



# MALEG

## Maschinelles Lernen in der aquatischen Geochemie

Praxisforum Geothermie Bayern 2025

Lars Yström

# 1. Vorstellung

- Partner
- Ziel von MALEG

# 2. Vorgehensweise

- Hardware Zwilling
- Digitale Zwillinge

# 3. Künstliche Intelligenz

- Entwicklung
- Stand des Projektes

# Partner

## Gefördert durch:



## Partner:



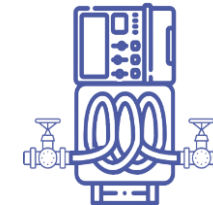
## Kraftwerke:



## Effizienzsteigerung von Geothermiekraftwerken mittels KI

### Synergie aus multidisziplinären Ansätzen:

1. Analytische Geochemie:  
Umfassende hydrogeochemische Beprobung des Kraftwerks und chemische Analyse der standort-spezifischen Experimente mittels Hardware Zwilling
2. Hardware Zwilling (Demonstrator):  
Feldlabor zur experimentelle Bestimmung der effizientesten Betriebsparameter
3. Digitale Zwillinge:  
Digitales Abbild des Demonstrators in einem cyber-physischen System  
Echtzeit-Prozesssimulation durch Monitoring der Betriebsparameter
4. Künstliche Intelligenz:  
Analyse und Interpretation der gesamten, erhobenen Daten (Betriebsparameter, Fluidchemismus, Prozesssimulation...)



# Hardware Zwilling



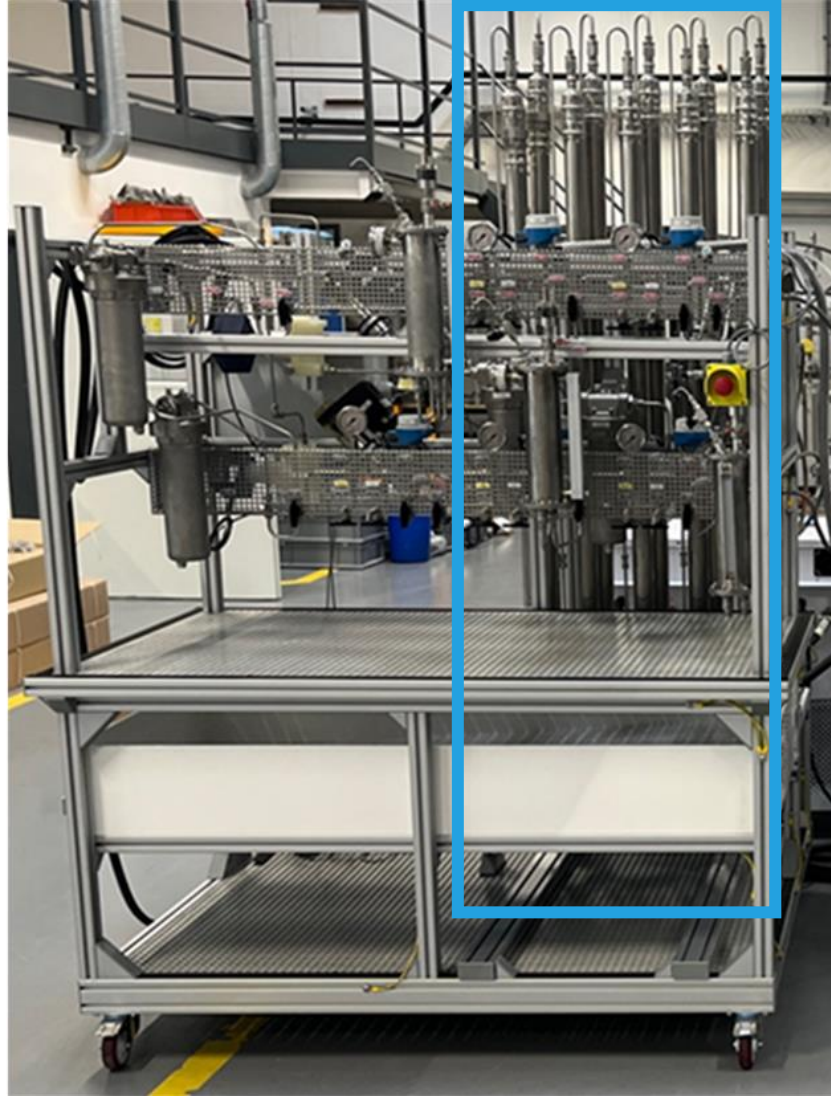


# Hardware Zwilling

## Aufbau und Funktionsweise

**Hergestellt und getestet durch das Fraunhofer ISE**

Der Demonstrator wird über einen Bypass an der heißen Seite des Geothermiekraftwerkes an das System angeschlossen



