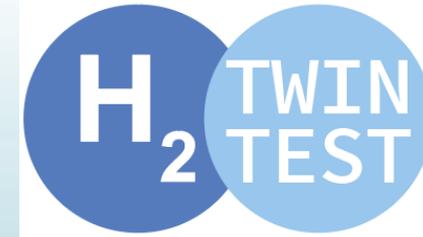




H2TwinTest



Multifunktionsprüfstände für
Wasserstoffanwendungen mit digitalem Zwilling

H2-Kolloquium Baden-Württemberg | 04.–05. Juni 2024, Baden-Baden

H2TwinTest



- 1 Gliederung
- 2 Projektsteckbrief / Projektziele / Projektarchitektur
- 3 Wasserstoffmotor-Prüfstand
- 4 Brennstoffzellen-Prüfstand
 - 4.1 Prüfstand
 - 4.2 Digitaler Zwilling
 - 4.3 Validierung Prüfstand - Simulationsmodell
- 5 Schadgasanlage / Elektrische Impedanzspektroskopie
- 6 Zusammenfassung und Ausblick

H2TwinTest



Projekttitel:	H2TwinTest
Förderkennzeichen:	BWZWH222124/BWZWH222125
Projektbeginn:	01.01.2022
Projektende:	31.07.2024
Projektpartner:	IAVF Antriebstechnik GmbH, Karlsruhe Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT, Pfinztal

Die Projektpartner bedanken sich beim Land Baden-Württemberg für die Förderung dieses Projektes.



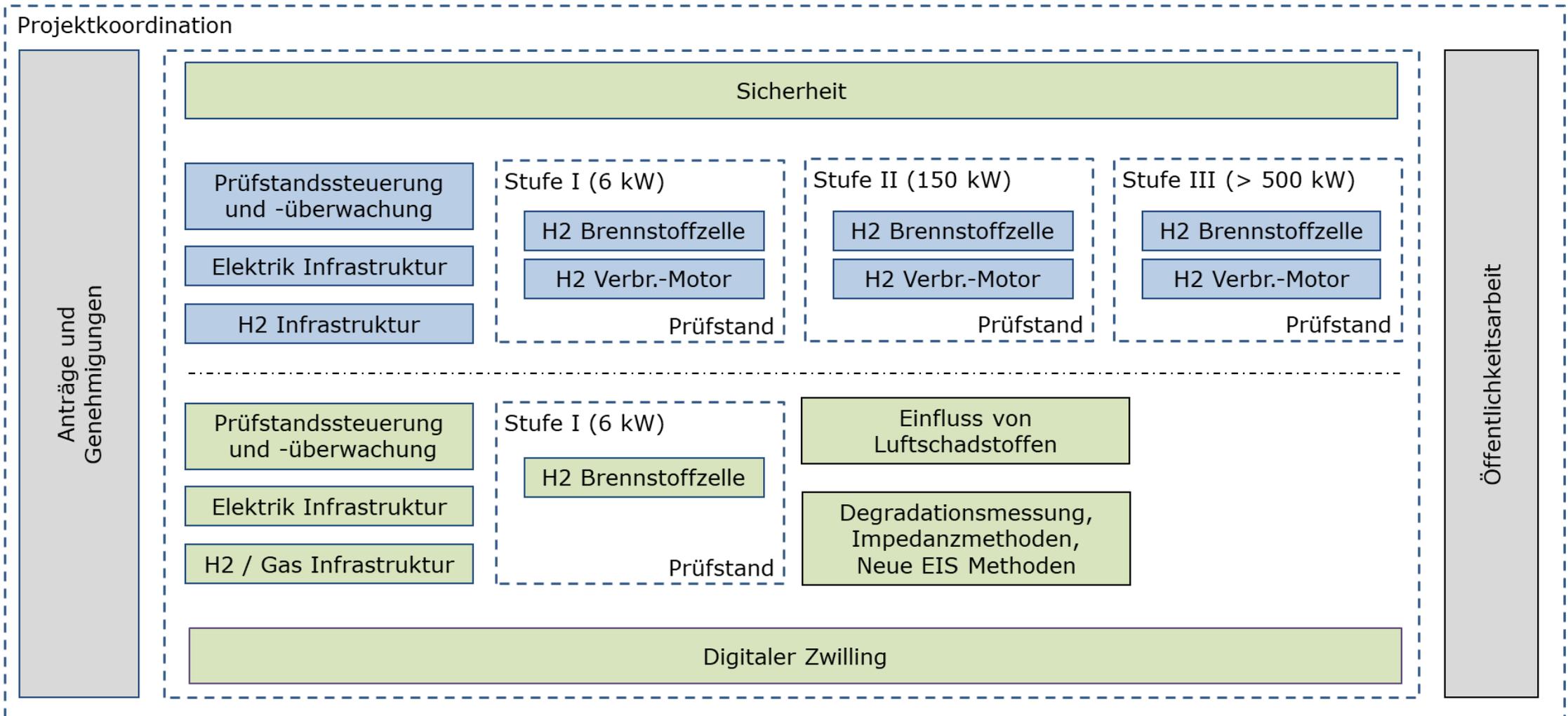
Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

