

Statuskonferenz Bioenergie 2025

Kurzzeitprognosen zur Optimierung von Kläranlagen mit katalytischer Methanisierung

Constantin Heim

Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Gefördert durch:



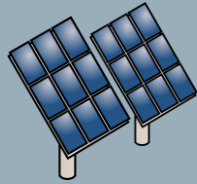
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

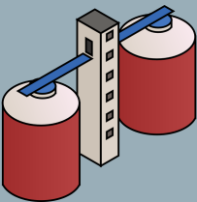


Motivation

- Kläranlagen verbrauchen ca. 1 % der gesamten Energieerzeugung in Europa [1]
 - Kommunale Abwasserrichtlinie (KARL) der EU sieht Energieneutralität bis 2045 vor
- Nur möglich durch ...



Ausbau erneuerbarer Energien auf den Kläranlagen
→ Energiespeicher sind dafür notwendig



Effizientere Nutzung biogener Reststoffe (Klärgas,
ca. 60 % CH₄, 40 % CO₂)



Senkung des Energieverbrauchs durch
Optimierungsmaßnahmen



Projekt Klaeffizienter

Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

- „Optimierung der katalytischen Direktmethanisierung auf Kläranlagen zur Energiespeicherung und Erhöhung der Anlageneffizienz“
- Laufzeit: 01.10.2024 – 30.09.2027

- Projektpartner



- Assoziierte Partner



Katalytische Direktmethanisierung

Motivation

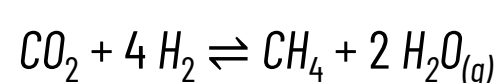
Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

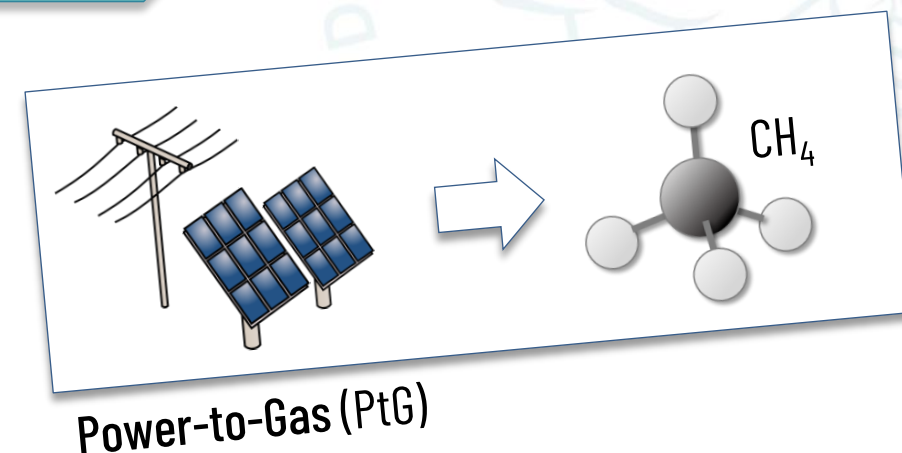
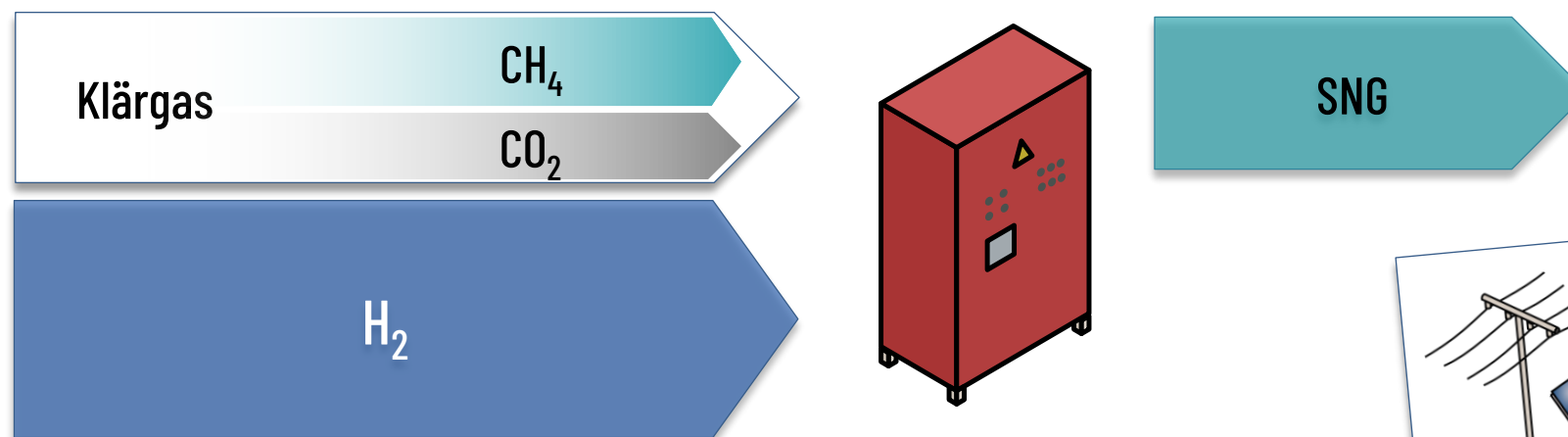
Ausblick

- CO₂-Methanisierung (Sabatier-Reaktion)

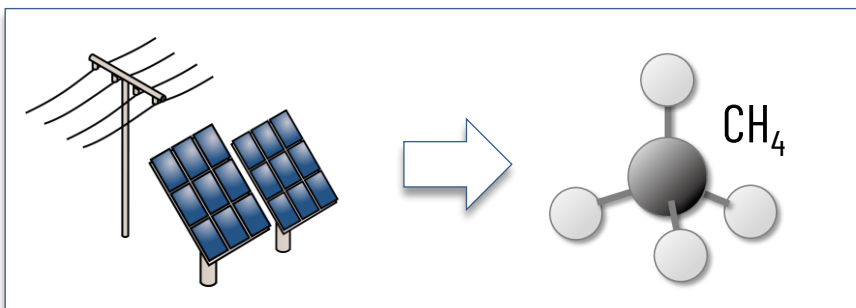


$$\Delta H_R = -165 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

- Katalytisch → Verwendung eines Nickel-Katalysators
- Direktmethanisierung → Klärgas wird verwendet, ohne CO₂ vorher abzutrennen



Power-to-Gas (PtG)



- Speicherung von erneuerbarem Strom durch Methan (chemischer Energieträger)
- Warum **Methan**?
 - **Höhere volumetrische Speicherdichte** als Wasserstoff
 - **Nicht giftig** (im Gegensatz zu Ammoniak/Methanol)
 - **Infrastruktur** ist bereits vorhanden → Erdgasnetz
 - Viele **industrielle Prozesse** sind auf die Nutzung von Erdgas ausgelegt
 - Gaskraftwerke werden benötigt, um Strom während **Dunkelflauten** zu erzeugen
→ Methan spielt eine essentielle Rolle im Umstieg auf erneuerbare Energien

