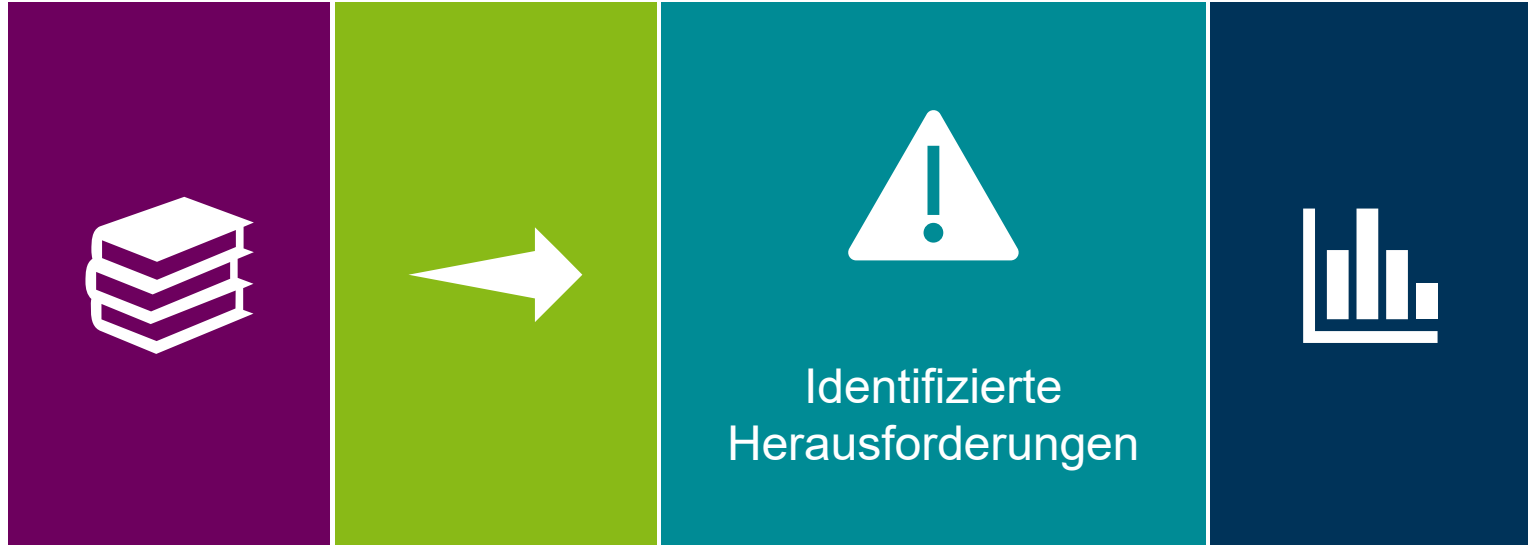
Betriebliche Herausforderungen

- Anbindung an die Prozessleitsysteme zu KRITIS-Anforderungen
- Frage nach Zuständigkeiten und Freigabeprozessen
- Innerbetriebliche Akzeptanz
- Qualifikation und Schulung der Anwender

Energiewirtschaftliche Herausforderungen

- Wert für Flexibilität entsteht durch hohe Volatilität, Prognoseergebnisse können sich hingegen verschlechtern
- Regulatorische Hürden und Unsicherheiten
- Falsche Preissignale für netzdienliches Verhalten