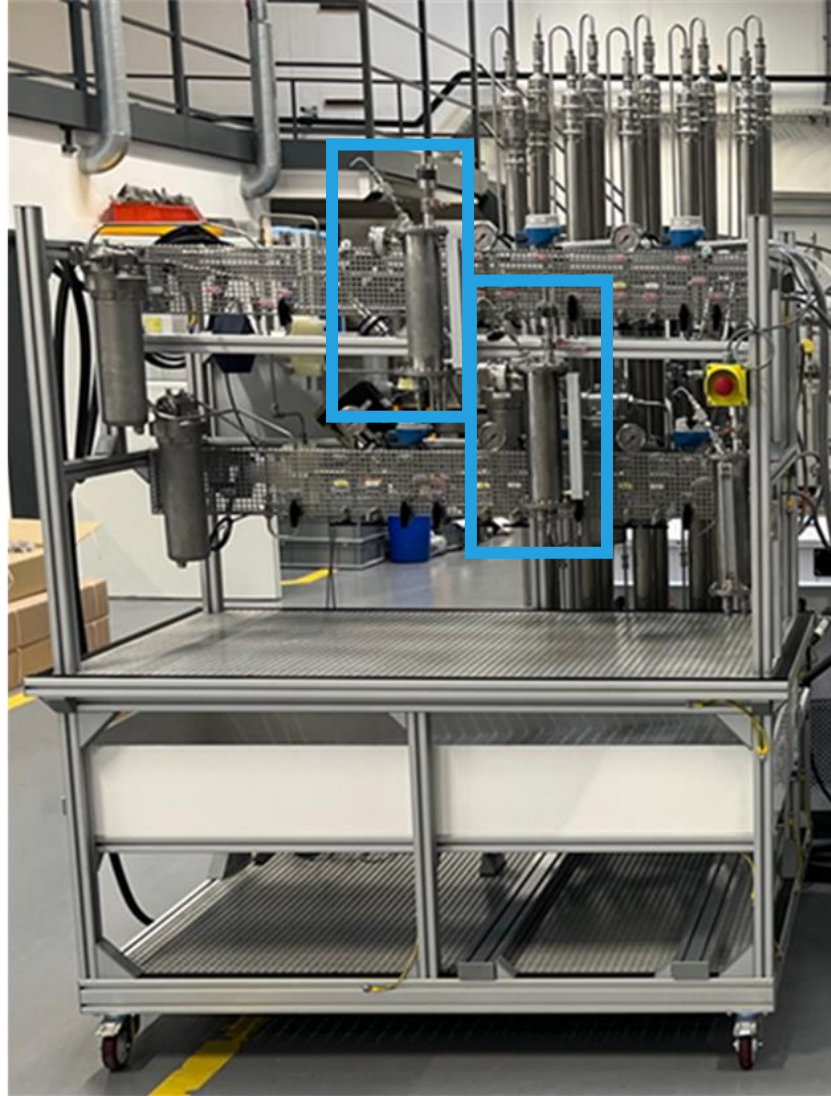
# Hardware Zwilling

## Aufbau und Funktionsweise



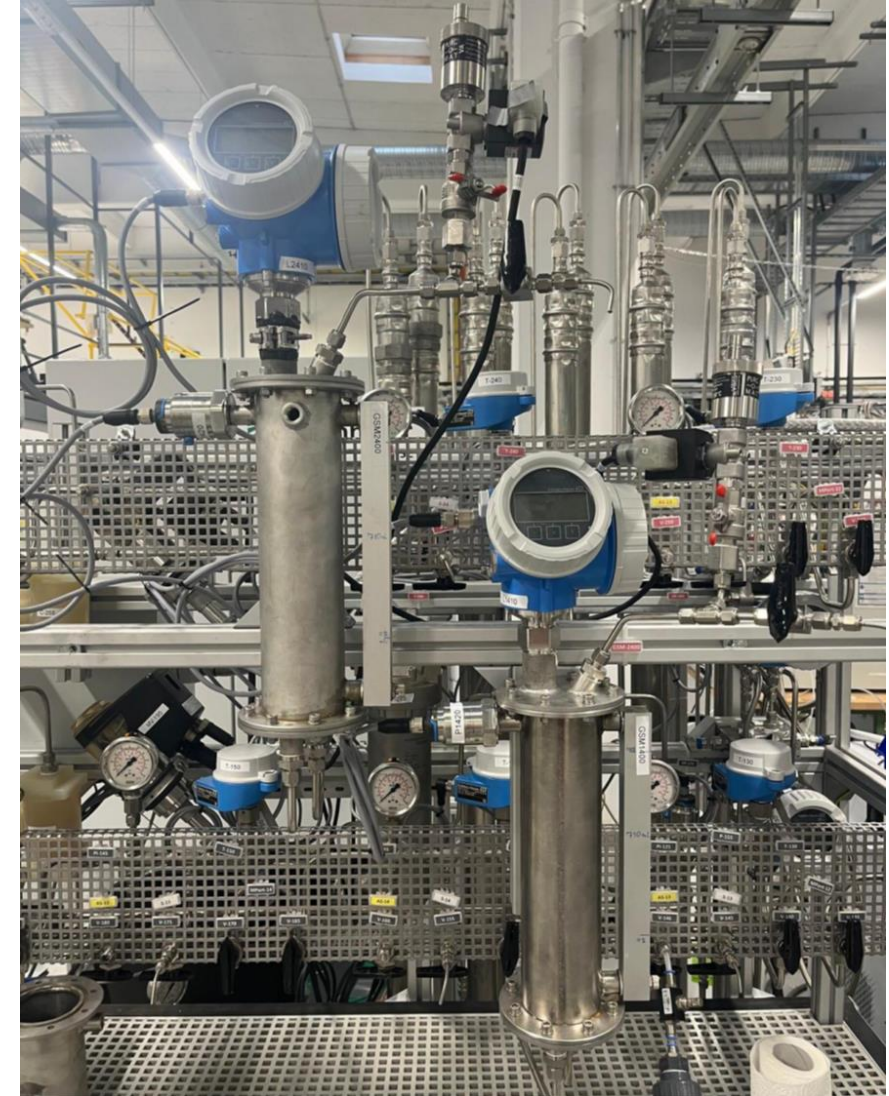
Isolierte Verweilstrecke zur Darstellung reaktiver Prozesse im System (mineralische Ausfällungen, Entgasung)





# Hardware Zwilling

## Aufbau und Funktionsweise



Gasfallen mit Radarsonde und Sichtglas zur Füllstandskontrolle sowie magnetischen Auslassventilen zur automatisierten Messung der Gaszusammensetzung