Methanisierung auf Kläranlagen

Motivation

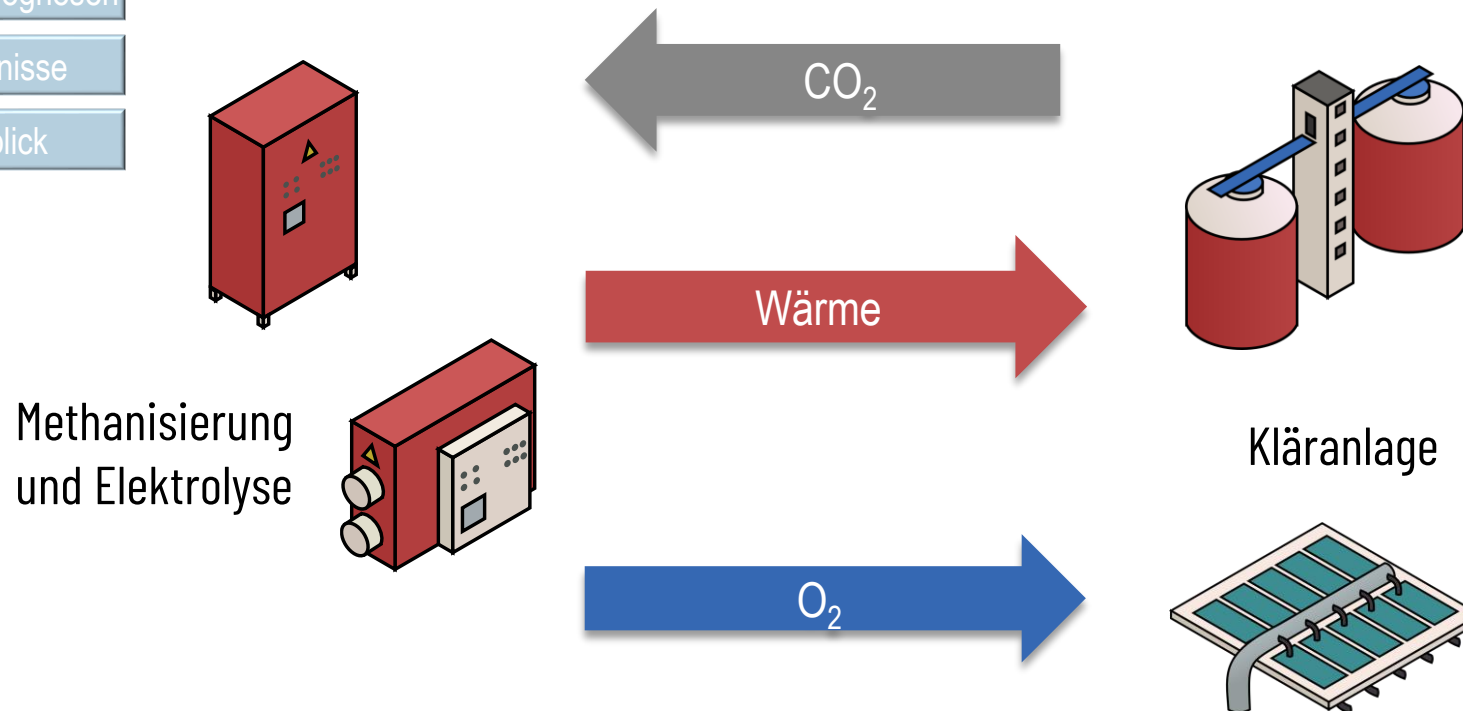
Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

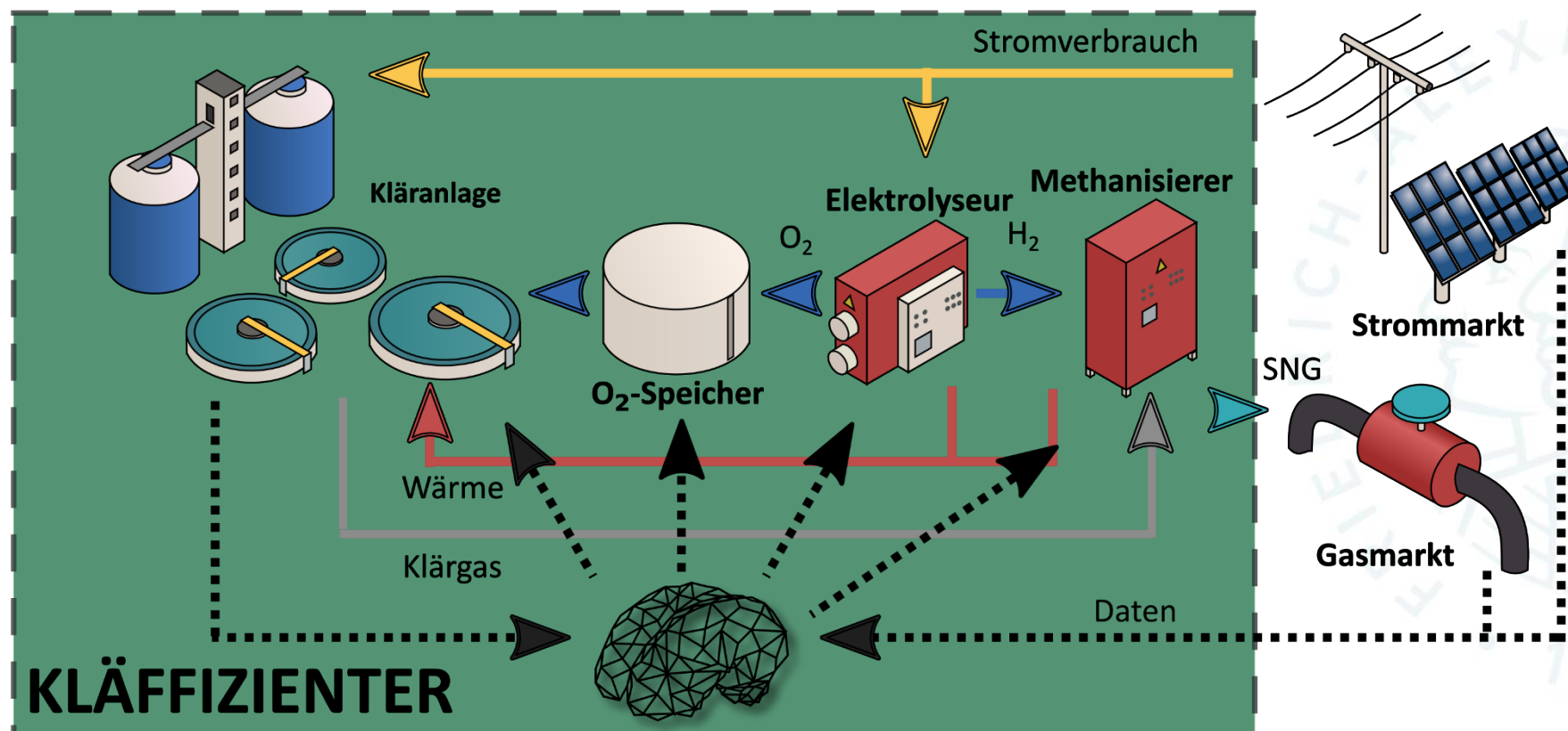
- Methanisierung auf Kläranlagen hat folgende Synergieeffekte:



- Klärgas (ca. 60 % CH₄, 40 % CO₂) wird als Kohlenstoffquelle genutzt
- Abwärme (Elektrolyse/Methanisierung) kann zur Beheizung der Faultürme genutzt werden
- O₂ der Elektrolyse kann Luft im Belebungsbecken ersetzen
- Bzw. zukünftig in einer 4. Reinigungsstufe (Spurenstoffentfernung) zur Ozonherstellung genutzt werden

Methanisierung auf Kläranlagen

- Methanisierung ist abhängig von der Kläranlage, dem Strommarkt (hohe Fluktuation) und Gasmarkt
→ Intelligente Regelung ist für einen optimalen und wirtschaftlichen Betrieb essentiell