Agenda



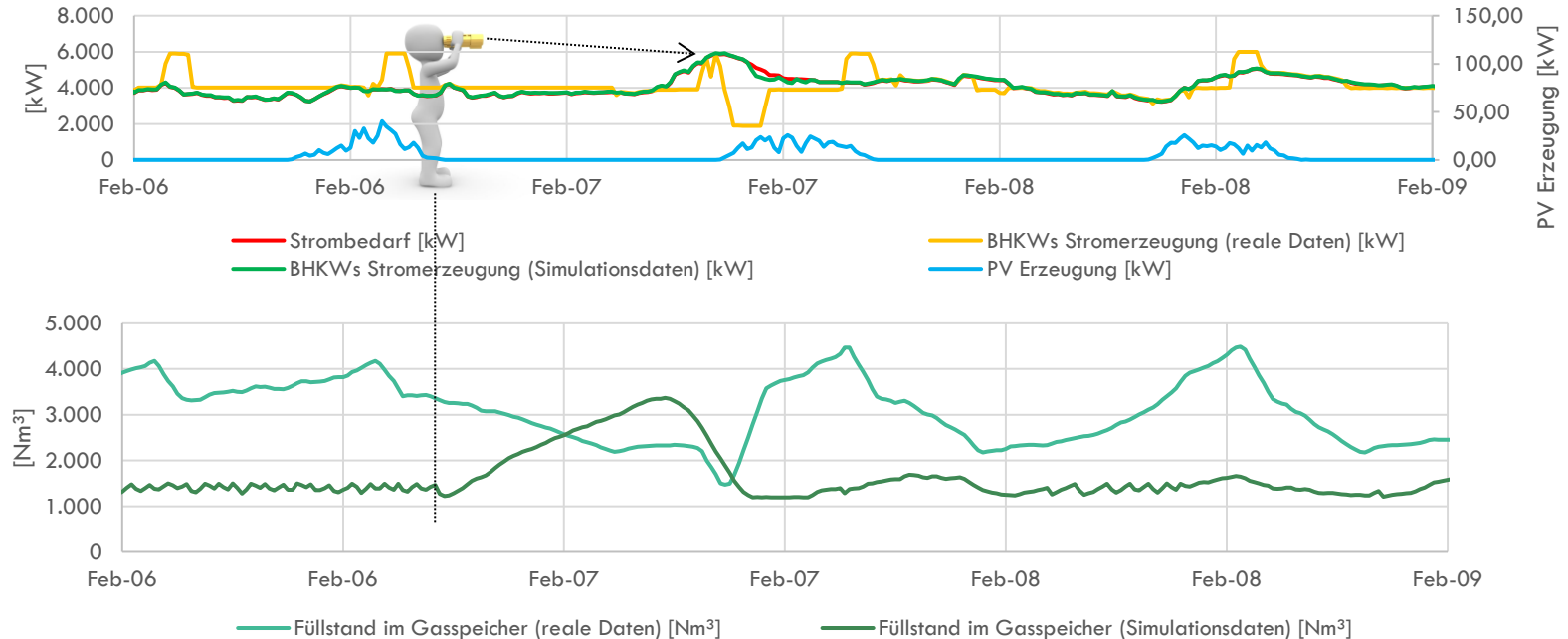
Agenda



PROGNOSEBASIERTE SIMULATION – 2024 IM RÜCKBLICK

SIMULATIONSERGEBNISSE : AKTUELLER STROMTARIF → REDUKTION DES STROMFREMDBEZUGS

KW6 Aktueller Stromtarif



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!





BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Grundlagen Energieflexibilität

Bedeutung des Flexibilitätsbandes für eine Kläranlage



Technisches Potenzial



- Aggregatsleistung
- Mögliche Regelbarkeit
- Minimale und maximale Abrufdauer
- Leistungsänderungsgradienten

·
·
·

Wirtschaftliches Potenzial



- Operative Kosten
- Erlösmöglichkeiten am Regelleistungsmarkt
- Strompreis am Spotmarkt

