

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

Motivation

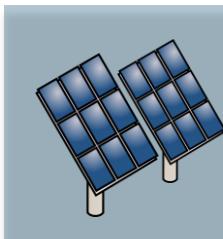
Methanisierung

Kurzzeitprognosen

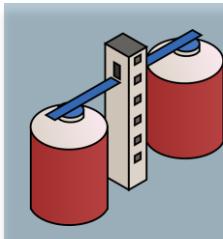
Ergebnisse

Ausblick

- 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

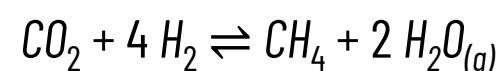
Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

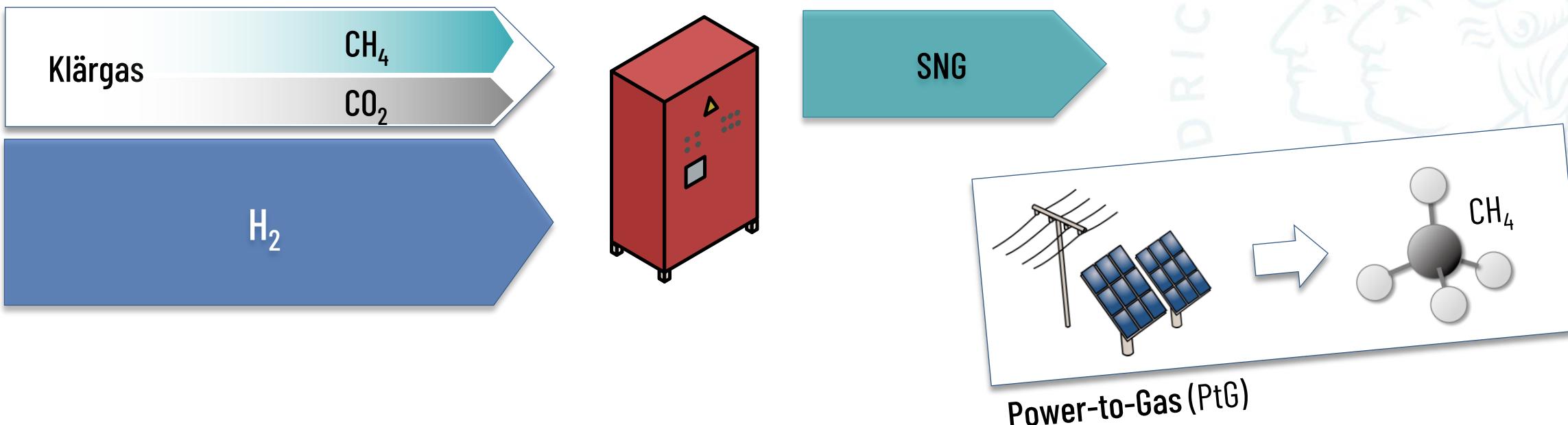
Ausblick

- CO_2 -Methanisierung (Sabatier-Reaktion)



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

- Katalytisch → Verwendung eines Nickel-Katalysators
- Direktmethanisierung → Klärgas wird verwendet, ohne CO_2 vorher abzutrennen



Power-to-Gas (PtG)

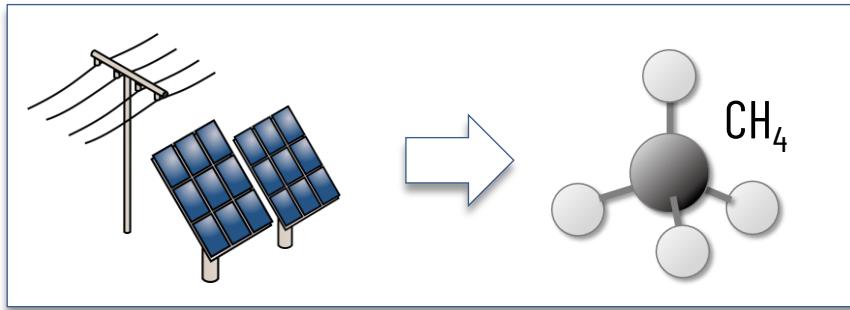
Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick



- 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

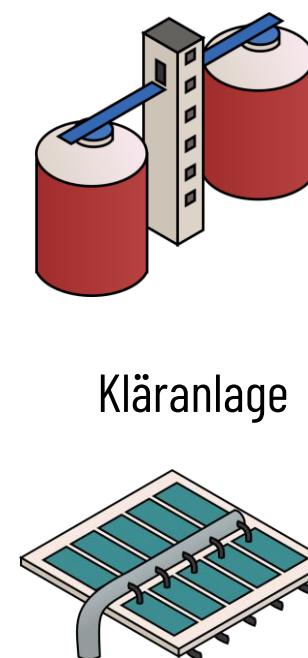
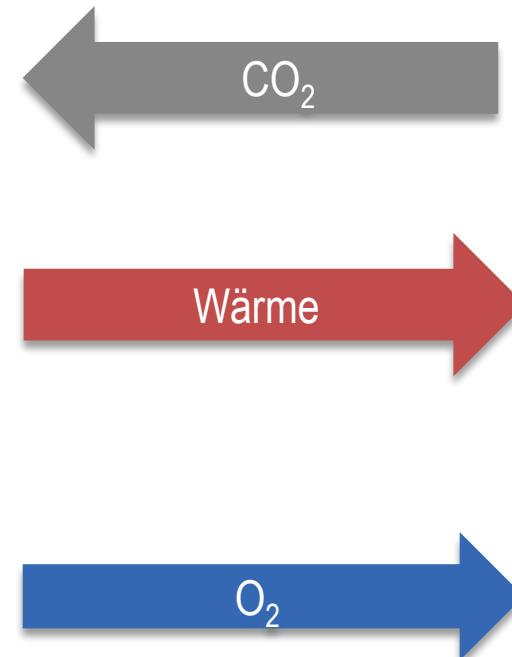
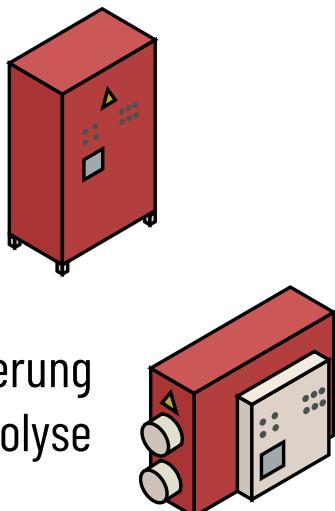
Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