Intelligentes Regelungskonzept

Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

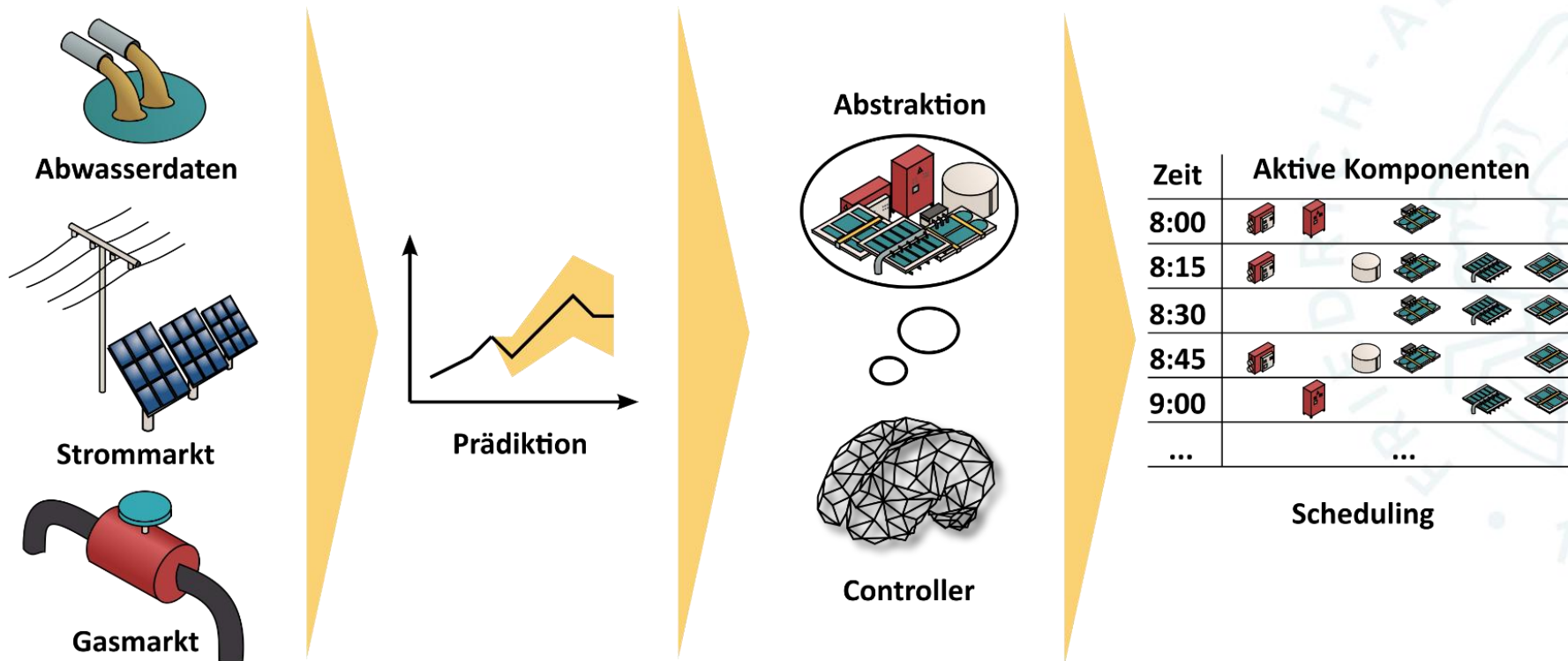
Ausblick

• Der Controller

... nutzt Vorhersagen bezüglich der erwarteten Abwasserdaten und Energiepreise

... optimiert ein abstrahiertes Simulationsmodell der Kläranlage

... erstellt eine Einsatzplanung für die Systemkomponenten



Verfügbarkeit und Notwendigkeit von Kurzzeitprognosen

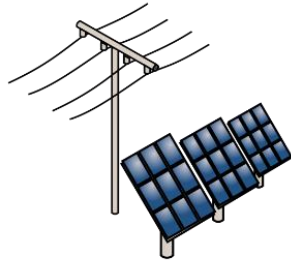
Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

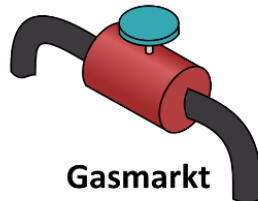
Ergebnisse

Ausblick



Strommarkt

- Starke Preisschwankungen im Tagesverlauf möglich
→ Je nach Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien
- Durch den Day-Ahead-Markt stehen Daten bis zu 36 Stunden in der Zukunft zur Verfügung



Gasmarkt

- Große Preisschwankungen vor allem im längeren Zeithorizont oder als Reaktion auf aktuelle Ereignisse
- Kurzzeitprognosen bieten hier nur geringen Mehrwert



Abwasserdaten

- Schwankungen im Tagesverlauf haben Einfluss auf den Klärprozess
- Vorhersagen sind nicht verfügbar
→ Kurzzeitprognosen müssen für den Controller erstellt werden

Kurzzeitprognosen von Abwasserdaten

Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

Volumenstrom

Temperatur

pH-Wert

Leitfähigkeit

Trübung

Phosphat-Konz.



Abwasserdaten

Gesamt-Stickstoff-Konz.

NH₄-Stickstoff-Konz.

Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)

Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB₅)

- Abwasserdaten hängen von vielen Parametern ab, u.a.

- Tageszeit, Wochentag
- Niederschlagsmengen
- Verbrauchsverhalten von Privatpersonen
- Rückhaltezeiten des Kanalnetzes
- Industrieller Abwasseranteil
- ...

- Simulation des Abwassernetzes zur Vorhersage ist aufwändig und aufgrund fehlender Daten schwer umsetzbar



Lösung: Muster in gemessenen Kläranlagen-Daten erkennen und für Kurzzeitprognosen nutzen

Datenverfügbarkeit und Prognoseerstellung

- Daten der Kläranlagen
 - Nürnberg (Klärwerk 1)
 - Pfaffenhofen a.d. Ilm
 - Weißenburg
- In jeweils 15-Minütiger Auflösung für mindestens 1 Jahr

Weißenburg



Pfaffenhofen
a.d. Ilm

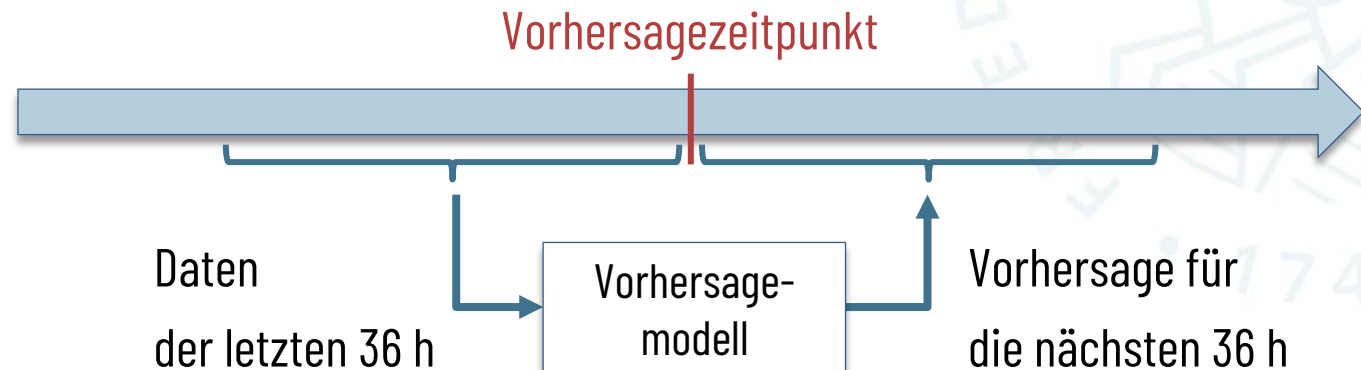


Nürnberg (Klärwerk 1)