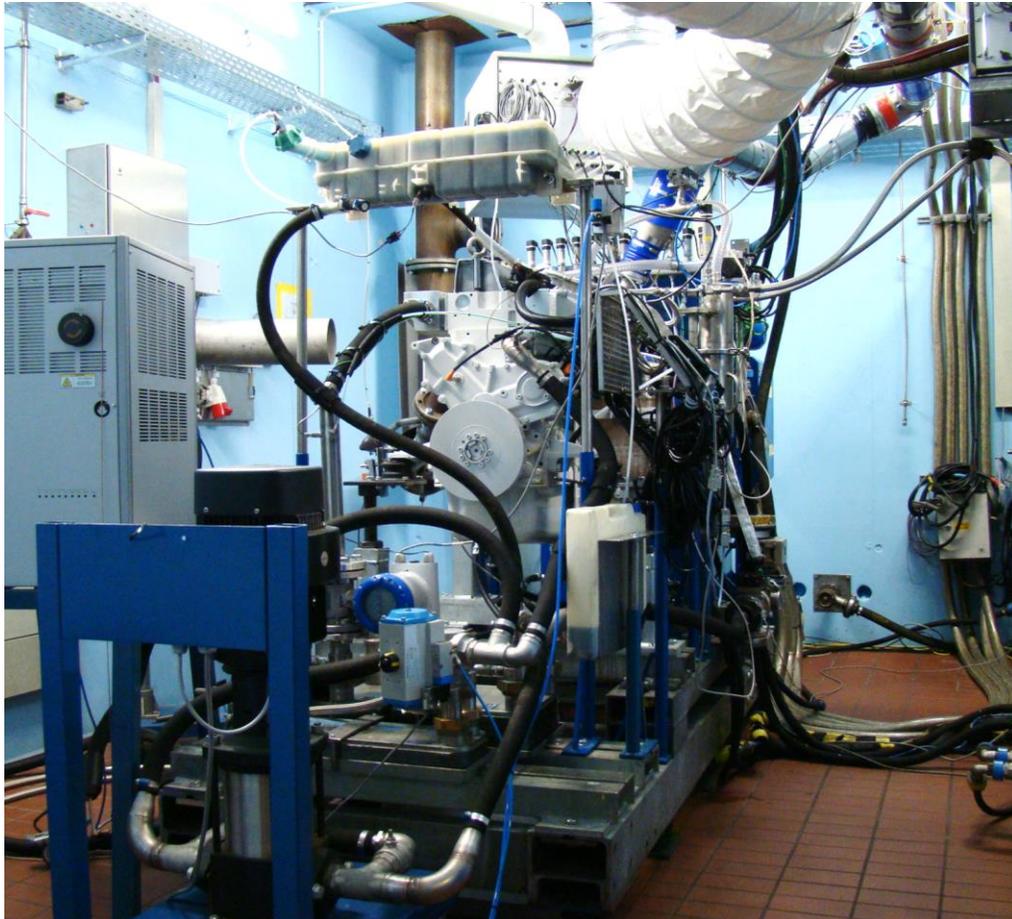
Ziele:

1. **Multifunktionsprüfstände** für komplette Antriebssysteme höherer Leistungsklassen
2. **Digitaler Zwilling** des Prüfstands für zeit- und kostensparende Simulationen
3. Neue Erkenntnisse zur **Brennstoffzellenalterung** durch Luftschadstoffe
4. Neue **Messmethoden** zur Untersuchung von **Degradationsprozessen**
5. **Sicherheitskonzepte** für Wasserstoffanwendungen mit größerer Leistung

H2TwinTest



H2TwinTest



Mamotec 7,4 l 6 Zylinder Blockheizkraftwerk Motor

- 85 kW bei 1500 1/min (~ 105 kW bei 2000 1/min)
- Aufladung
- Offenes Steuergerät, Support vom Hersteller
- Ersatzteil Support vom Hersteller
- Ölmenge 30 l (SAE 40)
- Ansaugluftkonditionierung
- Erdgasbetrieb im August 2023
- Wasserstoffbetrieb seit Oktober 2023

H2TwinTest



H2-Motor Untersuchungsziele

Wasserstoffverbrennung

- Verbrennung, Applikation
- Vorentflammung, Klopfen,
- Emissionen

Funktion / Dauerhaltbarkeit

- H2-Injektoren / Ventile
- Zündkerzen
- Sensoren

Verschleiß

- Kolbenringe / Zylinderlaufbahn OT-Bereich
- Ventile / Ventilsitzringe
- Pleuellager



Materialverträglichkeit /-beständigkeit

- Korrosion
- Versprödung von Metallen
- Aufquellen von Polymeren

Öleigenschaften

- Wassergehalt
- Korrosion
- Viskosität

Betriebsicherheit

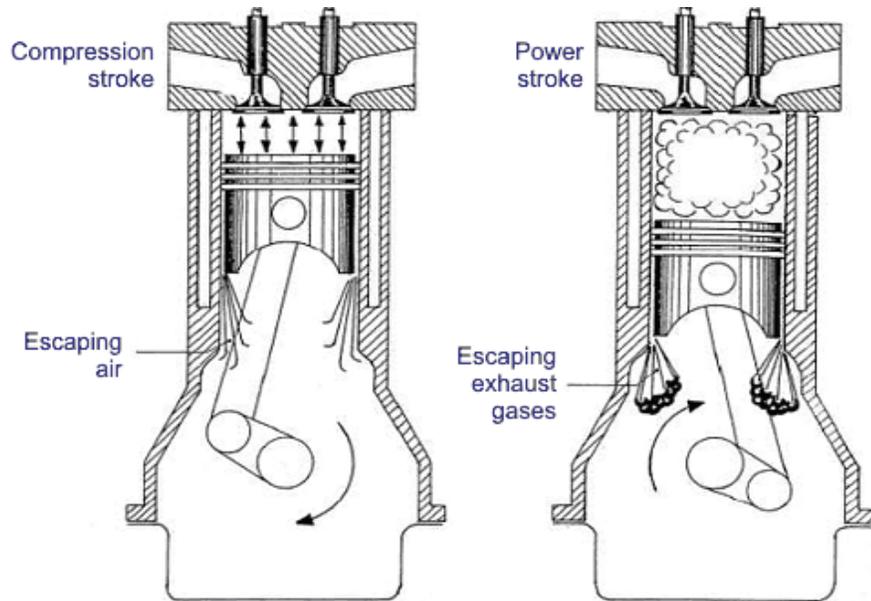
- Zündaussetzer
- Blow-by im Kurbelgehäuse

H2TwinTest



Vergleich H2 Massenspektrometer und H2 Sensor in der Kurbelgehäuseentlüftung (KGHE)

Drehzahl = 1500 1/min | Last = 100 % | Schwerpunktlage = 20 °KW n. ZOT
 Lambda = 1,55 | Öltemperatur = 120 °C | Kühlwassertemperatur 100 °C