Methanisierung
und Elektrolyse

Kläranlage

- Methanisierung auf Kläranlagen hat folgende Synergieeffekte:
- Klärgas (ca. 60 % CH_4 , 40 % CO_2) wird als Kohlenstoffquelle genutzt
- Abwärme (Elektrolyse/Methanisierung) kann zur Beheizung der Faultürme genutzt werden
- O_2 der Elektrolyse kann Luft im Belebungsbecken ersetzen
- Bzw. zukünftig in einer 4. Reinigungsstufe (Spurenstoffentfernung) zur Ozonherstellung genutzt werden

Methanisierung auf Kläranlagen

Motivation

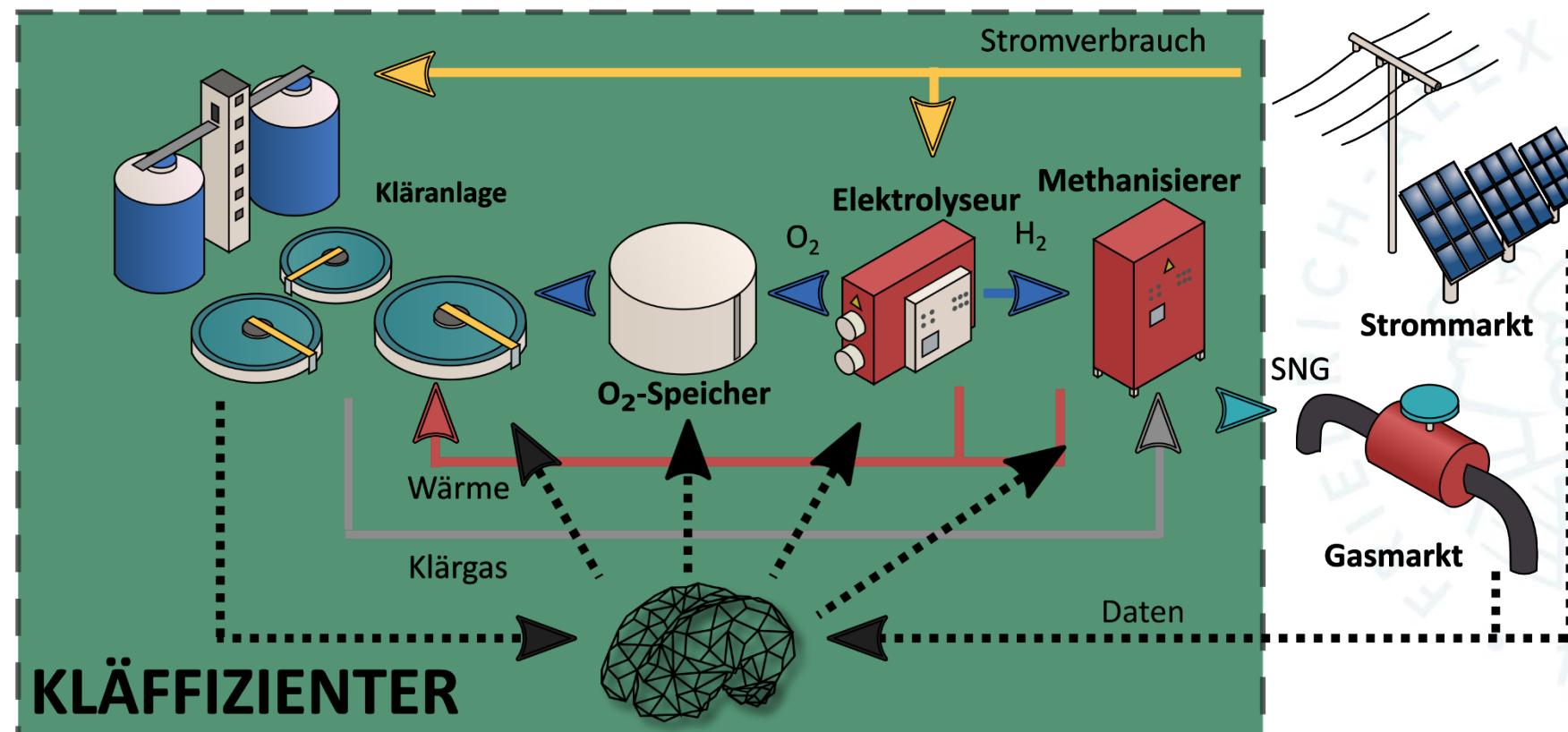
Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