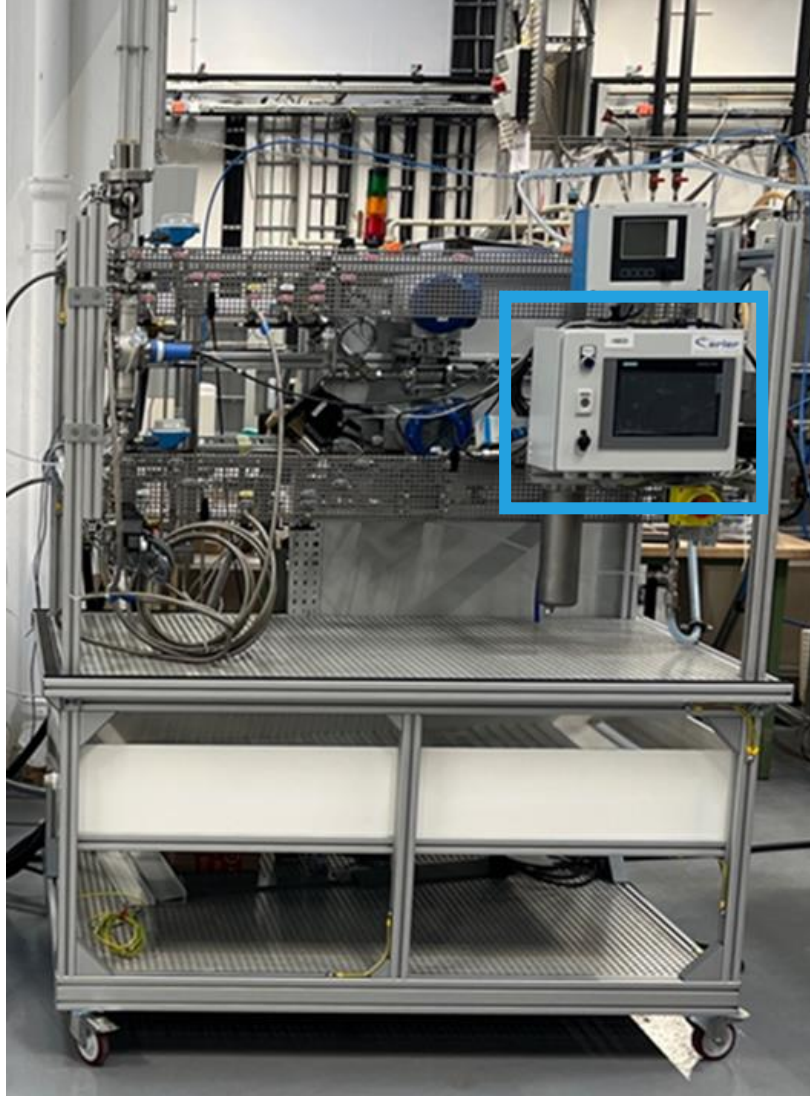


# Hardware Zwilling

## Aufbau und Funktionsweise

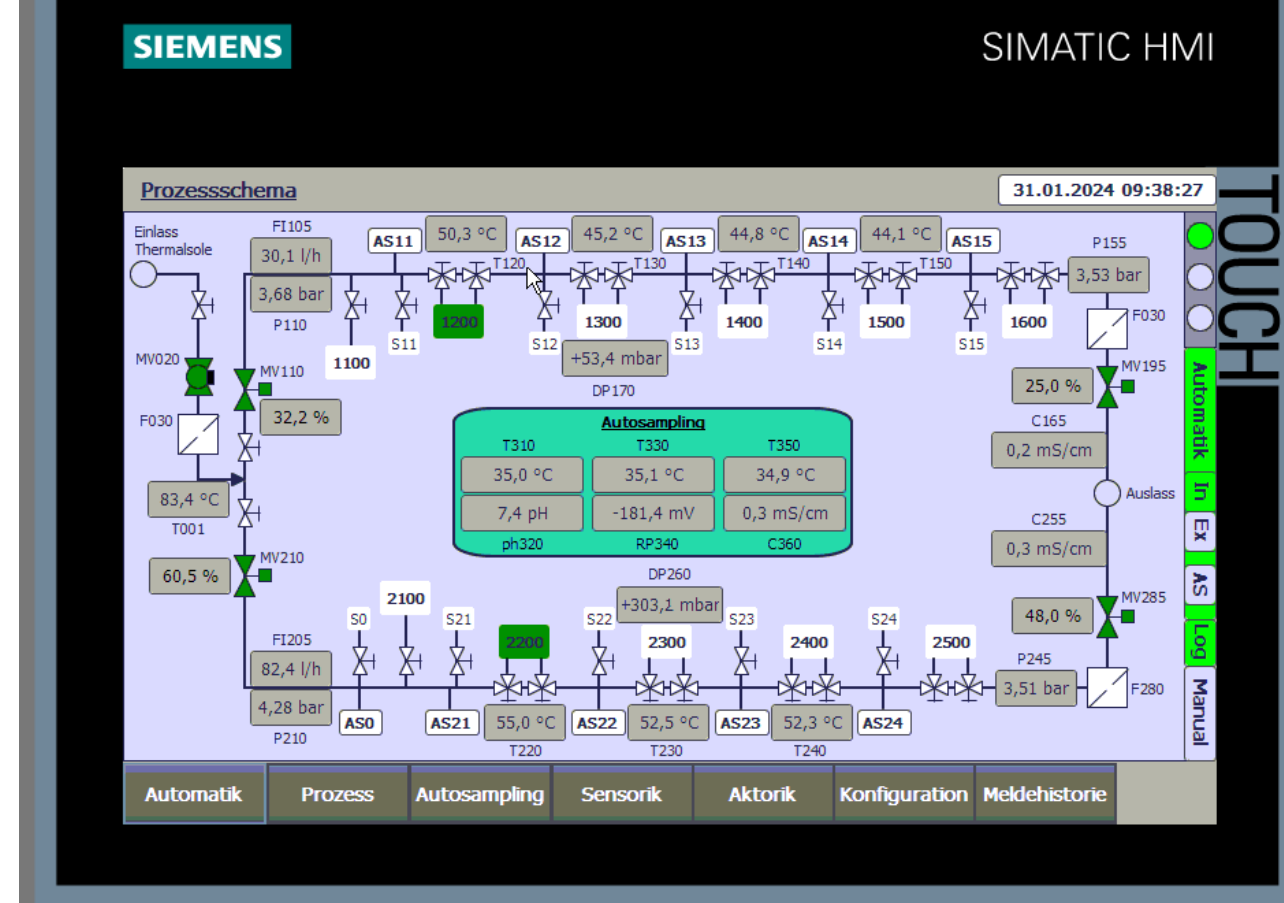


Filterkerzeneinsatz mit Halterung für Korrosionscoupons,  
welche von Hydroisotop analysiert werden