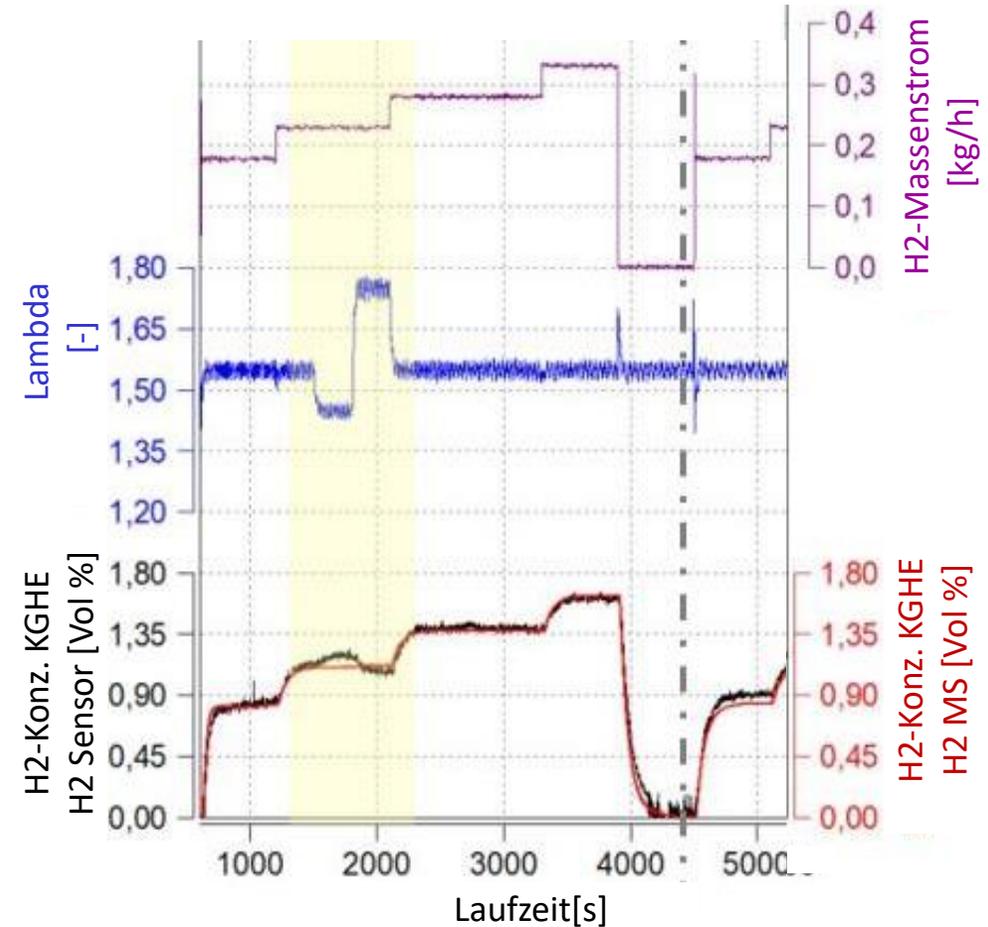
Quelle:
<https://dieselnet.com>



Quelle:
<https://www.vandf.com>



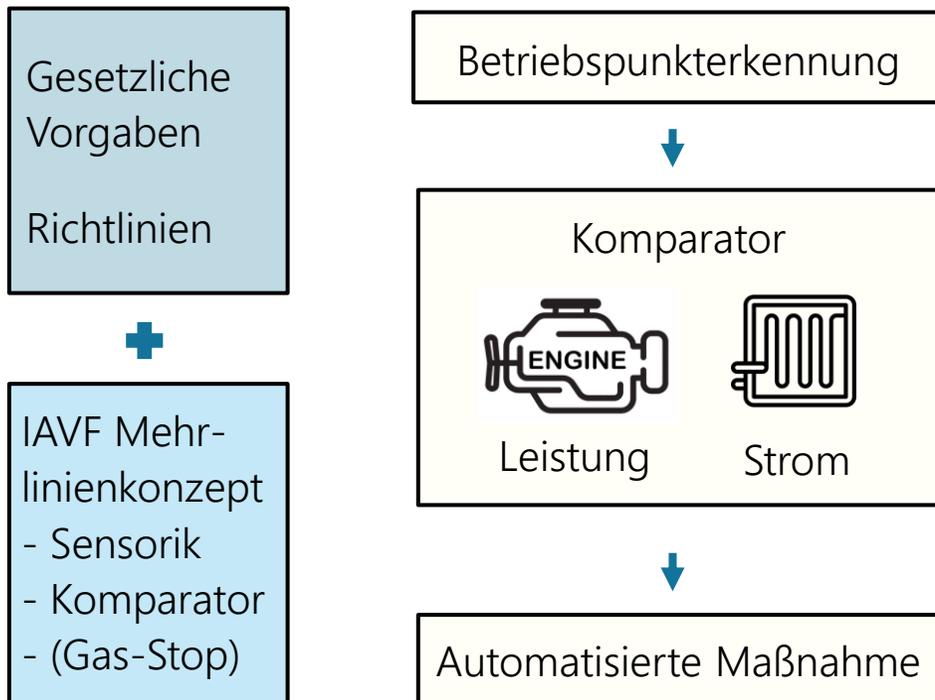
Quelle:
<https://www.neohysens.de>



H2TwinTest



Komparator (Prinzip)



H2-Motor:

Leistungsdifferenz aus erwarteter Leistung P_{erw} und tatsächlicher Leistung P_{tats}

$$BP_{i0} (n_{i0}, L_{i0}, T_{i0}, p_{i0}, \dots) \rightarrow P_{i0} \rightarrow \eta_{i0}$$