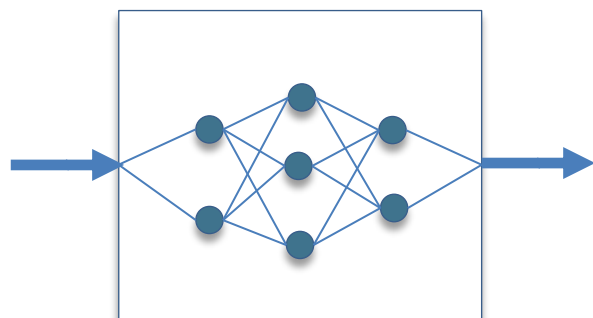
Bilder: Apple Maps

- Für jede Kläranlage wird ein Vorhersagemodell erstellt
- Modelle erstellen
Vorhersagen für bis zu 36 Stunden in die Zukunft



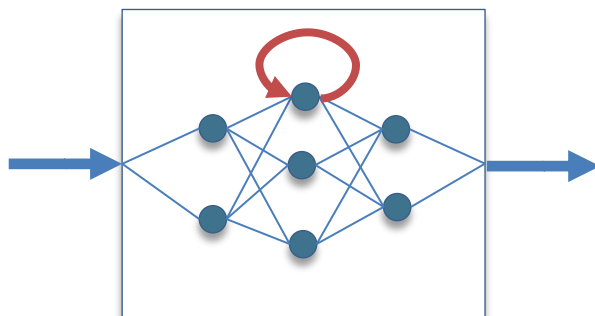
Vorhersagemodelle

- Vergleich dreier Modelle zur Vorhersage von Zeitreihen:



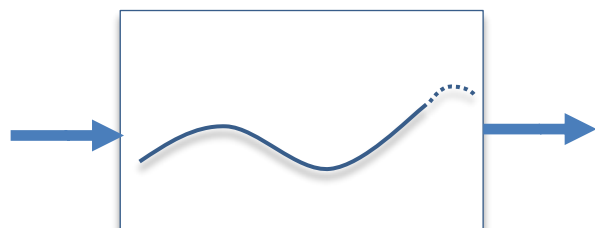
Vorwärtsgerichtete Neuronale Netze (FFN, Feedforward Neural Networks)

- Netz besteht aus mehreren Neuronen (vgl. menschliches Gehirn)
- Neuronen sind in Schichten angeordnet, die nacheinander durchlaufen werden



Rekurrente Neuronale Netze

- Ausgang eines Neurons läuft nicht zwingend zur nächsten Schicht, sondern können auch zum selben oder vorherigen Neuronen führen
- Beispiel: Long Short-Term Memory (LSTM) → durch Rückkopplungen erhält das neuronale Netz ein Gedächtnis



Vektorautoregression (VAR)

- Modell ohne neuronale Netze
- Vorhersage erfolgt mittels Regression auf vergangene Werte

Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

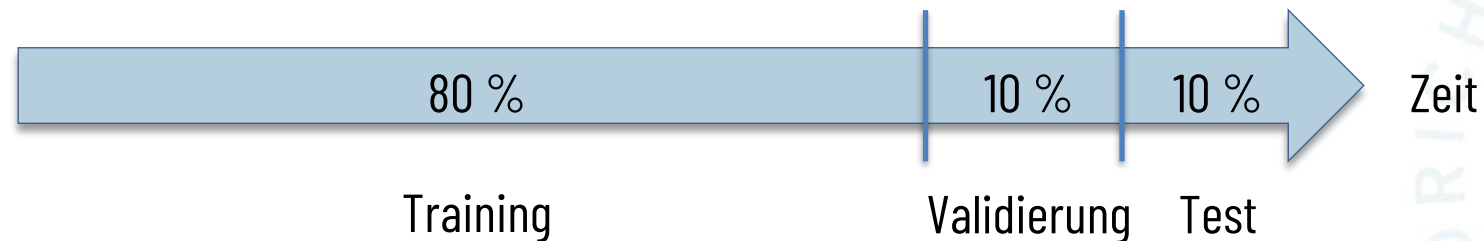
Ausblick

Modelltraining

- Datensätze:

- **Nürnberg** (12 Monate): Zuflussvolumenstrom, $\text{NH}_4\text{-N}$, TOC, Trübung
- **Pfaffenhofen a.d. Ilm** (22 Monate): Zuflussvolumenstrom, pH, Temperatur, Phosphat, Leitfähigkeit, ...
- **Weißenburg** (12 Monate): Zuflussvolumenstrom, pH, Temperatur, Phosphat, GesN, $\text{NH}_4\text{-N}$, CSB, ...

- Aufteilung in Training-/Validierung-/Testdatensätze erfolgt zeitlich



- Hyperparametertuning der Neuronalen Netze:

- Grid Search für systematische Analyse
- Software-Bibliothek Optuna (Bayes'sche Optimierung) für Optimierung

Motivation

Methanisierung

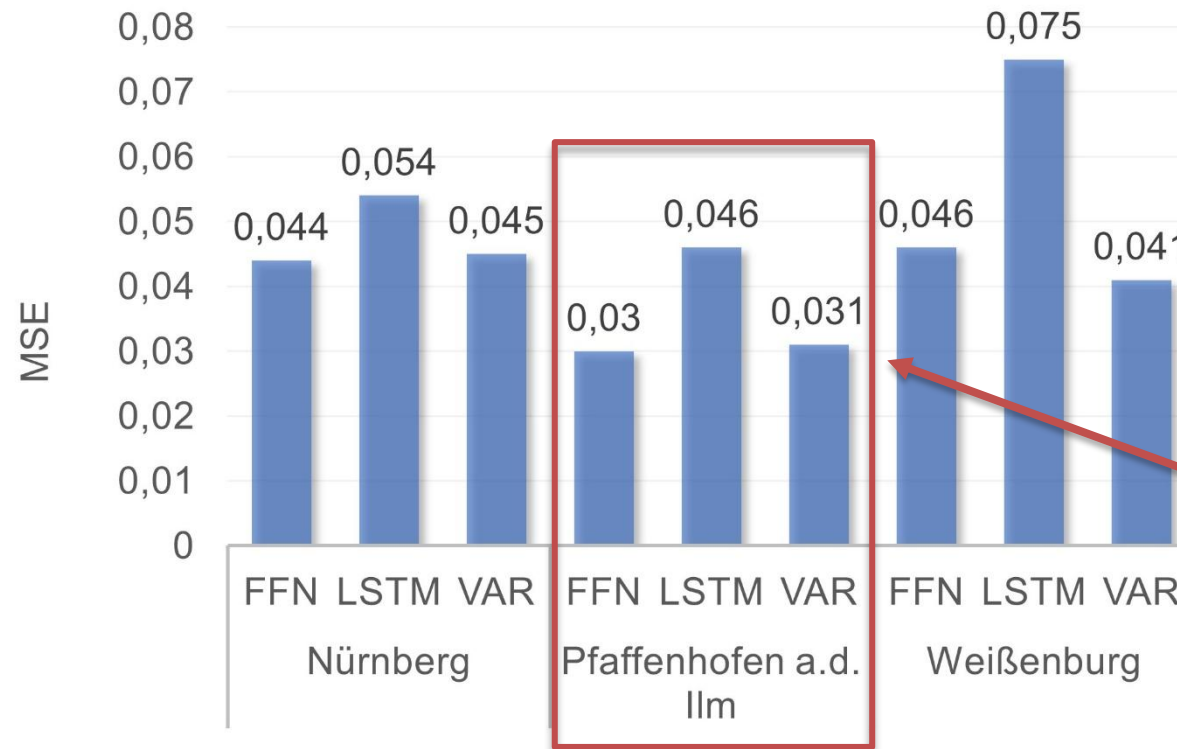
Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