- 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

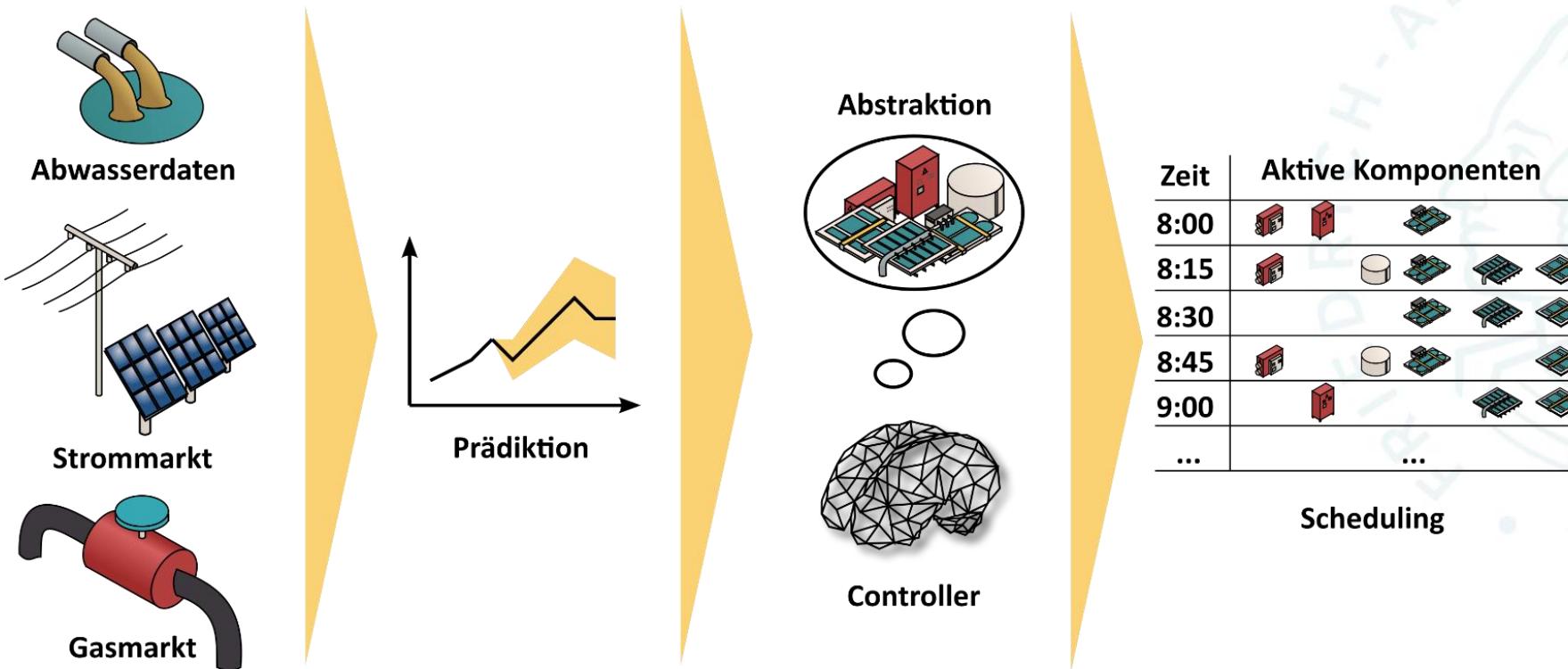
Kurzzeitprognosen

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

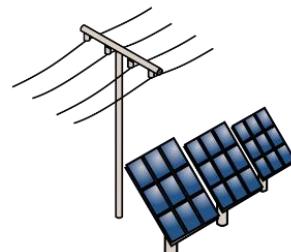
Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick



Strommarkt



Gasmarkt



Abwasserdaten

- 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

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

- 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



- 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

Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

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

Weißenburg



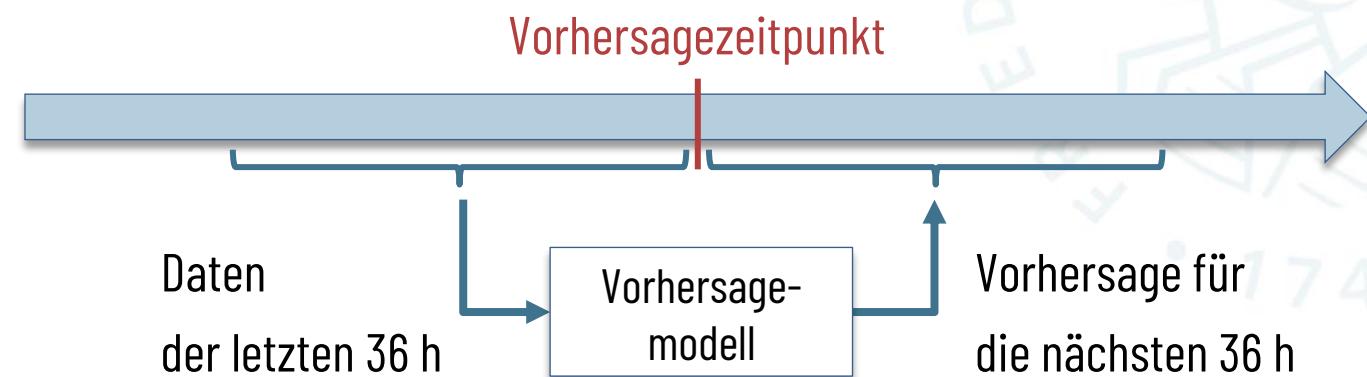
Pfaffenhofen a.d. Ilm



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

Motivation

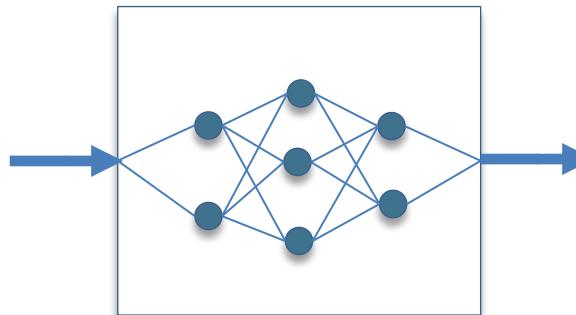
Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

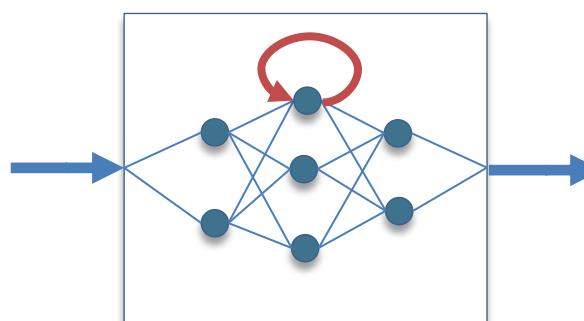
Ausblick

- Vergleich dreier Modelle zur Vorhersage von Zeitreihen:



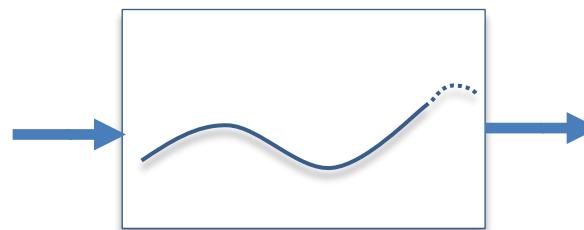
Vorwärtsgerichtete Neuronale Netze (FFN, Feedforward Neural Networks)

- 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

Modelltraining

Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

- 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

Ergebnisse

Motivation

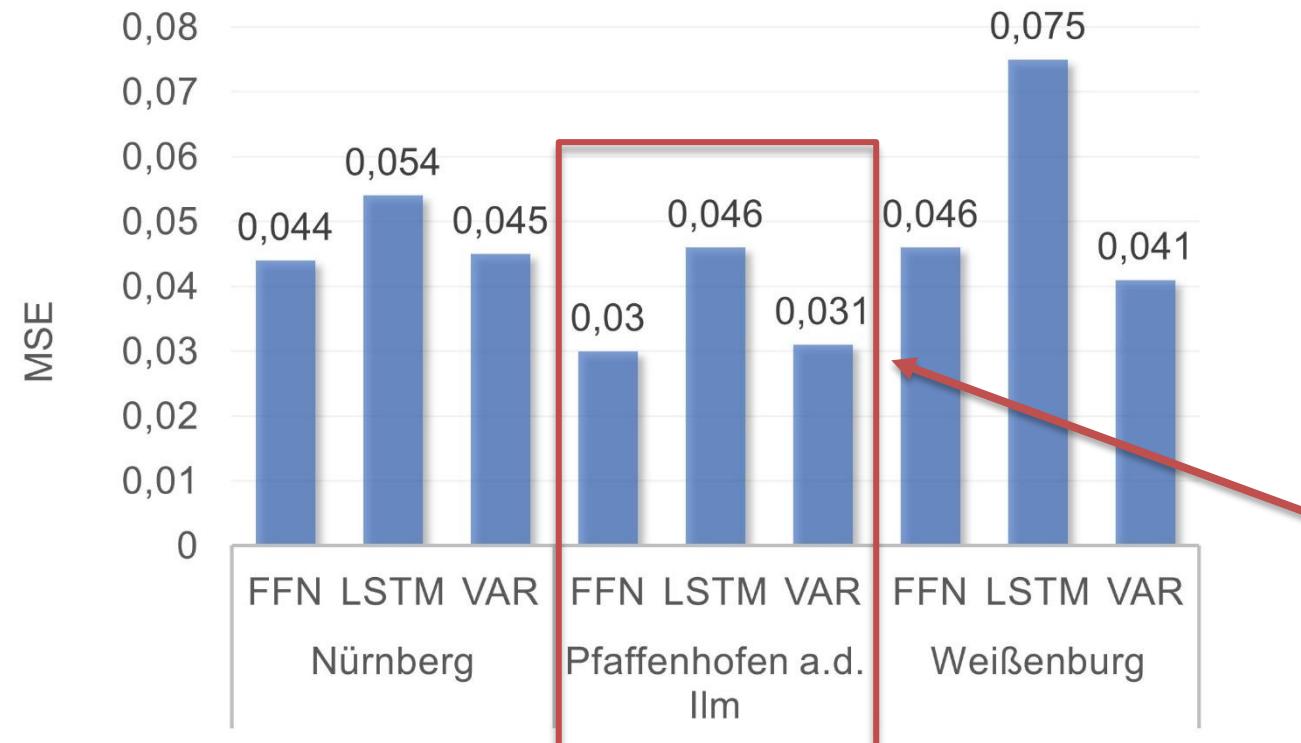
Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

- 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

Motivation

Methanisierung

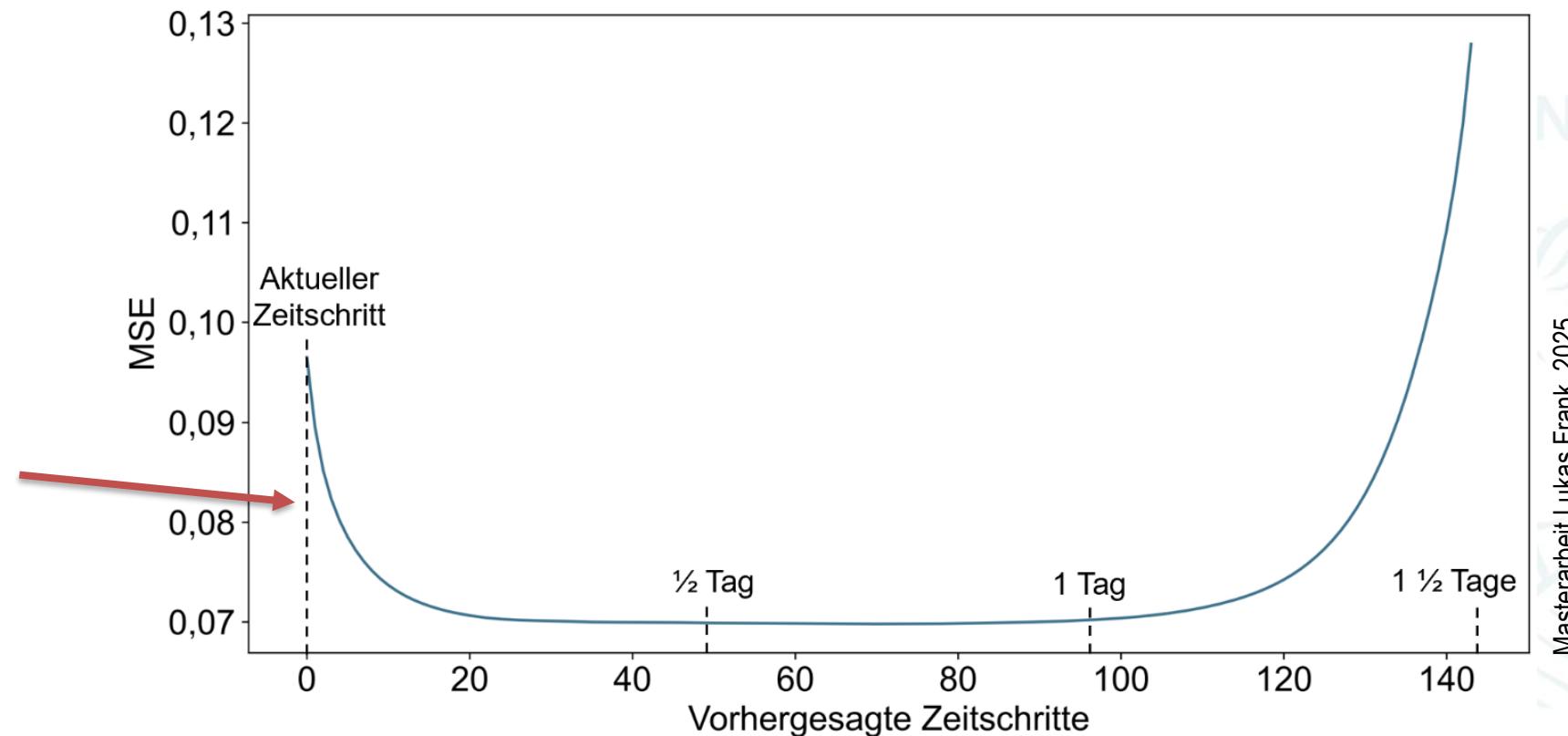
Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