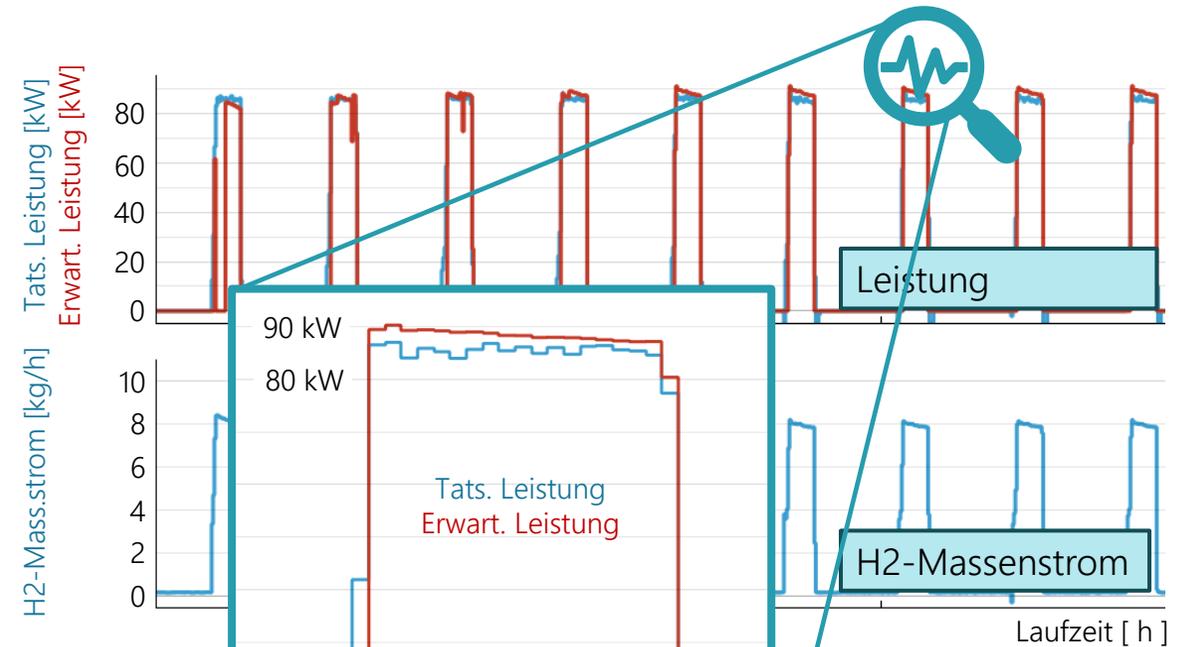
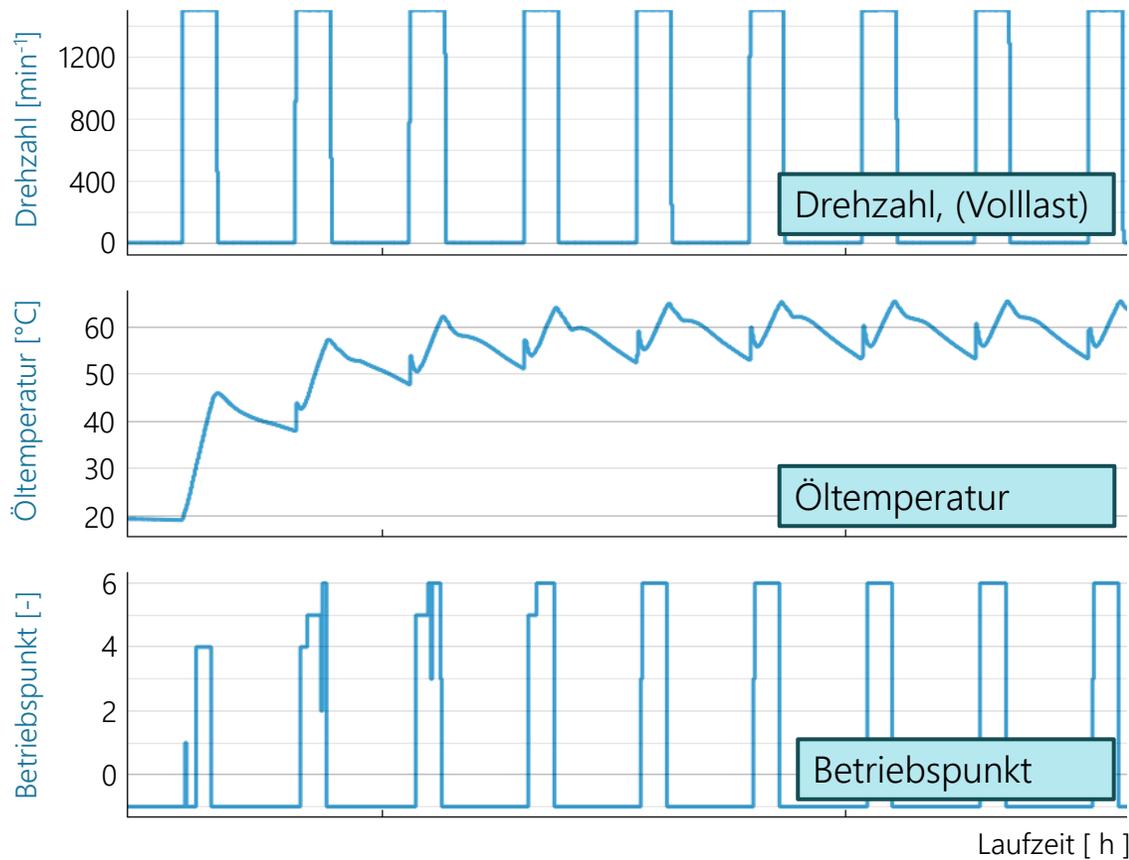
$$BP_{in} (n_{in}, \dot{m}H_{2,in}, \dot{m}L_{in}, T_{in}, p_{in}, \dots) \rightarrow P_{theor,in} \times \eta_{i0} \rightarrow P_{erw,in}$$