Ergebnisse

- Vergleich der Modelle für jede Kläranlage anhand des mittleren MSEs aller vorhergesagten Parameter:



Mean squared error (MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}^{(i)} - y^{(i)})^2$$

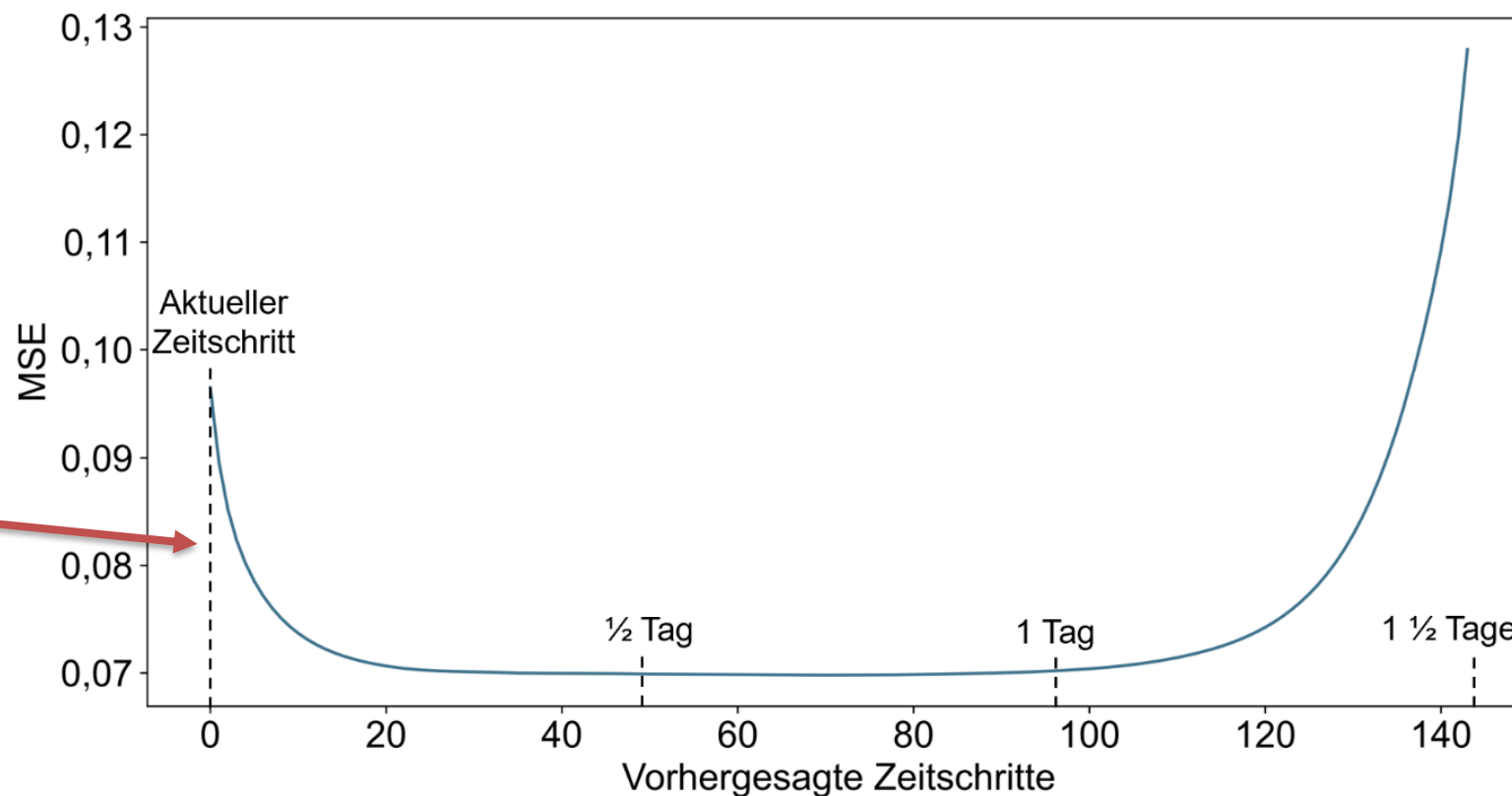
Beste Ergebnisse für
Pfaffenhofen, aufgrund des
größten Datensatzes (2 Jahre)

- LSTM zeigt bei allen drei Kläranlagen die schlechteste Performance
- FFN und VAR führen zu ähnlichen Ergebnissen
- Zusätzliche Analyse: FFN ist besser geeignet, wenn Modell mit Daten mehrerer Kläranlagen trainiert wird

Ergebnisse – Rekurrente Neuronale Netze

- Genauere Betrachtung des Fehlers beim LSTM

Kläranlage Weißenburg



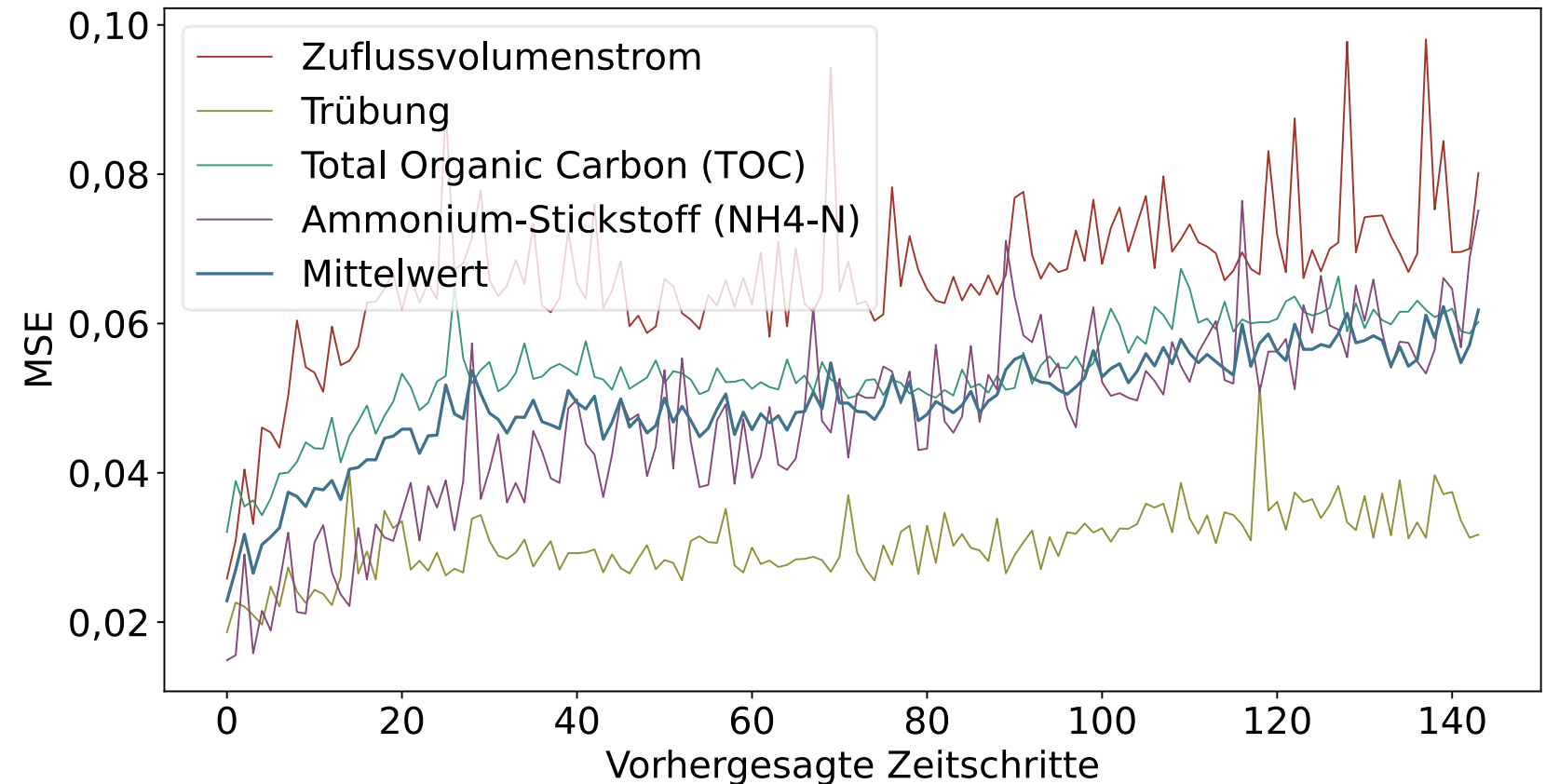
- LSTM kann zeitliche Nähe zwischen Daten-Input und ersten Vorhersagezeitschritten nicht nutzen
- Tägliche Schwankungen werden gut abgebildet, Abweichungen davon jedoch nur schlecht