# Hardware Zwilling

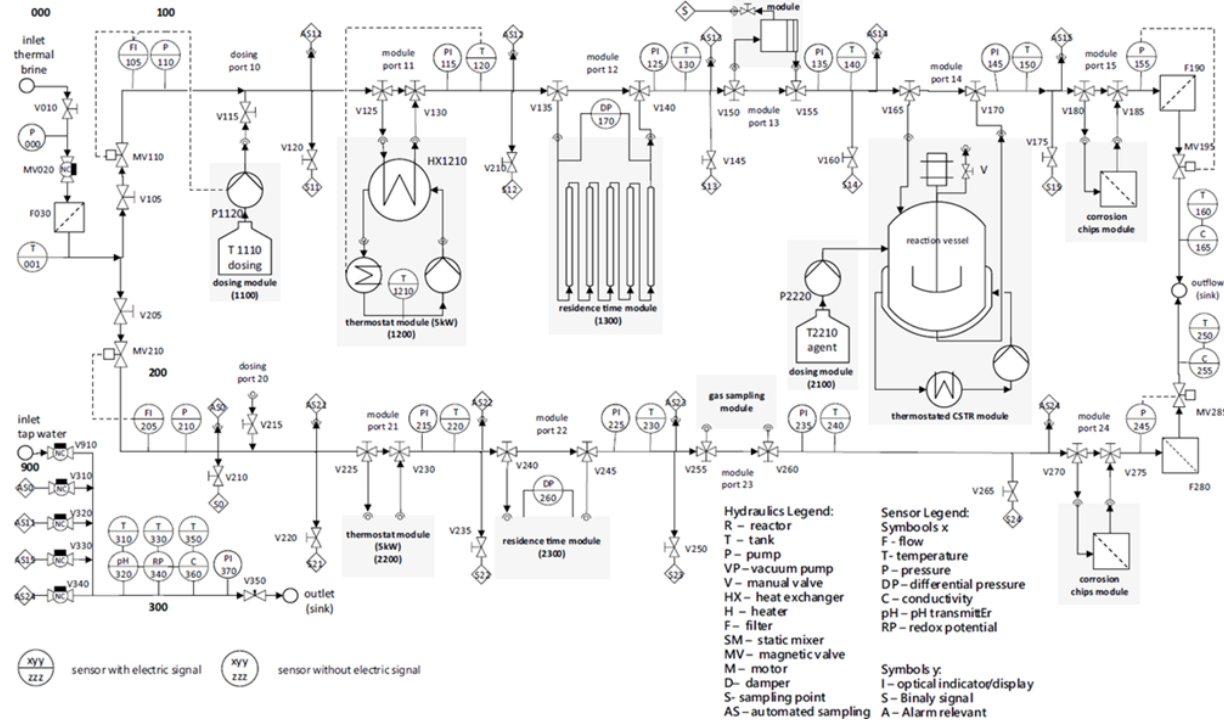
## Aufbau und Funktionsweise



Siemens SPS als Herzstück der Anlage mit Visualisierung der Sensoren und Aktoren via Siemens SIMATIC HMI

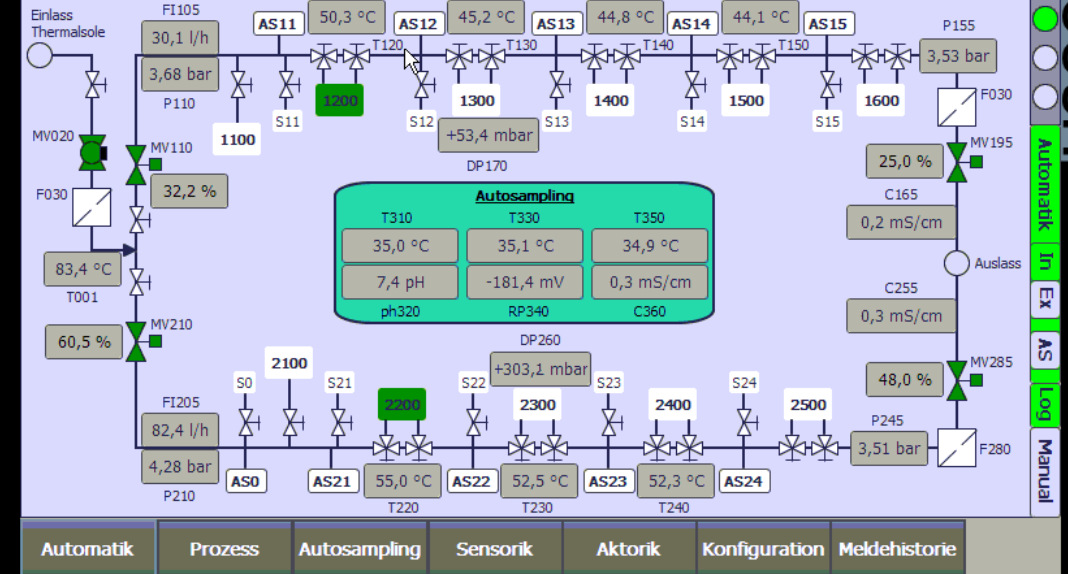
# Digitale Zwillinge





## Prozessschema

31.01.2024 09:38:27



# Digitaler Zwilling Cyber-physisches System

Digitales Abbild des Demonstrators zum Auslesen und Ansteuern aller Sensorik und Aktorik in Echtzeit implementiert durch Fraunhofer ISE und Geosaic