$$P_{erw,in} \leftrightarrow P_{tats,in}$$

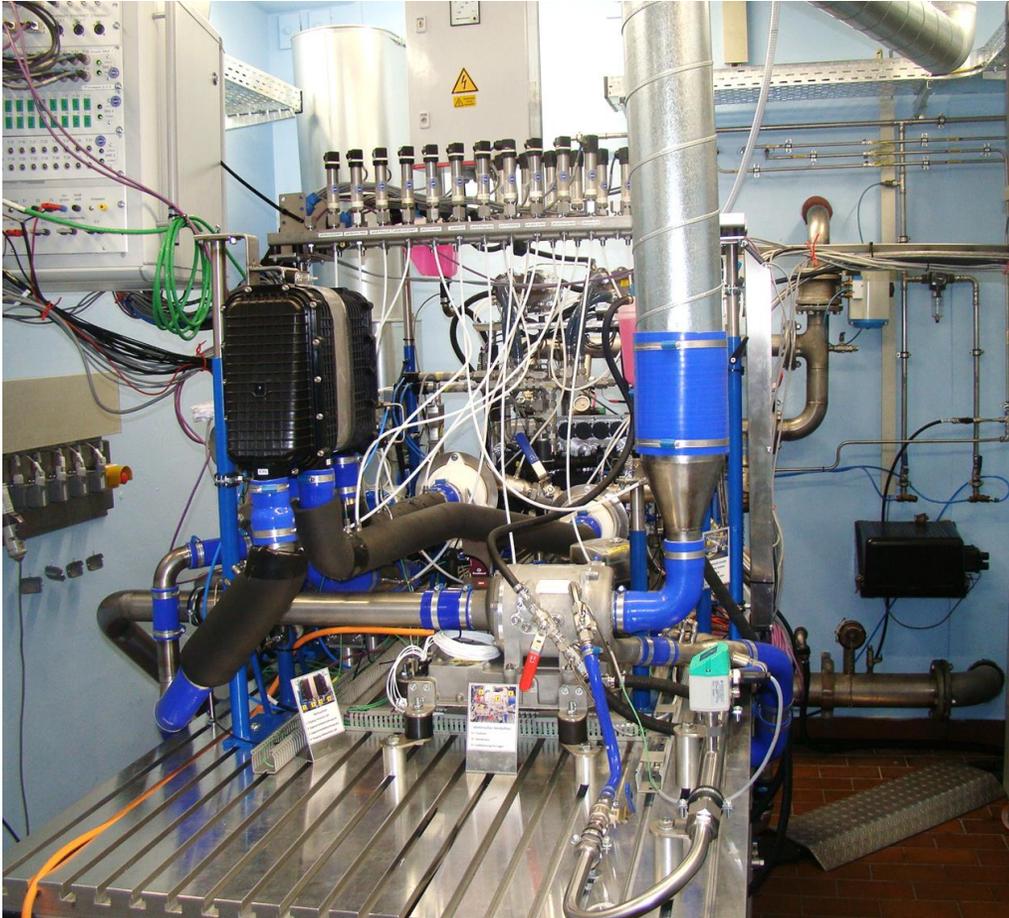
Auslösen einer automatisierten Maßnahme abhängig von:
Toleranzen von Betriebsparametern, Güte η_{i0} , Wahl der zulässigen Leistungsdifferenz, Wahl der tolerierbaren Zeitdauer einer Leistungsdifferenz

H2TwinTest H₂ TWIN TEST

Komparator (Beispiel: Hochlauf Start-Stopp-Zyklus)



H2TwinTest

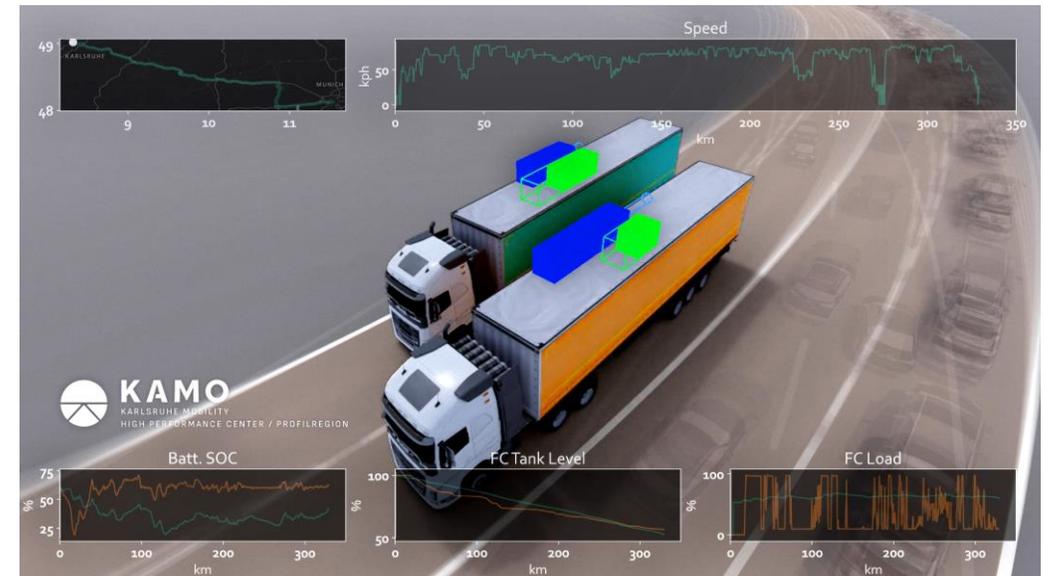
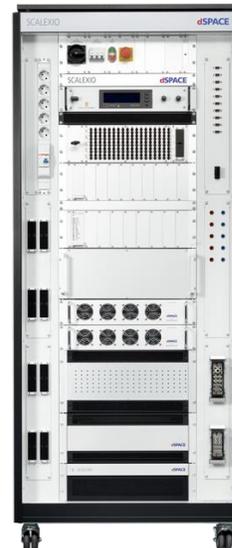
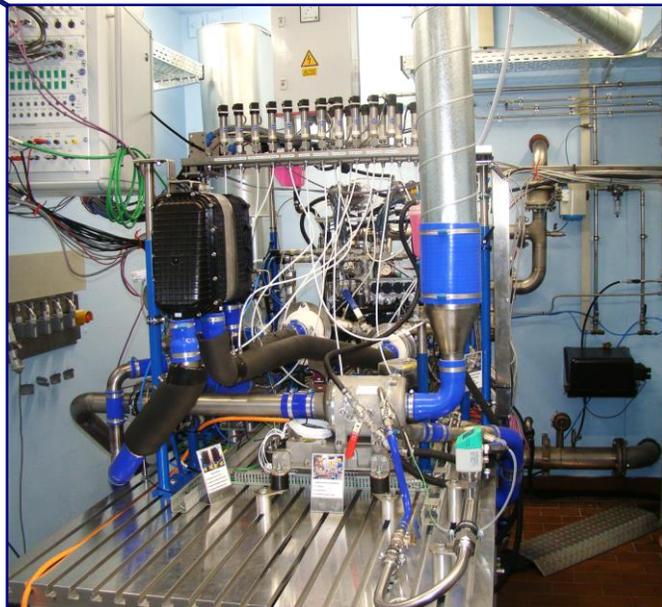
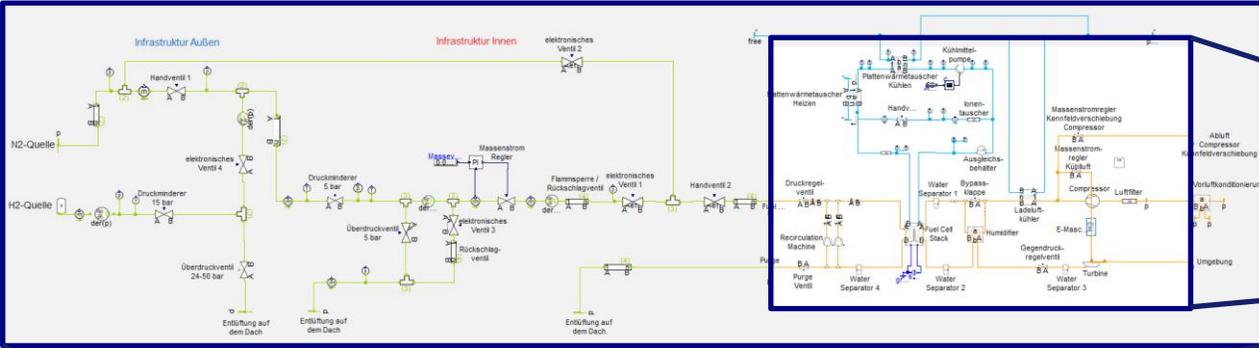
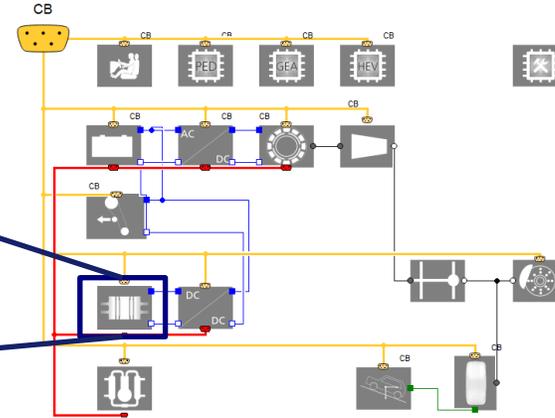