- 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

1743

Ergebnisse – Vorwärtsgerichtete Neuronale Netze (FFN)

Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

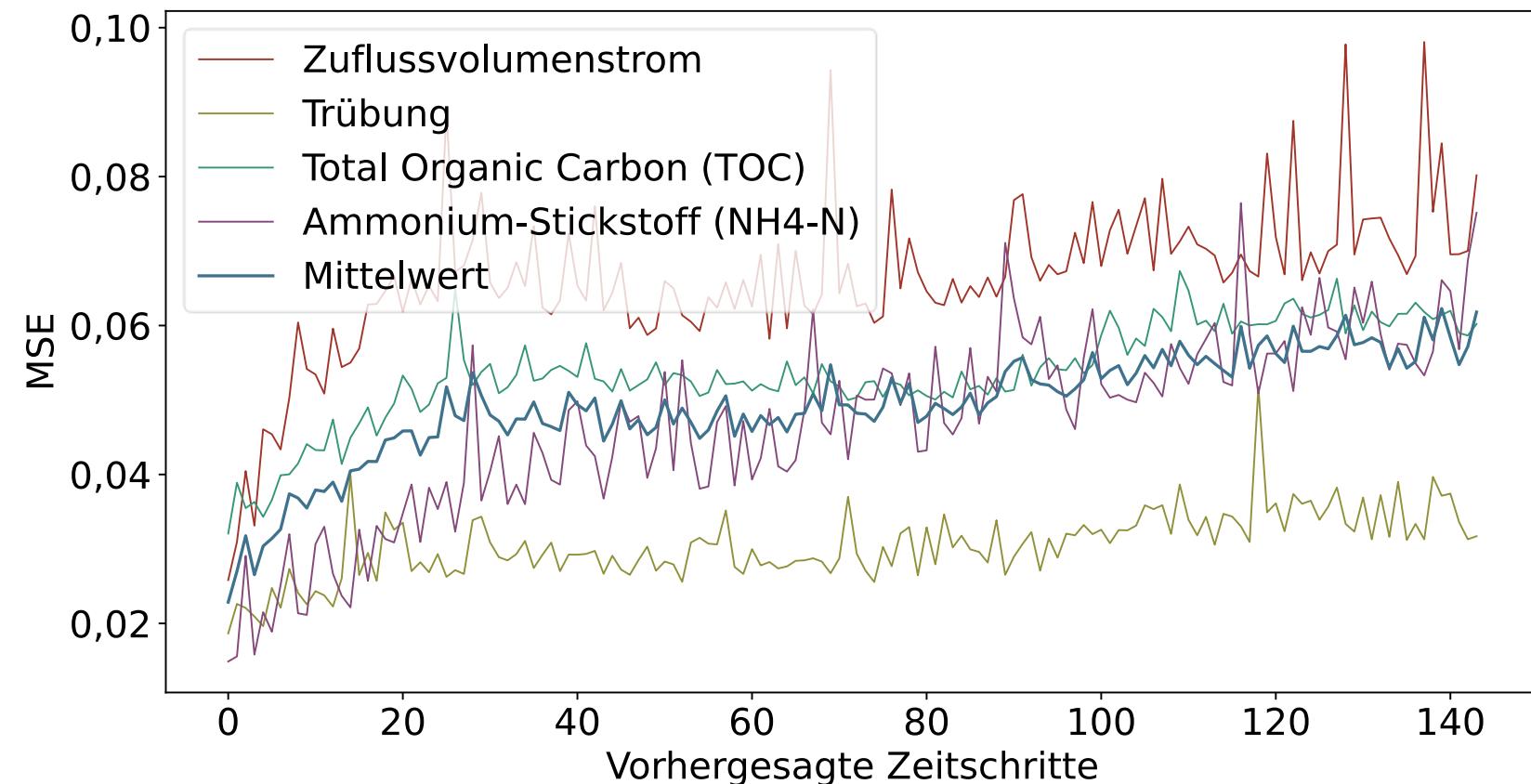
Ergebnisse

Ausblick

- Betrachtung des Fehlers beim FFN

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

Kläranlage Nürnberg



Ergebnisse – Vorwärtsgerichtete Neuronale Netze (FFN)

Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

- Zuflussvolumenstrom steigt bei Regenereignissen stark an

- Informationen über Niederschlag sind in den Eingabedaten des Modells nicht enthalten

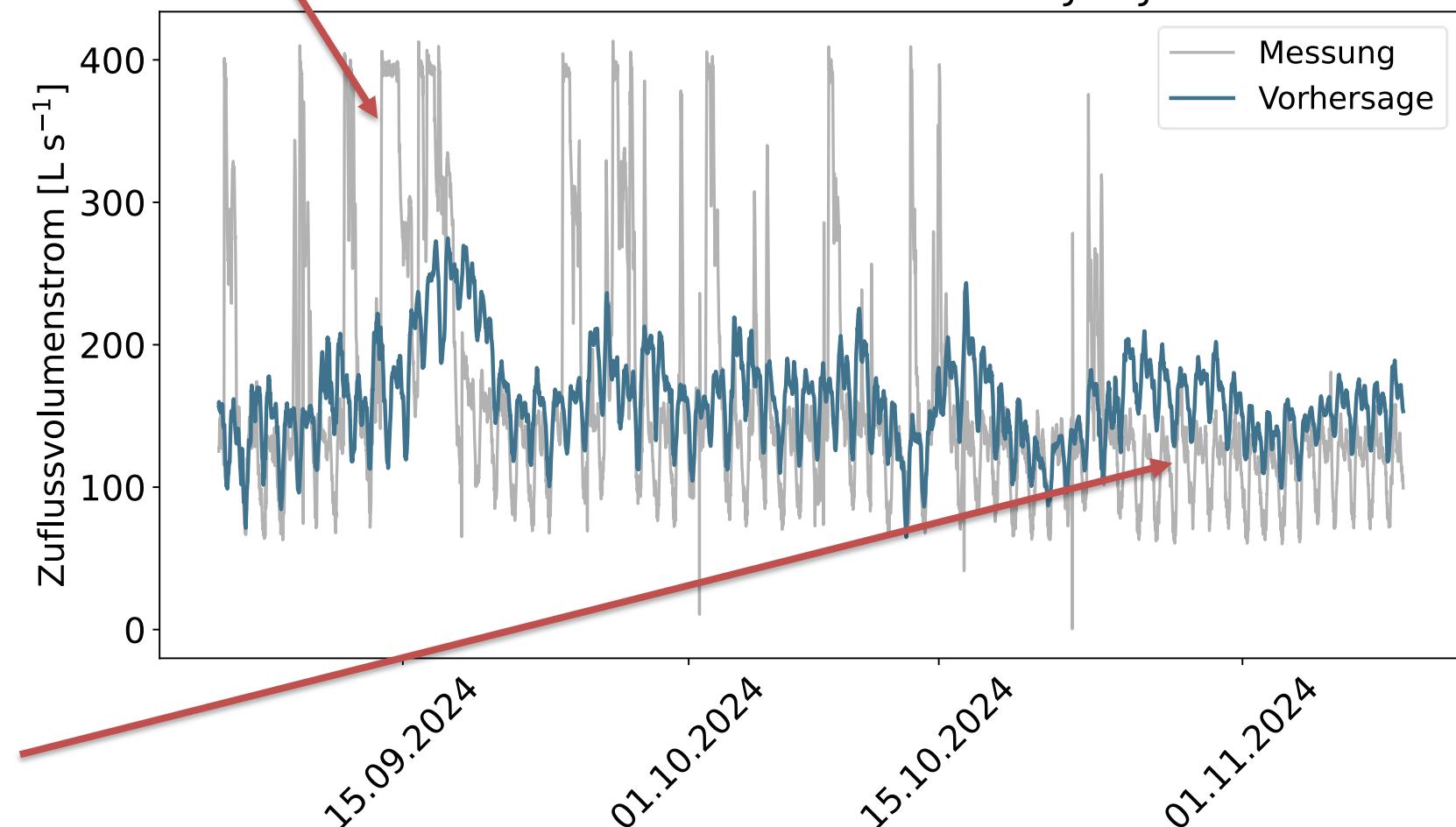
- Vorhersage von Zuflussspitzen ist nicht möglich

- Modell versucht Abweichung zu minimieren:

- Werte werden generell zu hoch vorhergesagt

Kläranlage Pfaffenhofen

Vorhergesagter Zeitschritt: 36h



Optimierung der Vorhersage für Regenereignisse

Motivation

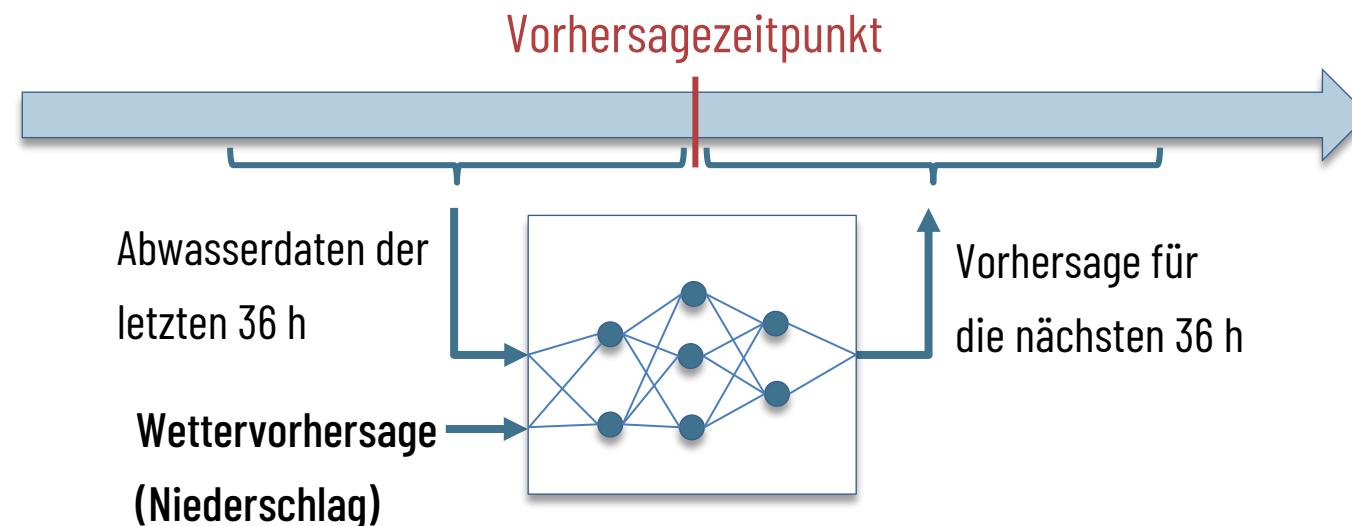
Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