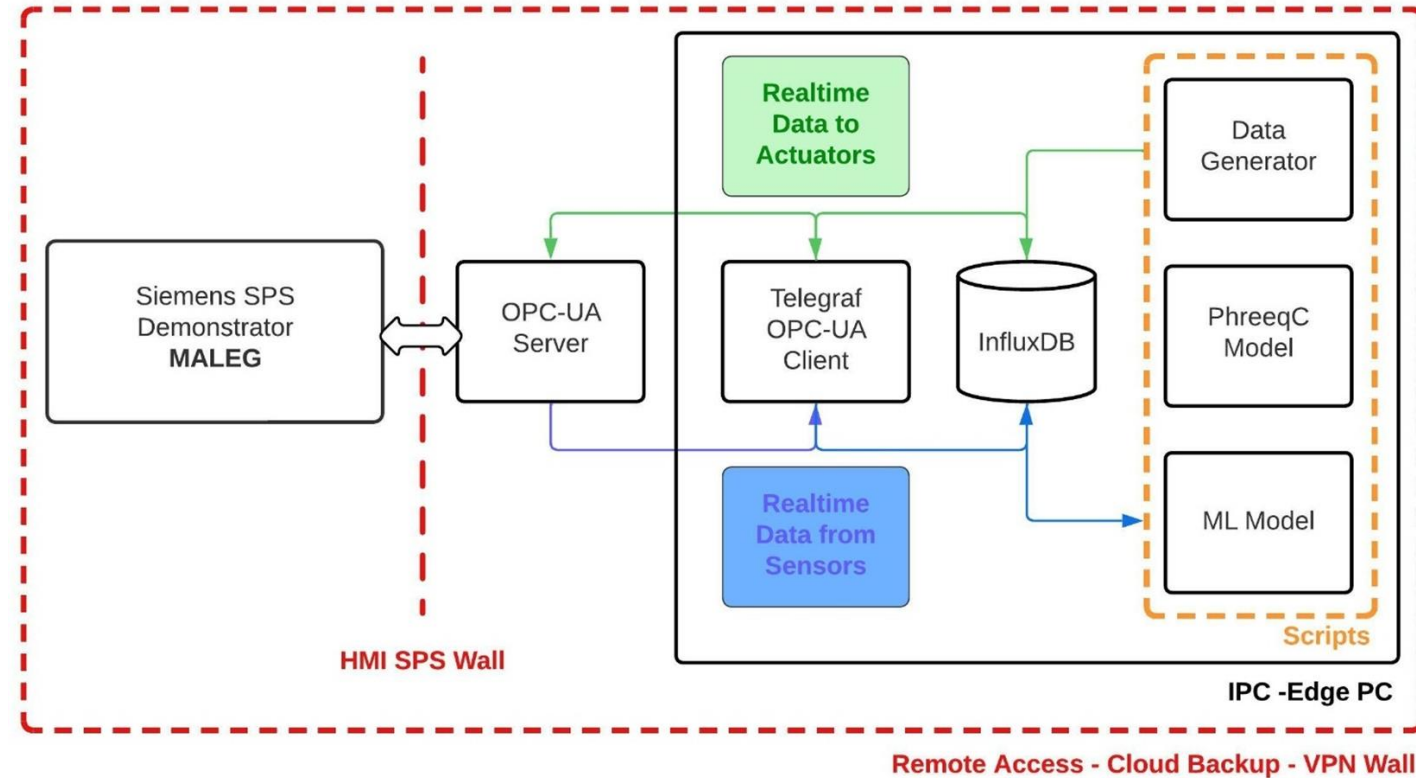
# Digitaler Zwilling

## Prozesssimulation

Monitoring, Speichern der Betriebsparameter auf dem Rechner und der Cloud für die Echtzeit-Prozesssimulation

- Temperatur
- Druck
- Durchflussrate
- pH – Wert
- Redoxpotential
- Leitfähigkeit

➔ **gezielte Datenerhebung zur Berechnung des Fluidchemismus**



Implementierung durch Geosaic

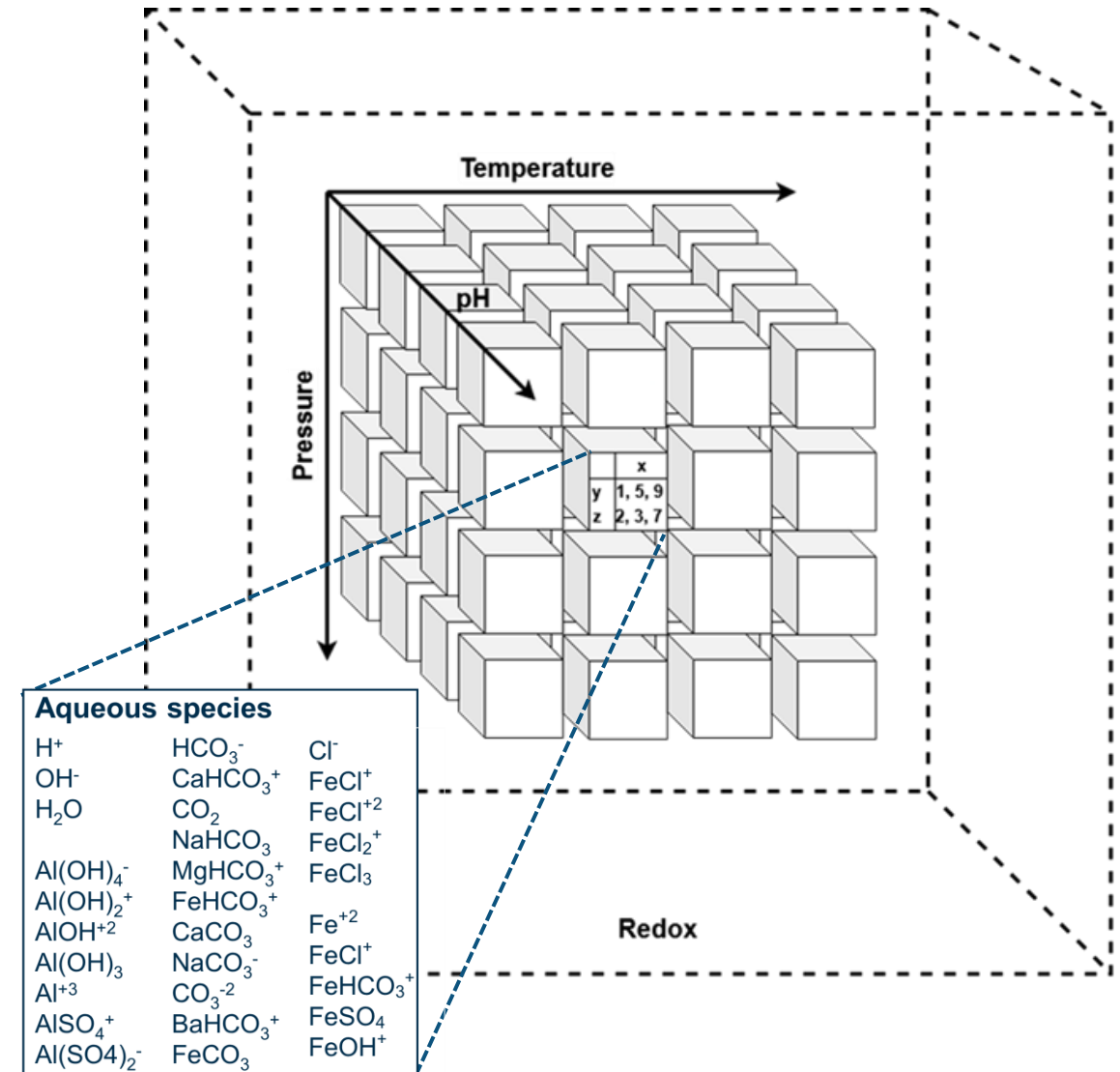
# Digitaler Zwilling

## Prozesssimulation

### Aufbau eines konsistenten, standort-spezifischen, hydrogeochemischen Datensatzes

- Systemparameter (Druck, Temp., pH, Redox)
- Entgasungsdruck
- Gaszusammensetzung
- Gelöste aquatische Spezies
- Sättigungsindices der gelösten Phasen