122 kW (@ 570 A) Brennstoffzelle

- Flexibler Prüfstands Aufbau
- Kathodenpfad: Führungsgrößen Massenstrom, Druck, Temperatur und Feuchte unabhängig voneinander regelbar
- Anodenpfad: Dead-End-Betrieb mit regelbarem Rezirkulationsgebläse und Wasserabscheidung, Anodendruckregelung
- Strompfad: DC-Senke für Ströme bis 700 A
- Kühlmittelkonditionierung mit Ionentauscher und regelbarer Pumpe
- Integration sämtlicher Steuer- und Regelfunktionen sowie der Messdatenerfassung in der IAVF Prüfstandsautomatisierung

* Electical turbocharger as published in: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-764383>

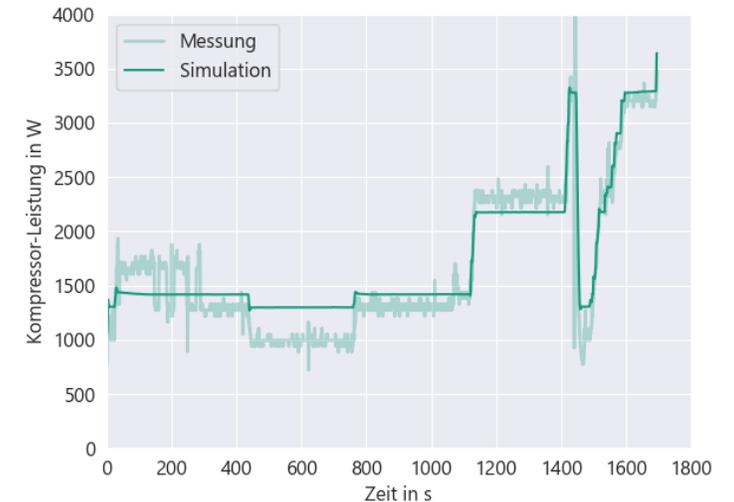
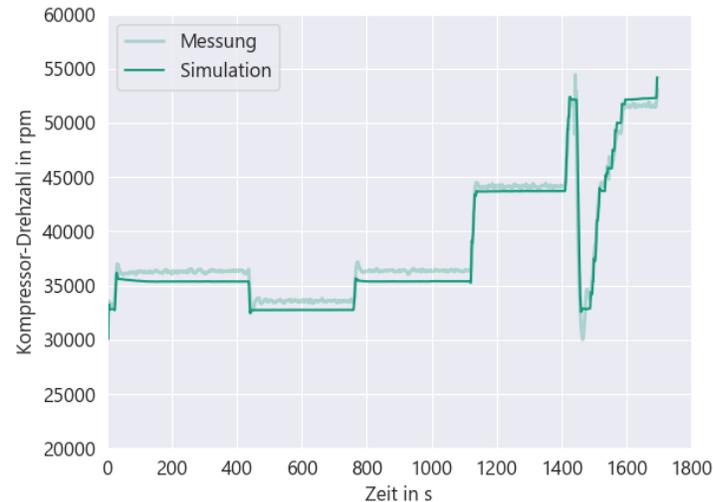
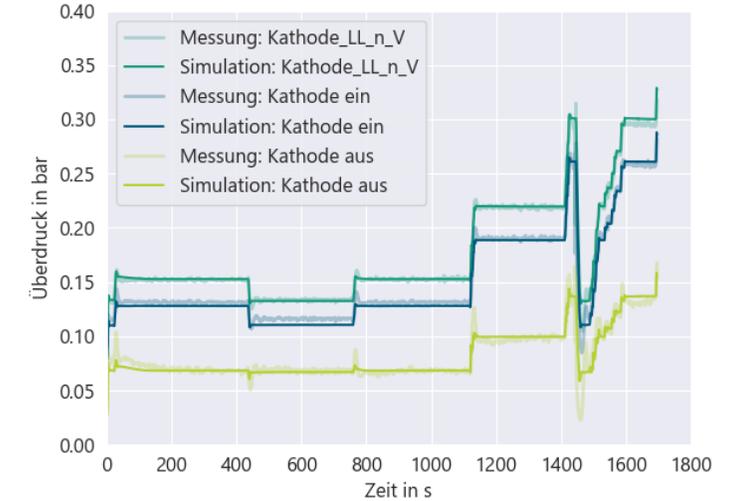
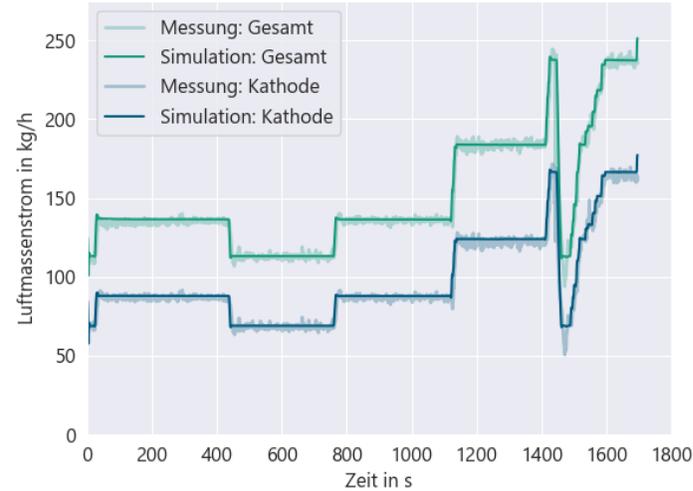
H2TwinTest