- 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)

Motivation

Methanisierung

Kurzzeitprognosen

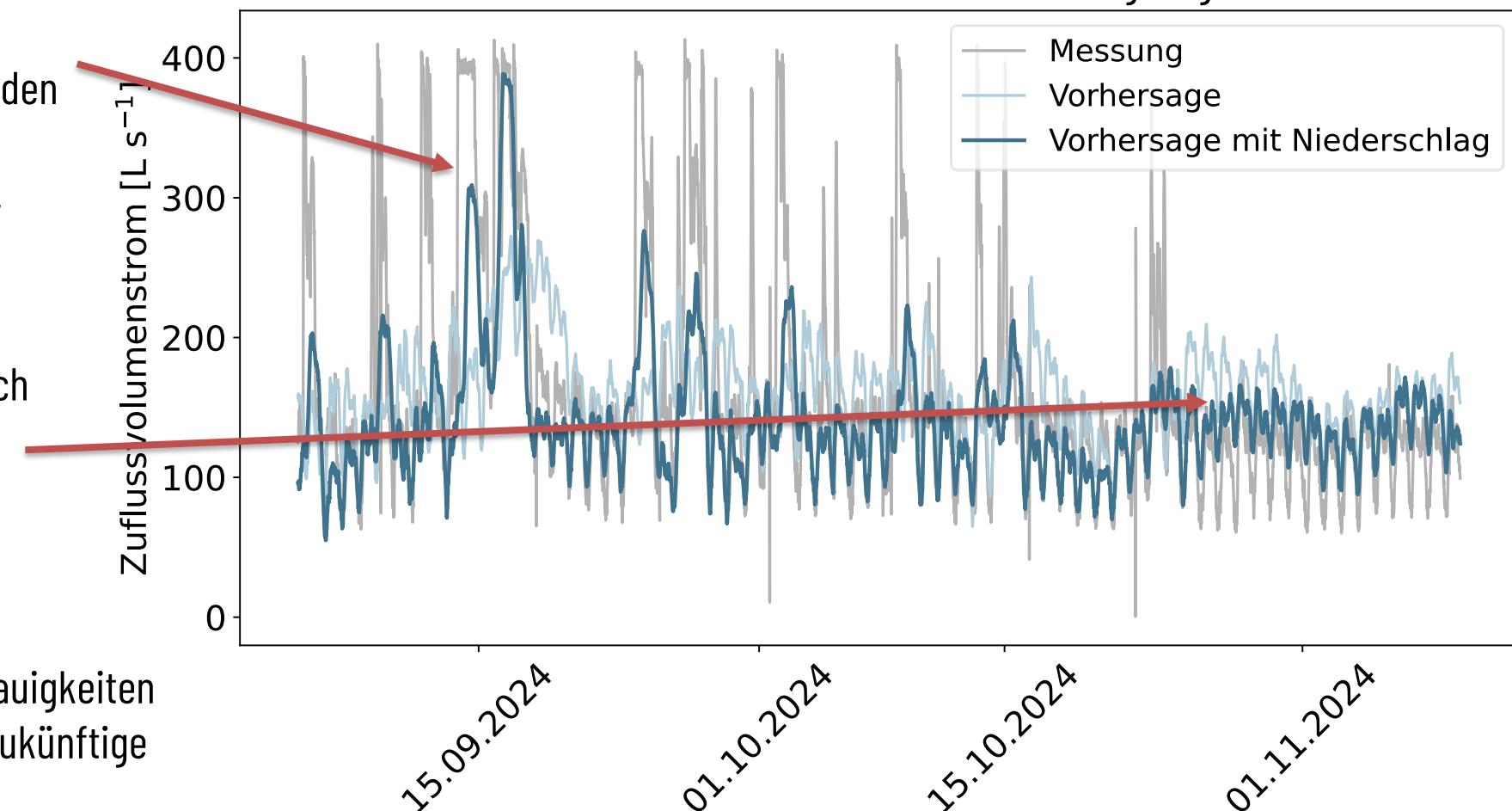
Ergebnisse

Ausblick

- 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 Klärwerkzustände

Ausblick

Motivation

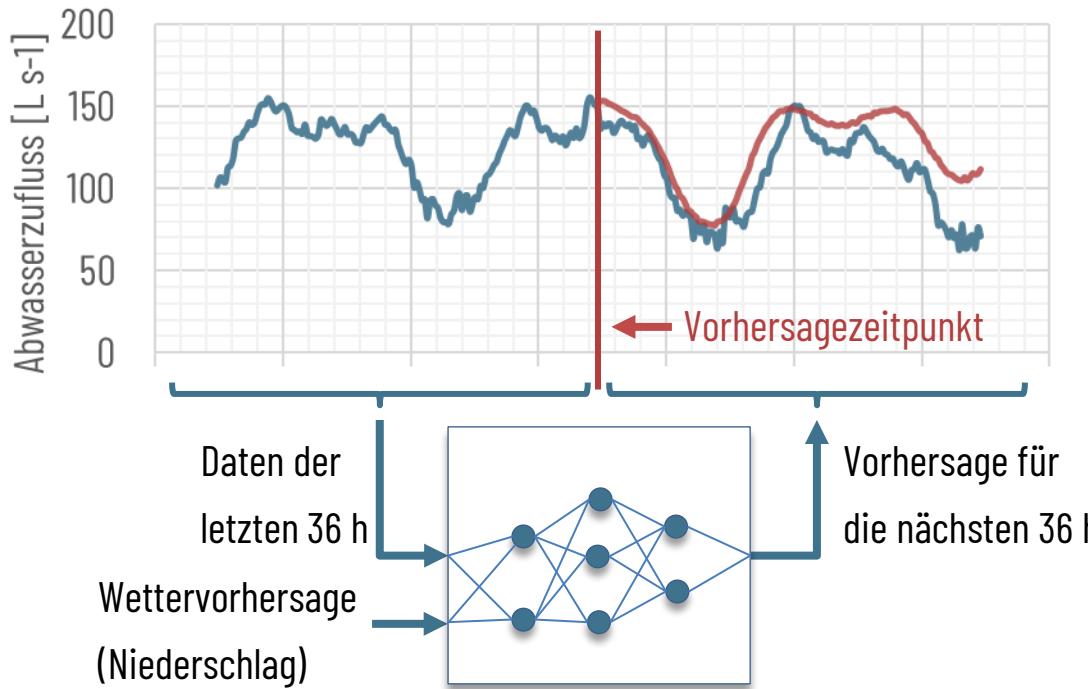
Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

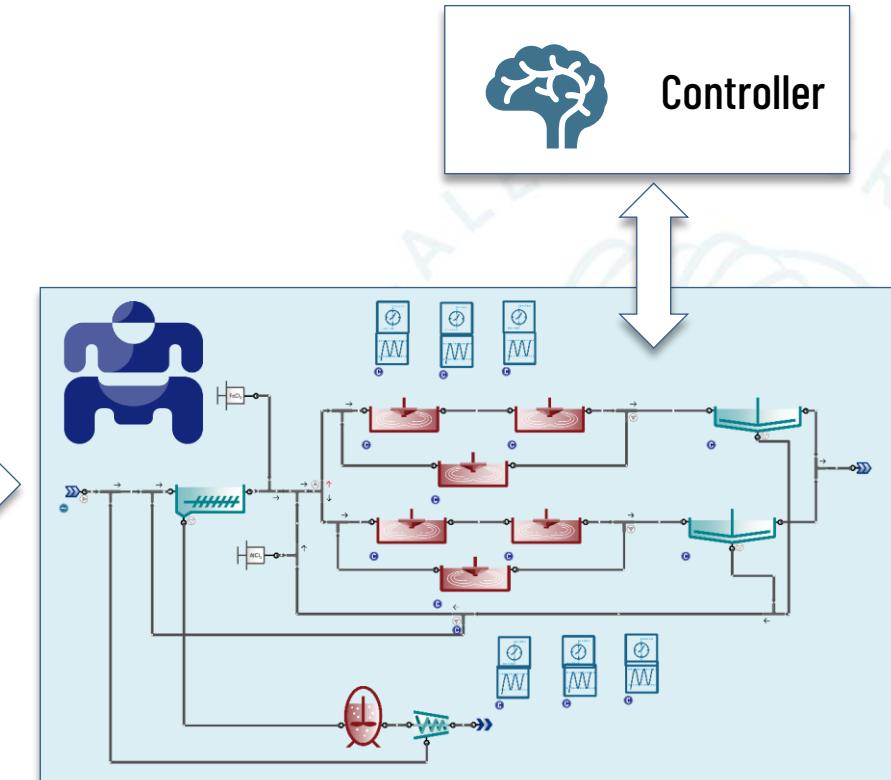
- Kurzzeitprognosen sollen als Datenquelle für Kläranlagensimulationen genutzt werden ...



→ Vorhersagezeitpunkt

→ Daten der letzten 36 h