➔ **Kopplung von Betriebsparametern mit Fluidchemismus**





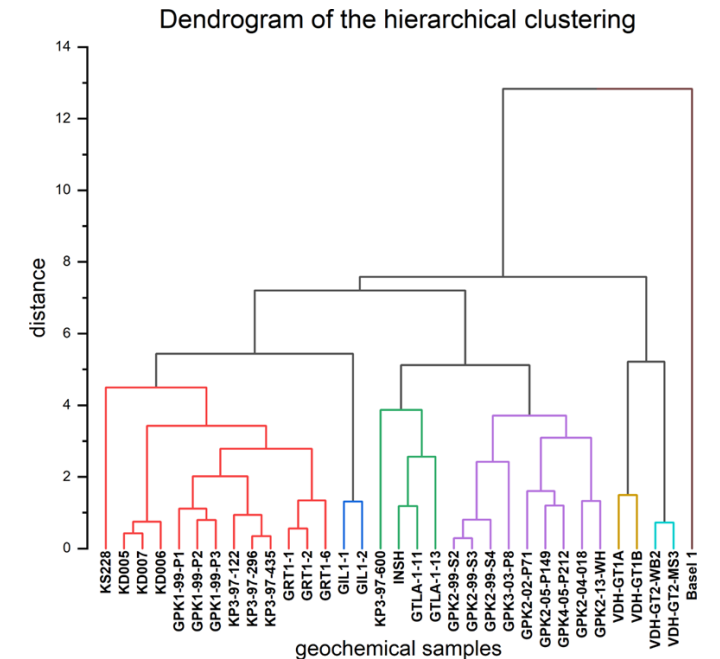
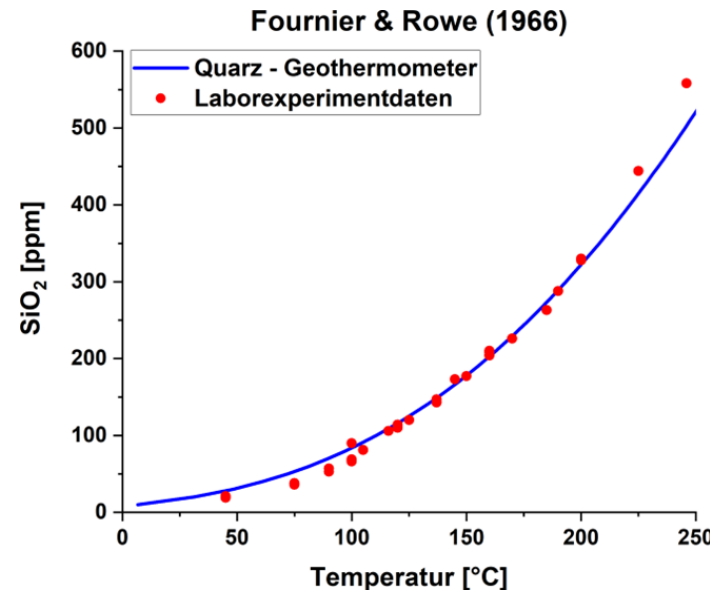
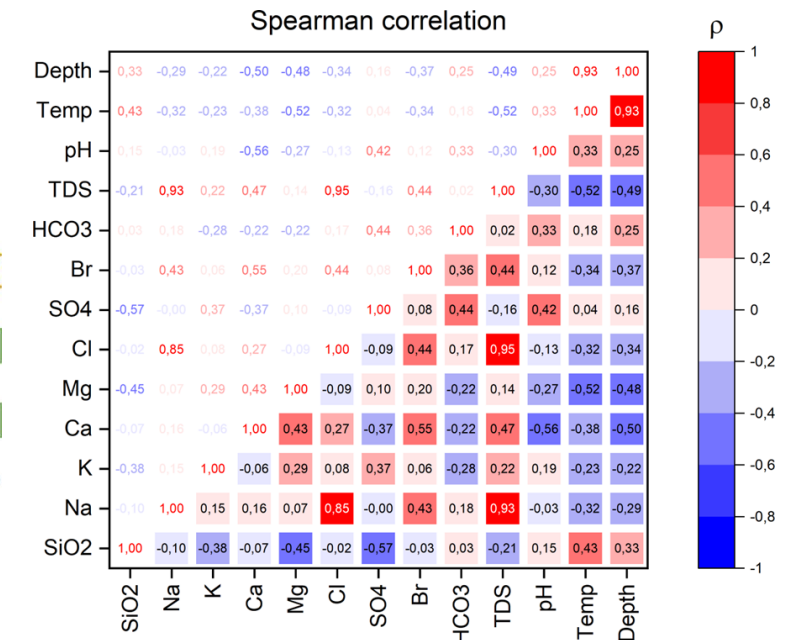
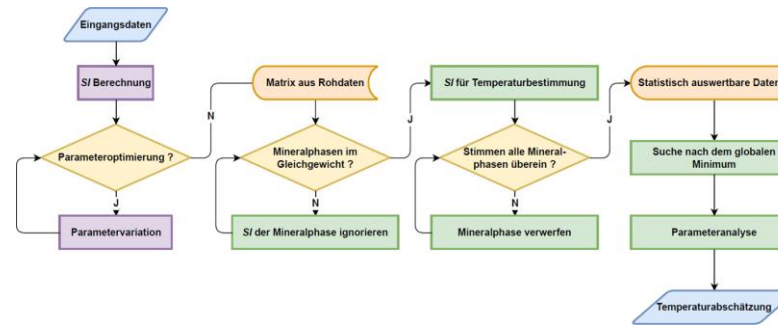
# Künstliche Intelligenz