H2TwinTest



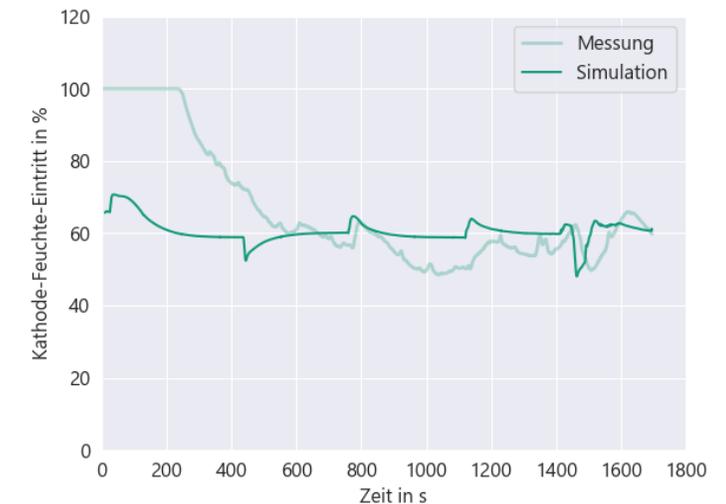
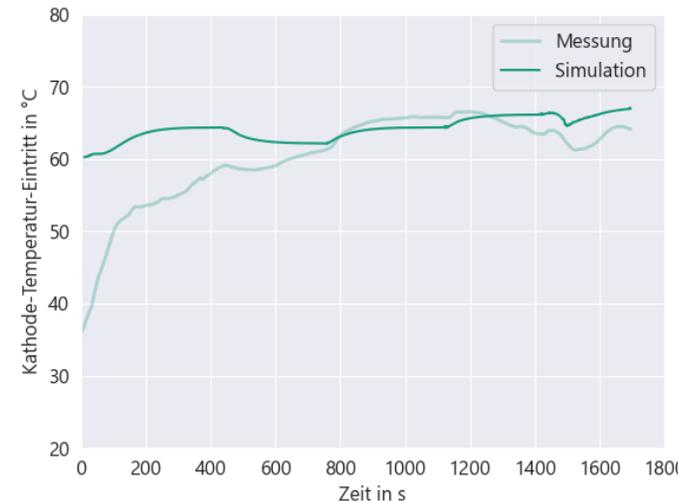
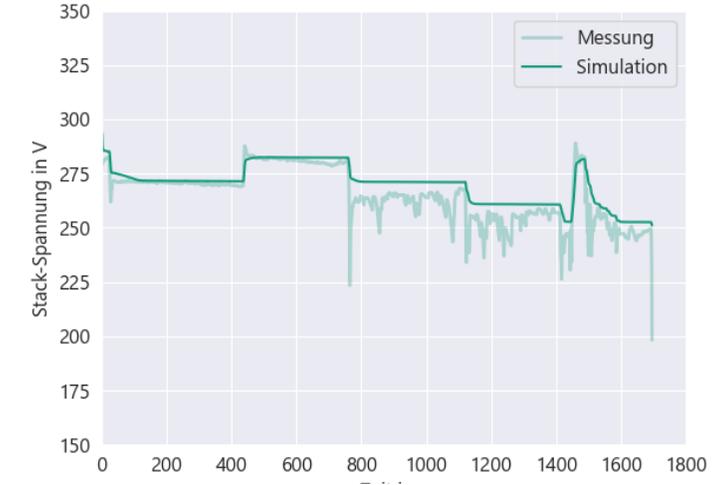
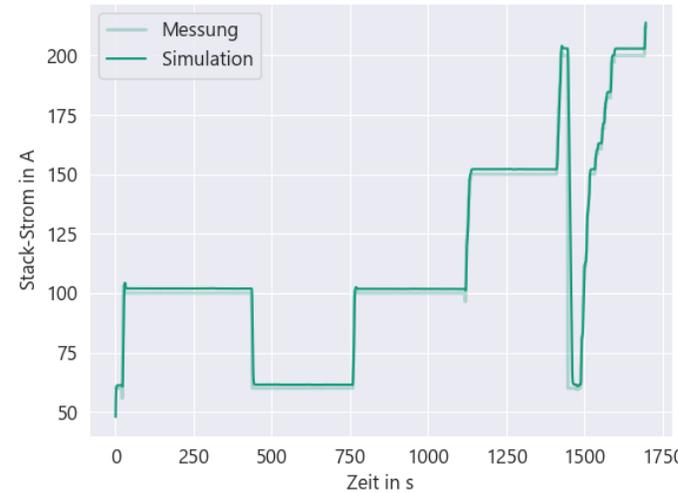
- Validierung des Kathodenpfades
- Massenströme und Druckniveaus werden sehr gut getroffen
- Druckniveaus und Überschwinger aufgrund von Lastsprüngen werden abgebildet
- Abgasturbine des Kathodenverdichters wird nicht durchströmt
 - Abweichungen bei der Simulation der Reibleistung