·
·
·

Praktisches Potenzial

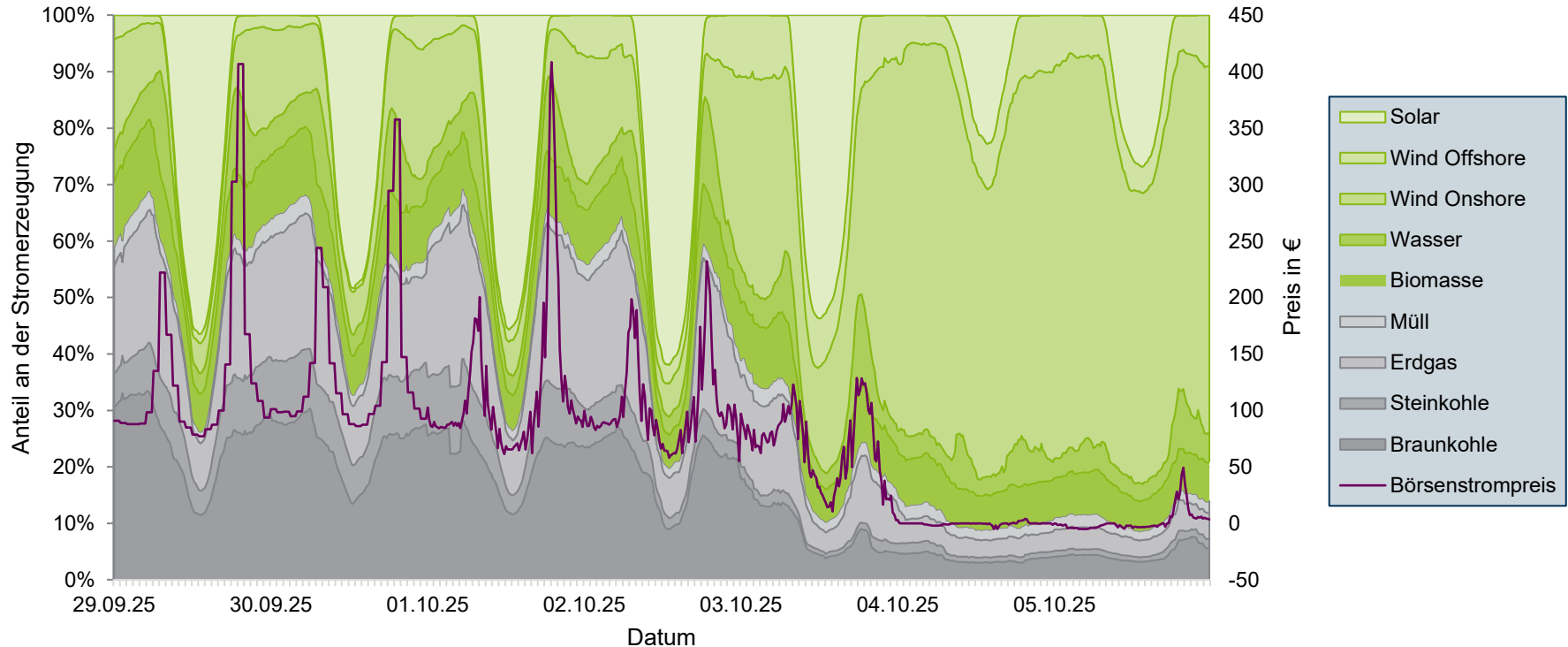


- Abwasserzufluss
- Qualität der Abwasserreinigung
- Verfügbarkeit von Hilfsstoffen