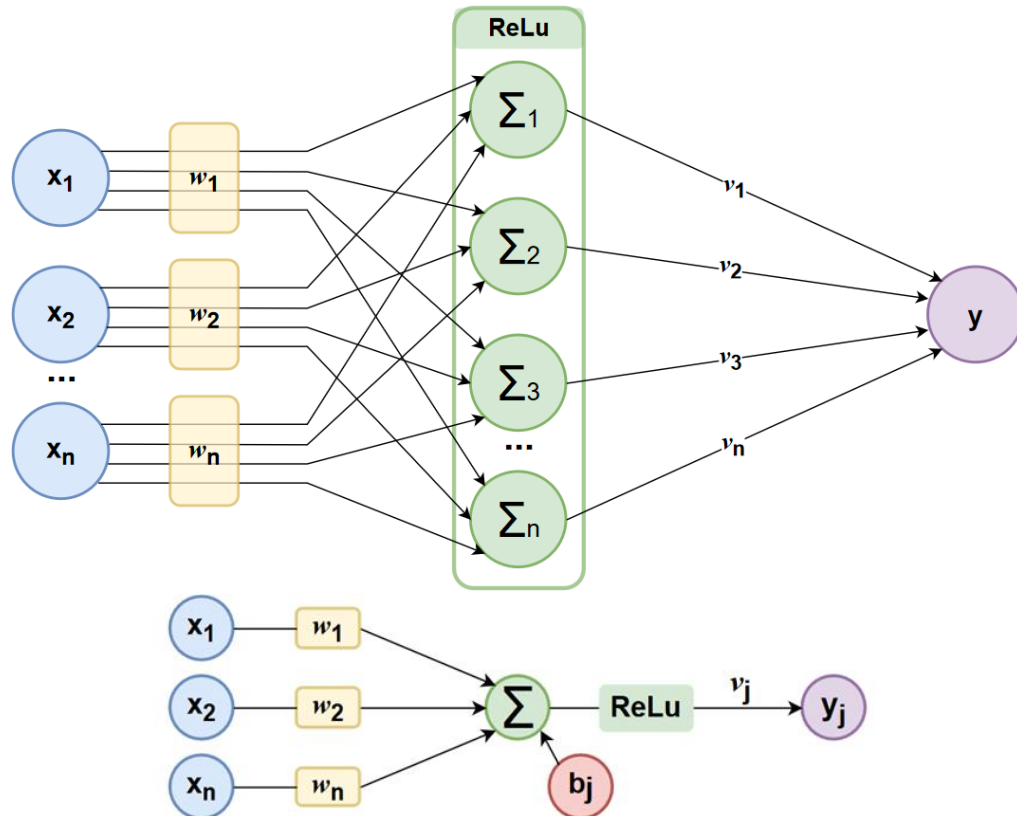
# Künstliche Intelligenz Methoden

## Nutzung unterschiedlicher Methoden zur Bearbeitung spezifischer Aufgaben

- Regressionen
- Entscheidungsbäume
- Mustererkennung
- Künstliche neuronale Netze
- Support Vector Maschinen
- ...

Basierend auf automatisierten statistischen Verfahren und speziell angepassten Algorithmen