→ Vorhersage für die nächsten 36 h



... und daran verschiedene Controllertypen getestet werden

Controllertypen

Motivation

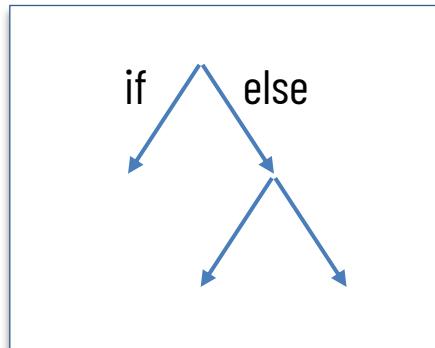
Methanisierung

Kurzzeitprognosen

Ergebnisse

Ausblick

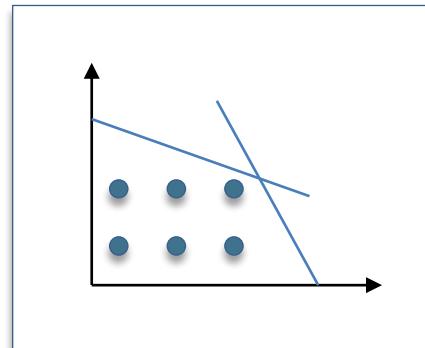
- Vergleich 3 verschiedener Konzepte



Konditionelle Programmierung

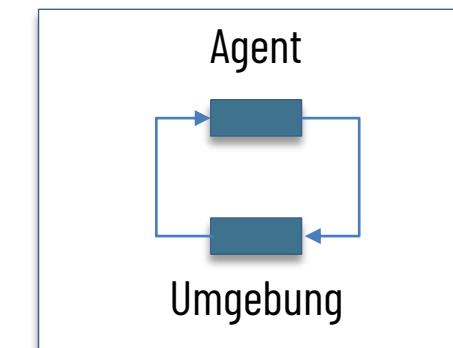
Benchmark-Regelung
(Referenzszenario)

- 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

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