·
·
·

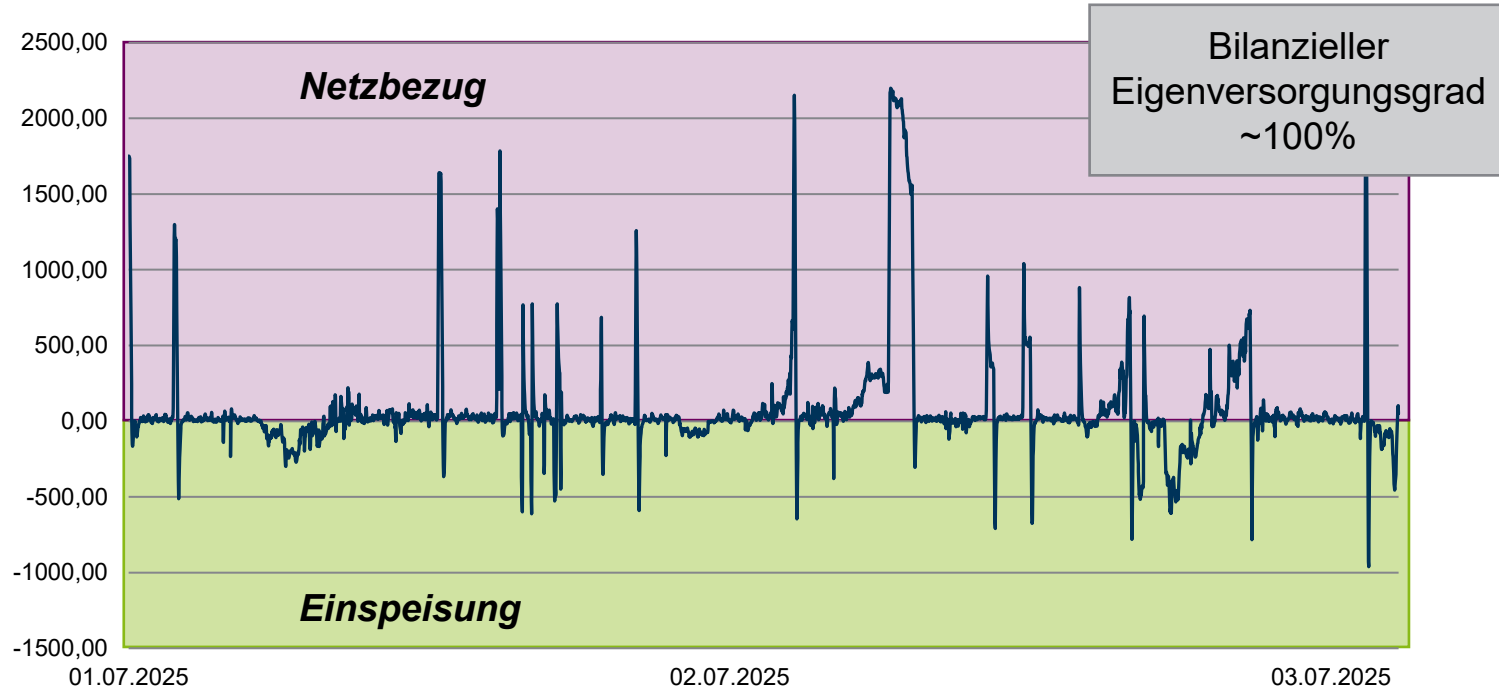
Grundlagen Energieflexibilität

Reaktion auf ein externes Signal (Preissignal oder Aktivierung)