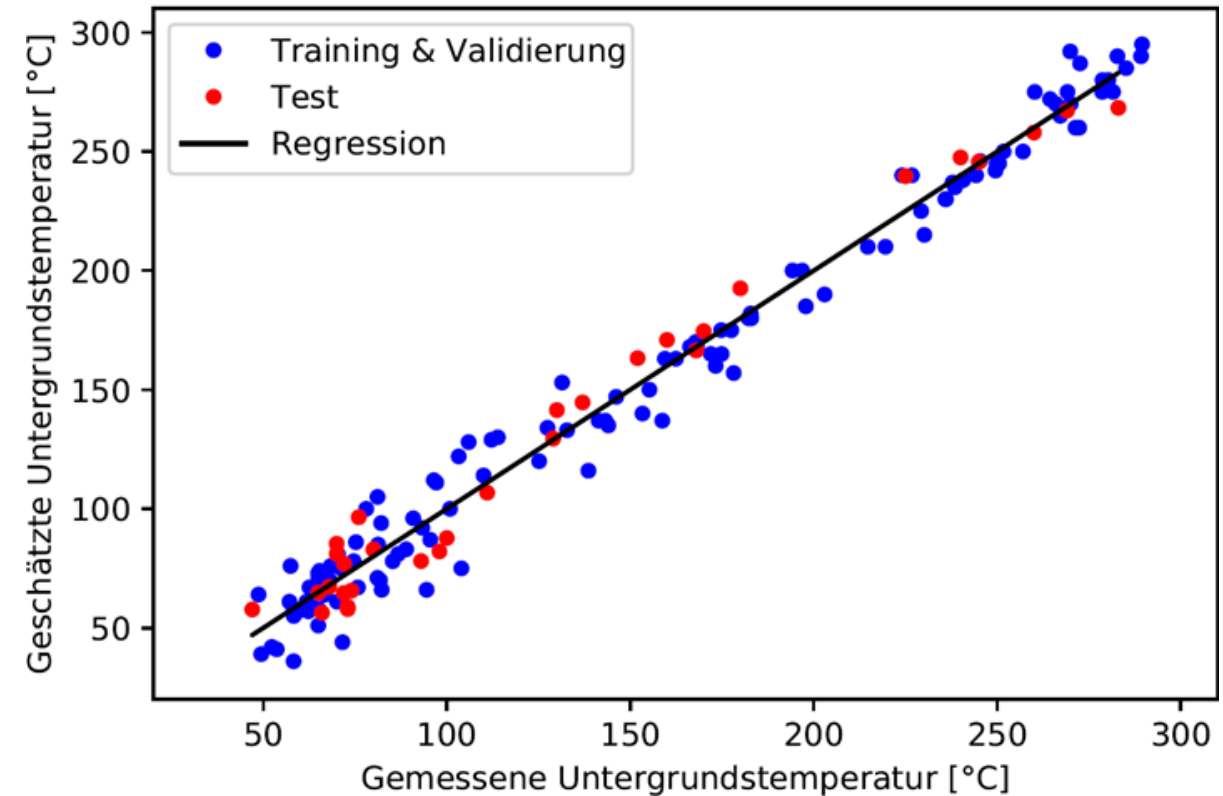


1. Vorwärtspropagation | Mittlerer quadratischer Fehler (MSE)

2. Fehlrückführung | Gradientenabstiegsverfahren

# Künstliche Intelligenz Entwicklung

Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,978$



- 1) Neuronales Löslichkeitsgeothermometer 'AnnRG' (Ystroem et al., 2023)
- 2) Lithiumkonzentrationen in geothermalen Fluiden in Chile (Barrera, 2024)
- 3) Multi-Output von Spurenelementkonzentrationen aus geothermalen Fluiden (Seimetz, 2024)



# Künstliche Intelligenz

## Stand des Projektes

Erhebung von zwei kompletten, konsistenten Datensätzen

### 1. Haag am Hausruck:

Temperaturempfindlicher, mikrobieller Film von unbekannten Sulfatreduzierern ( $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HS}^-$ )

**Korrosion & biogenes Clogging**



### 2. Unterschleißheim:

Temperatur-, druck- und fließratenabhängige Entgasung (Gasvolumen, Gaszusammensetzung)

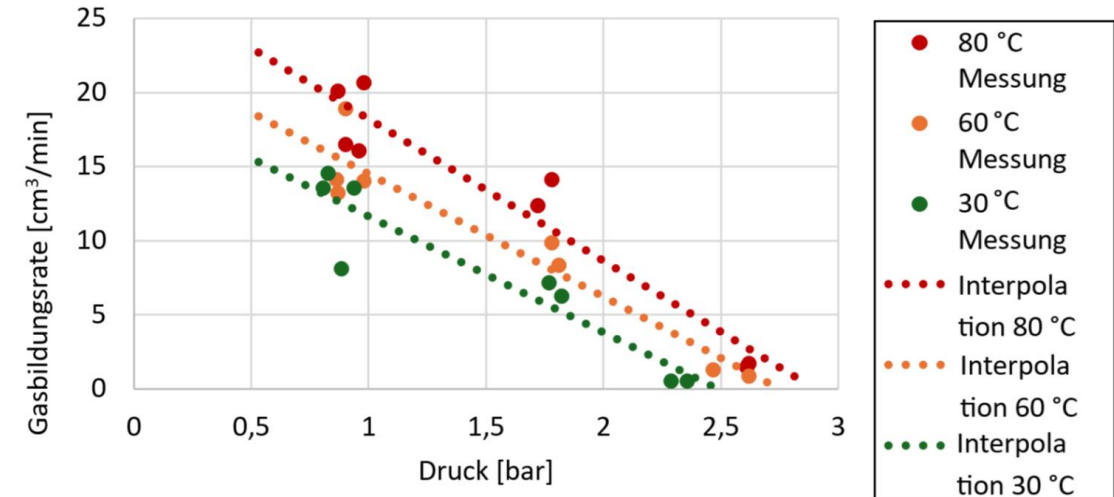
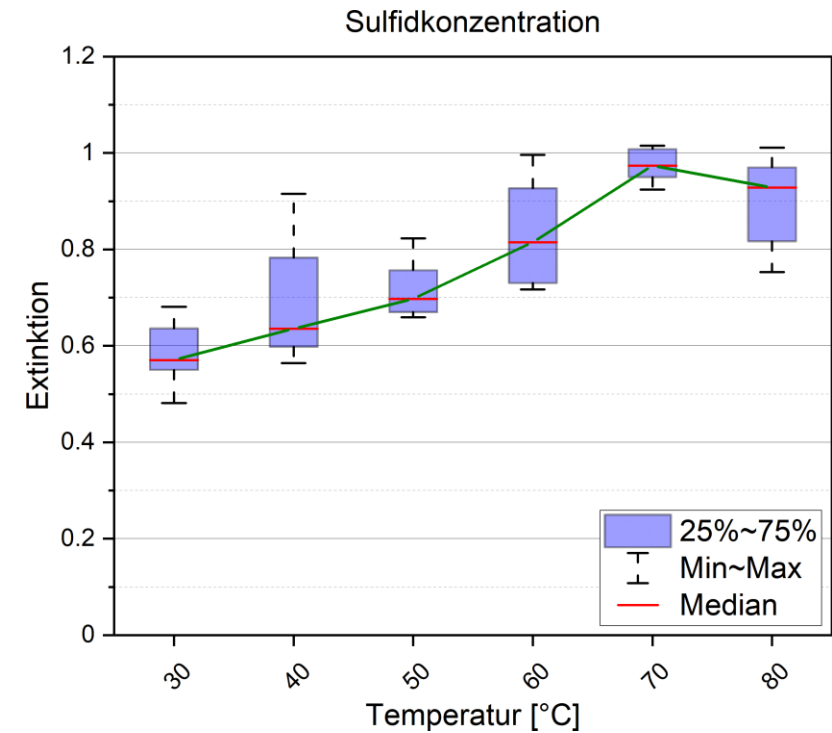
**Bubblingpoint**



### 3. Gülpinar: (geplant für Q1 2026)

Mineralische Ausfällungen durch  $\text{CO}_2$ -Entgasung bei Druckentlastung (gezielte Zugabe von Inhibitoren?)

**Scaling**



## Schritt 1



### Automatisierung

- Messen von Systemparametern
- Probennahme (Fluid, Gase)
- Analysieren

## Schritt 2



### Digitalisierung

- Einbinden von Sensorik und Aktorik (cyber-physisches System)
- Geochemische Modellierung des Fluids (Prozesssimulation)

## Schritt 3



### Datenerhebung

- Standortspezifische, problemabhängige Experimentreihen (Demonstrator)
- Redundantes Speichern der Betriebsparameter (PC, Cloud)

## Schritt 4



### Künstliche Intelligenz

- Auswahl datenspezifischer Methodik
- Erstellen und Trainieren entsprechender Modelle
- Auswertung und Interpretation der erhobenen Daten