Masterarbeit Lukas Frank, 2025

Ergebnisse – Vorwärtsgerichtete Neuronale Netze (FFN)

- Betrachtung des Fehlers beim FFN

Kläranlage Nürnberg

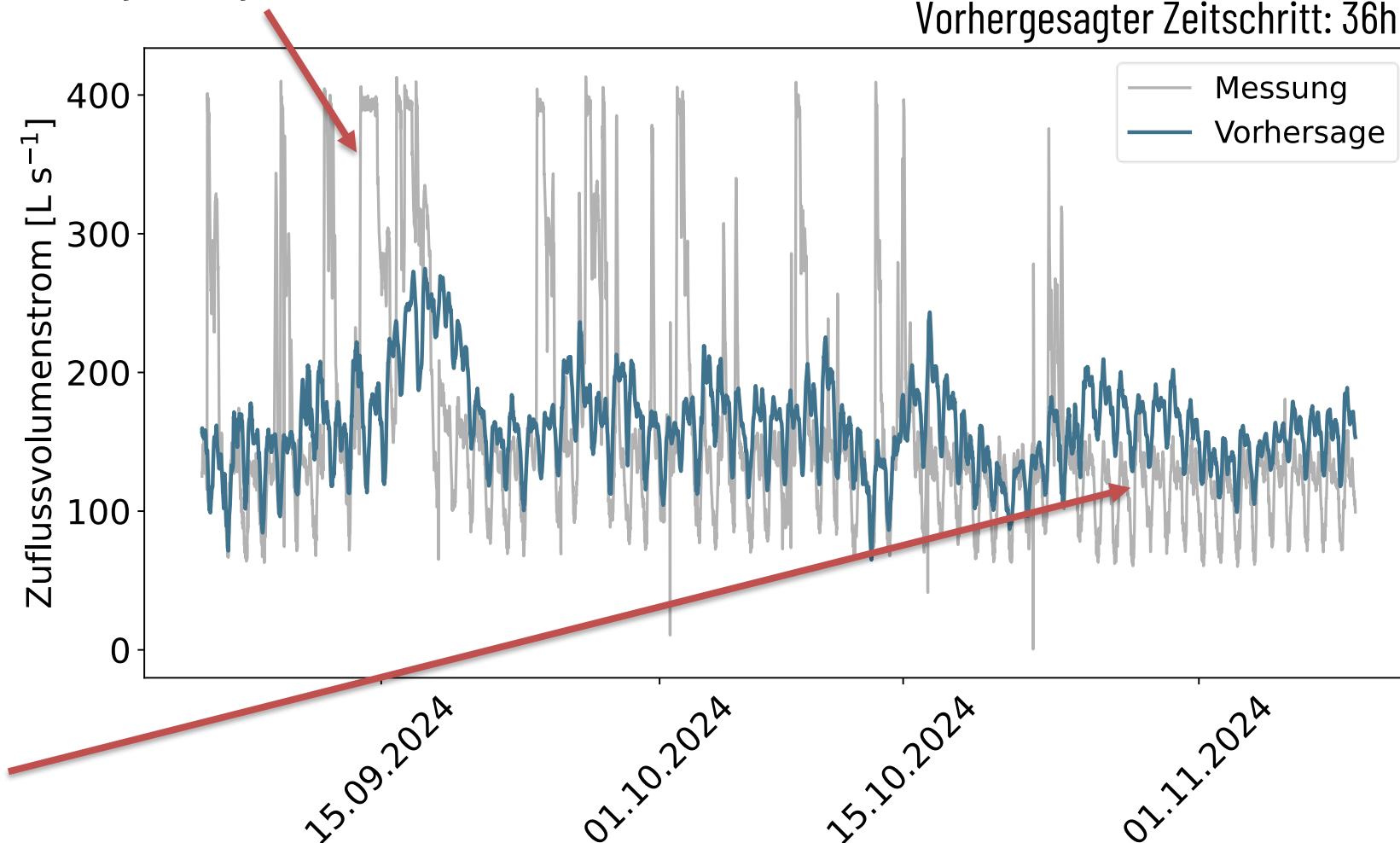


- Fehler ist größer, je weiter der vorhergesagte Zeitschritt in der Zukunft liegt
- Unterschiedlich hoher Fehler abhängig von dem betrachteten Parameter
→ Größter Fehler beim Zuflussvolumenstrom

Ergebnisse – Vorwärtsgerichtete Neuronale Netze (FFN)

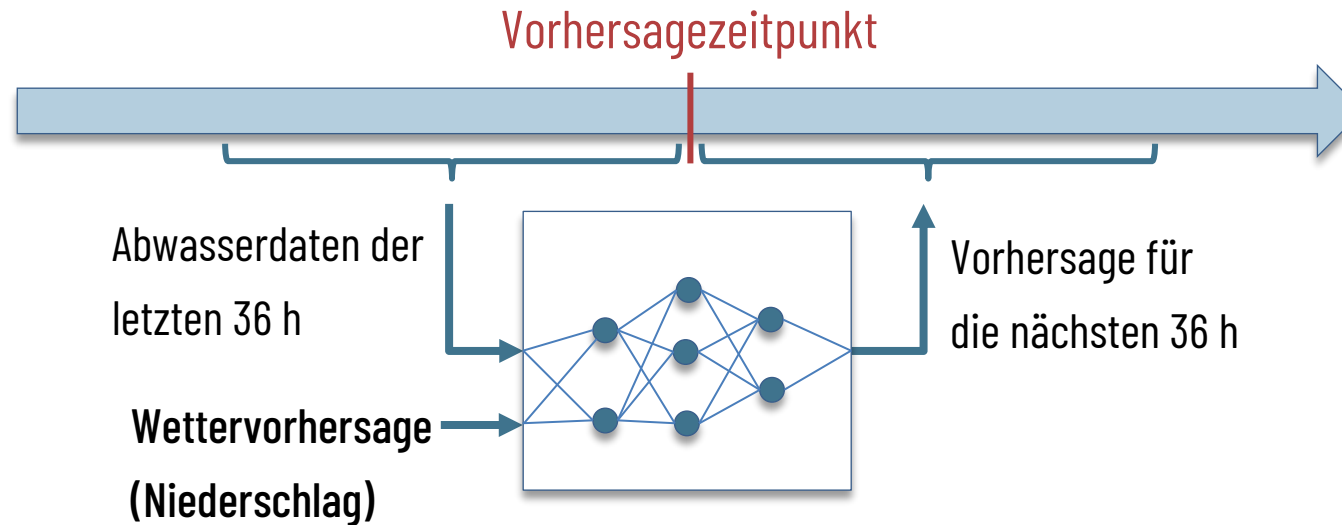
- Zuflussvolumenstrom steigt bei Regenereignissen stark an
- Informationen über Niederschlag sind in den Eingabedaten des Modells nicht enthalten
 - Vorhersage von Zuflussspitzen ist nicht möglich
- Modell versucht Abweichung zu minimieren:
 - Werte werden generell zu hoch vorhergesagt