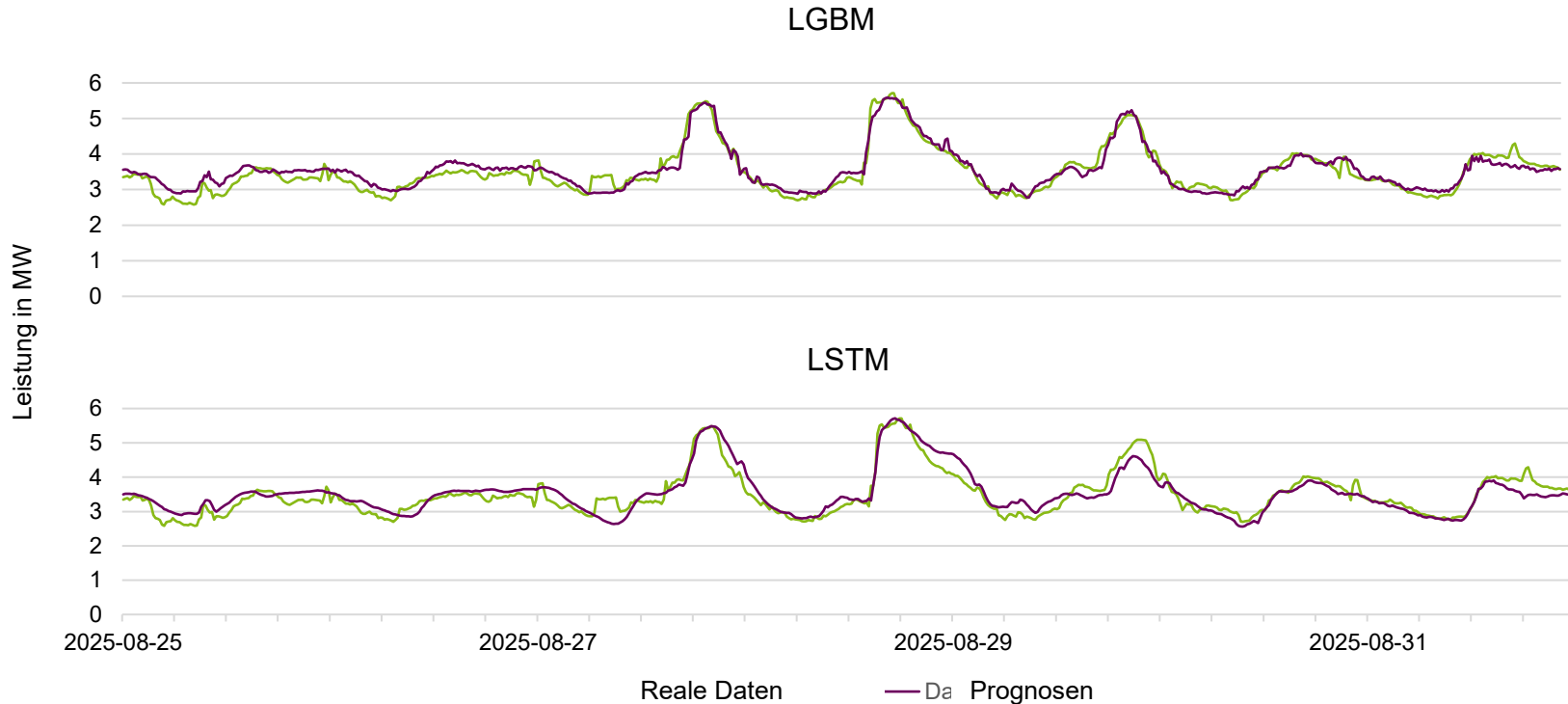
Grundlagen Energieflexibilität

Saisonale und tägliche Schwankungen aufgrund Klärgasproduktion und Wetterlage



Erste Analyseergebnisse

Strombezugsprognose



FlexAqua: Ein holistischer Ansatz zur flexiblen Energienutzung in der Wasserwirtschaft

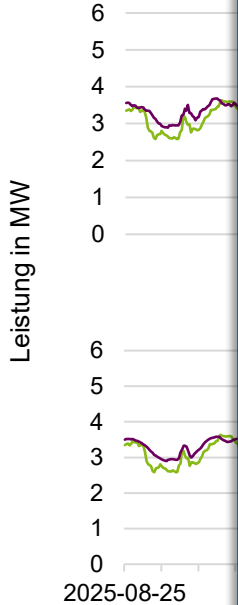
Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik | Leon Springorum | S. 31



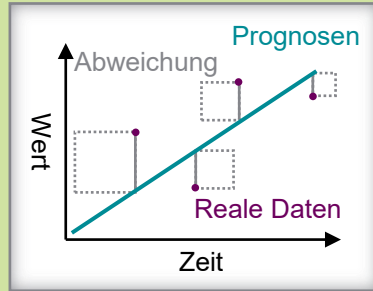
BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Erste Analyseergebnisse

Strombezugsprognose



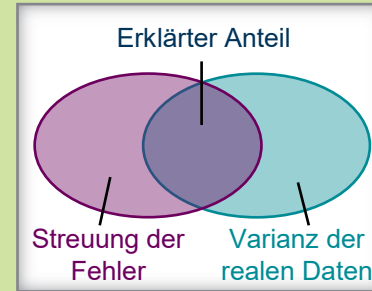
RMSE



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

⇒ Bestraft große
Prognosefehler stärker

NSE



$$NSE = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

⇒ Bewertet, wie effizient das
Modell die reale Streuung
erklärt

E	NSE
	0,83
	0,82