Kläranlage Pfaffenhofen
Vorhergesagter Zeitschritt: 36h



Optimierung der Vorhersage für Regenereignisse

- Idee: Neben Abwasserdaten erhält das FFN eine Niederschlagsprognose für die nächsten 36 h:

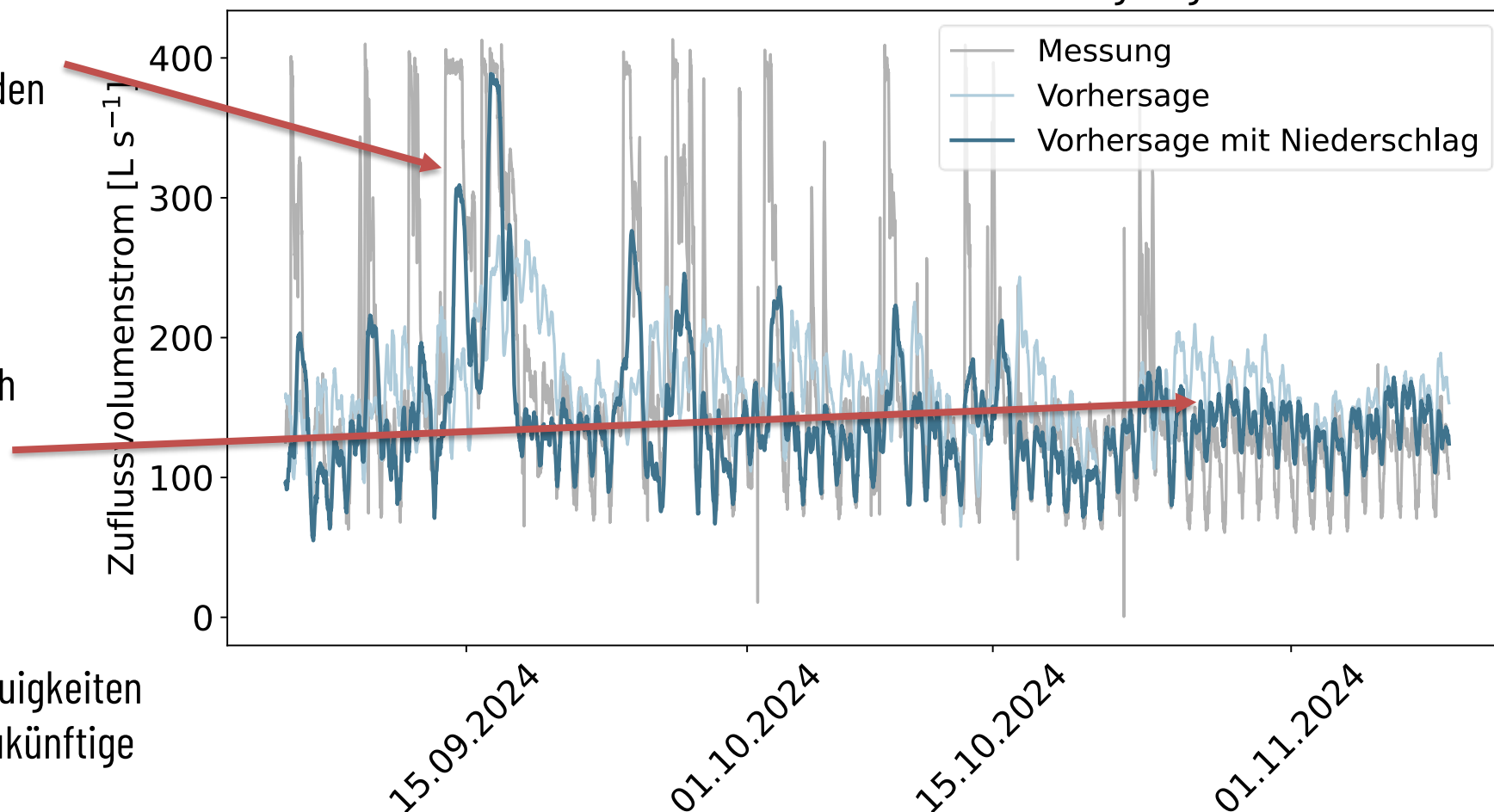


- Für die Niederschlagsprognose werden historische Messdaten des Deutschen Wetterdiensts (DWD) verwendet und mit einem Prognosefehler beaufschlagt
- Niederschlag kommt zeitverzögert in der Kläranlage an (Verweilzeit im Kanalnetz)
→ Verwendung von Niederschlagssummen über die letzten 24 Stunden

Ergebnisse – Vorwärtsgerichtete Neuronale Netze (FFN)

- Ergebnis unter Nutzung einer Niederschlagsprognose
- Zeiten mit hohem Abwasserzufluss werden besser vorhergesagt
- Fehler jedoch bei der Höhe der Peaks
- Positiver Einfluss auch auf Zeiten mit Trockenwetter

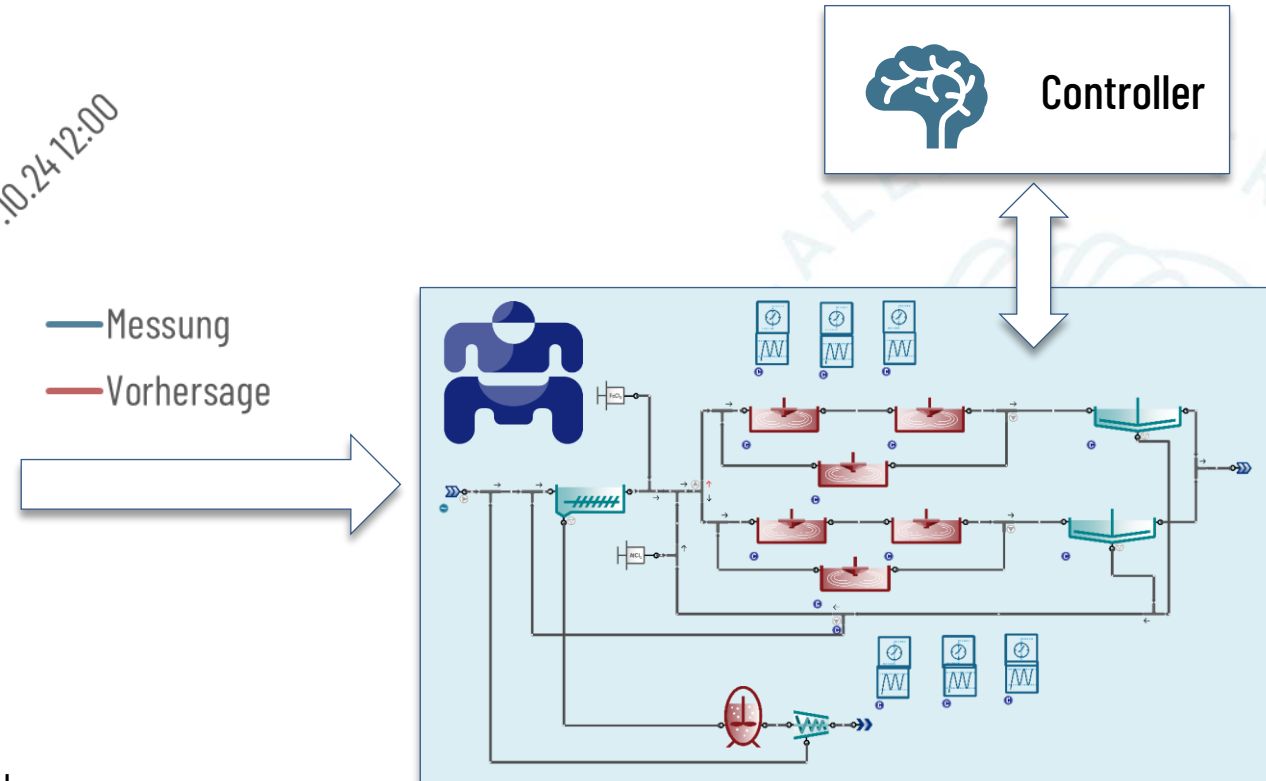
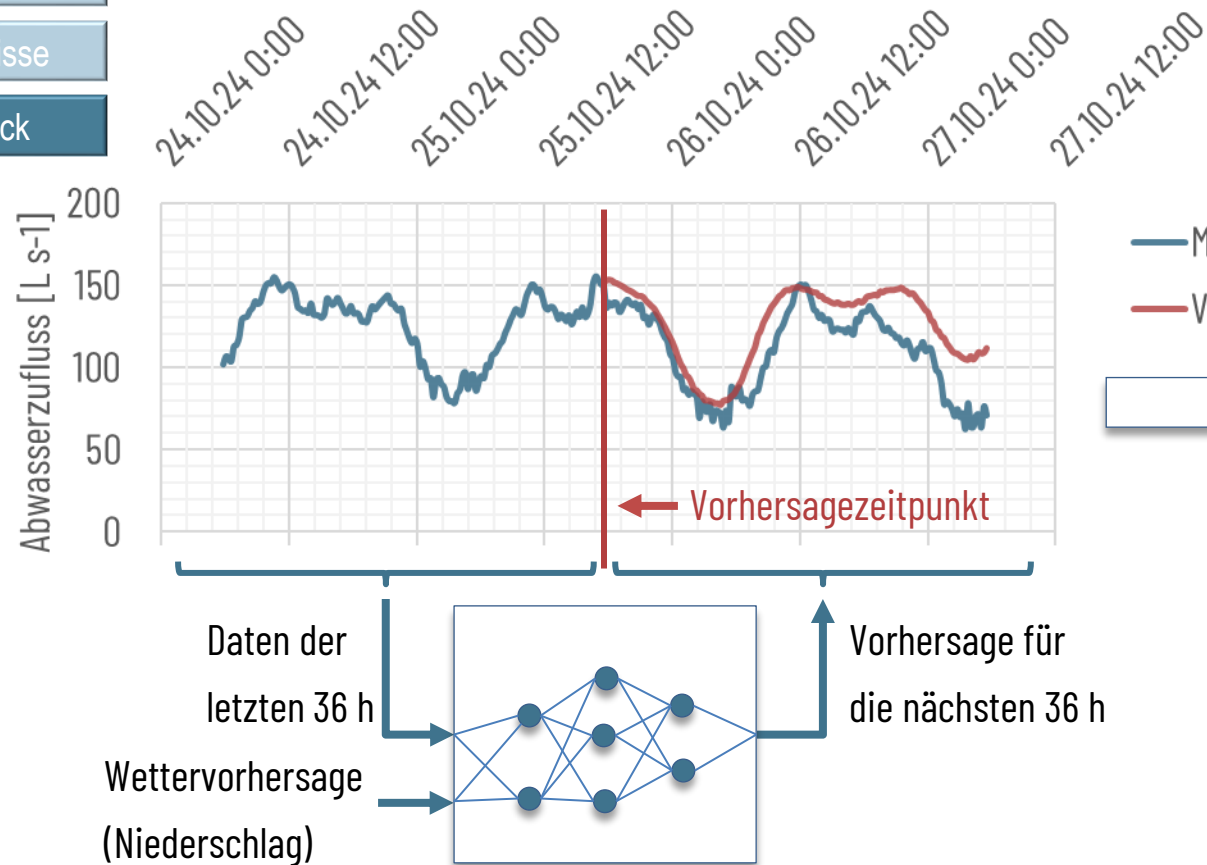
Kläranlage Pfaffenhofen
Vorhergesagter Zeitschritt: 36h



➤ Vorhersage liefert trotz Ungenauigkeiten wertvolle Informationen über zukünftige Klärwerkszustände

Ausblick

- Kurzzeitprognosen sollen als Datenquelle für Kläranlagensimulationen genutzt werden ...

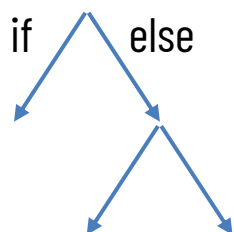


... und daran verschiedene Controllertypen getestet werden



Controllertypen

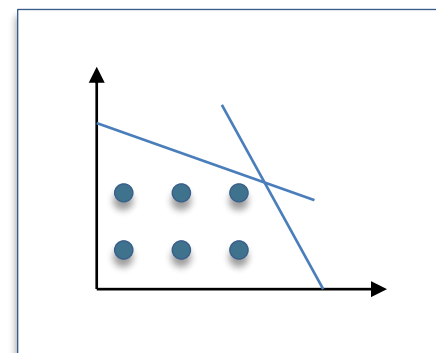
- Vergleich 3 verschiedener Konzepte



Konditionelle Programmierung

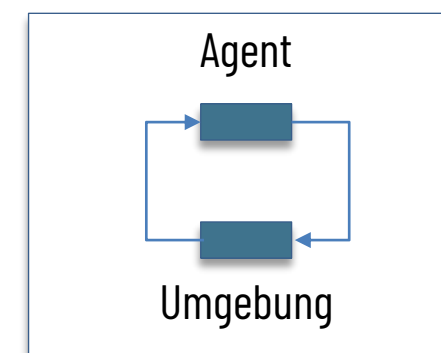
Benchmark-Regelung
(Referenzszenario)

- z.B. Wenn Strompreis kleiner als Grenzwert, dann Methanisierung starten
- Hoher Optimierungsaufwand



Lineare Programmierung

- Mathematische Optimierung
- Lineare Zielfunktionen werden unter Einhaltung von Randbedingungen minimiert/maximiert
- z.B. Mixed-Integer Linear Programming (MILP)



Reinforcement Learning

„Verstärkendes Lernen“

- Agent (KI) interagiert mit Umgebung
- Wird anhand einer Funktion (z.B. Gewinn) belohnt
- Lernt so effiziente Entscheidungen zu treffen
- Rechenaufwändiger Lernprozess

Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

- Anhand von Datensätzen der Kläranlagen Nürnberg, Pfaffenhofen a.d. Ilm und Weißenburg wurden **Abwasser-Vorhersagemodelle** entwickelt
 - **Vorwärtsgerichtete Neuronale Netze (FFN)** konnten dabei als geeignetes Modell identifiziert werden
 - Herausfordernd sind Abweichungen von den gewöhnlichen tageszeitlichen Schwankungen, beispielsweise durch Regenereignisse
 - Durch Niederschlagsprognosen als zusätzliche Datenquelle konnten die Ergebnisse verbessert werden
 - Kurzzeitprognosen der Abwasserdaten werden zukünftig in Klärwerkssimulation verwendet
- Optimierung des Energiemanagements

Kontakt

Constantin Heim

Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik
Fürther Straße 244f
90429 Nürnberg



constantin.heim@fau.de



+49 911 5302 99037