H2TwinTest



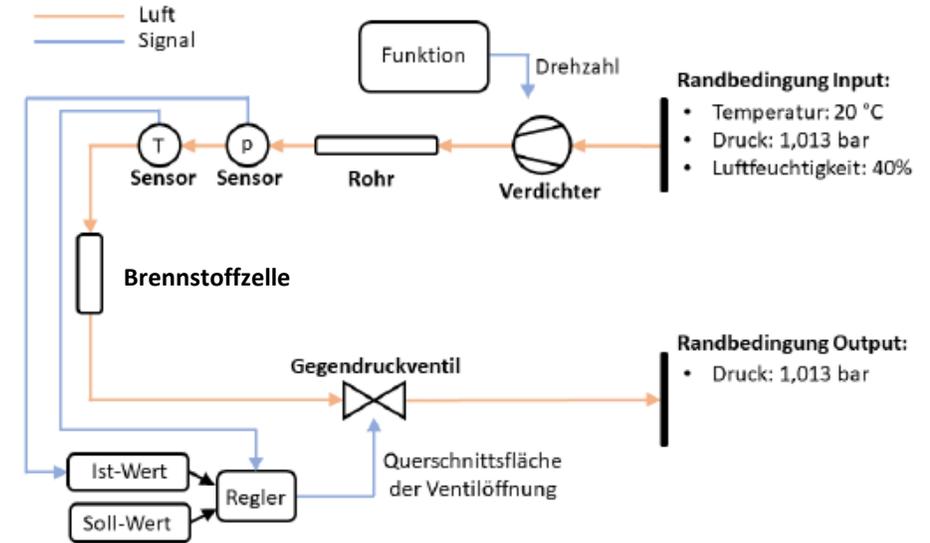
- Validierung der Brennstoffzelle
- Stackspannung:
 - Grundniveau wird gut getroffen
 - Dynamische Abweichungen aufgrund der Anodendruck- und Drainregelung
- Prüfstand:
 - Überarbeitung der Regler
- Digitaler Zwilling:
 - Erhöhung der thermischen Trägheit
 - Unterstützung durch die Erprobung neuer Regelkonzepte



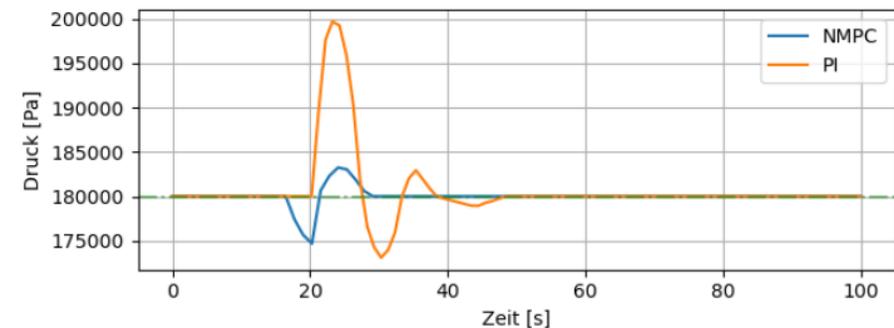
H2TwinTest



- Erprobung verschiedener Regelkonzepte
 - Nichtlineare modellprädiktive Regler (NMPC) ermöglichen ein Antizipieren von Zustandsänderungen
 - Druckschwankungen im Kathodenpfad können deutlich reduziert werden
-
- Erweiterung des Modells um eine Traktionsbatterie zur Optimierung des Fahrzeug-Energiemanagements
 - Verringerung des H₂-Verbrauchs und Zelldegradation



Vereinfachter Kathodenpfad zur Erprobung eines NMPC-Reglers



Schwankung des Kathodendrucks aufgrund eines Drehzahlsprungs des Kompressors

H2TwinTest



Gaslager

- Stickstoffmonoxid (NO)
- Flüssiggase müssen auf 50 °C aufgewärmt werden:
Ammoniak (NH₃), Schwefeldioxid (SO₂)



Rohrleitungen
mit Begleitheizung

Schadgasanlage

- Für die Zudosierung und Mischung der Schadgase in den Kathodeneinlass der Brennstoffzelle



Kapillare im
Heizschlauch

Brennstoffzellenteststand

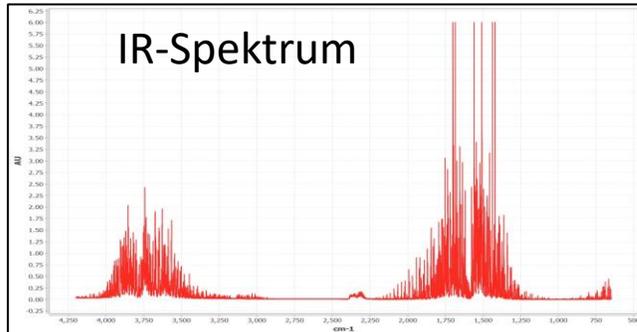
- Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) / Analyse der Verteilung der Relaxationszeiten (DRT)
- Brennstoffzellen-Teststand
- Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR)
- Massenspektroskopie (MS)



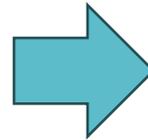
- In der Mischstrecke reagiert NO mit O₂ zu NO₂ und bildet die Mischung aus Stickoxiden (NO_x)
- Schadgaskonzentrationen von 0,35 – 207 ppm in der Prozessluft möglich (6 kW Stack, abhängig vom Lastpunkt und der Stöchiometrie)
- EIS ermöglicht separierte Darstellung der elektrochemischen Prozesse

- Mit FTIR werden die Konzentrationen der Gaskomponenten am Stackauslass gemessen, um die Reaktionen zwischen Stackkomponenten und Schadgase zu bestimmen
- MS wird als Ergänzung zu FTIR eingesetzt
- Ziel: Verständnis der Einflüsse der Luftschadgase auf Stackleistung und -lebensdauer im Detail

H2TwinTest

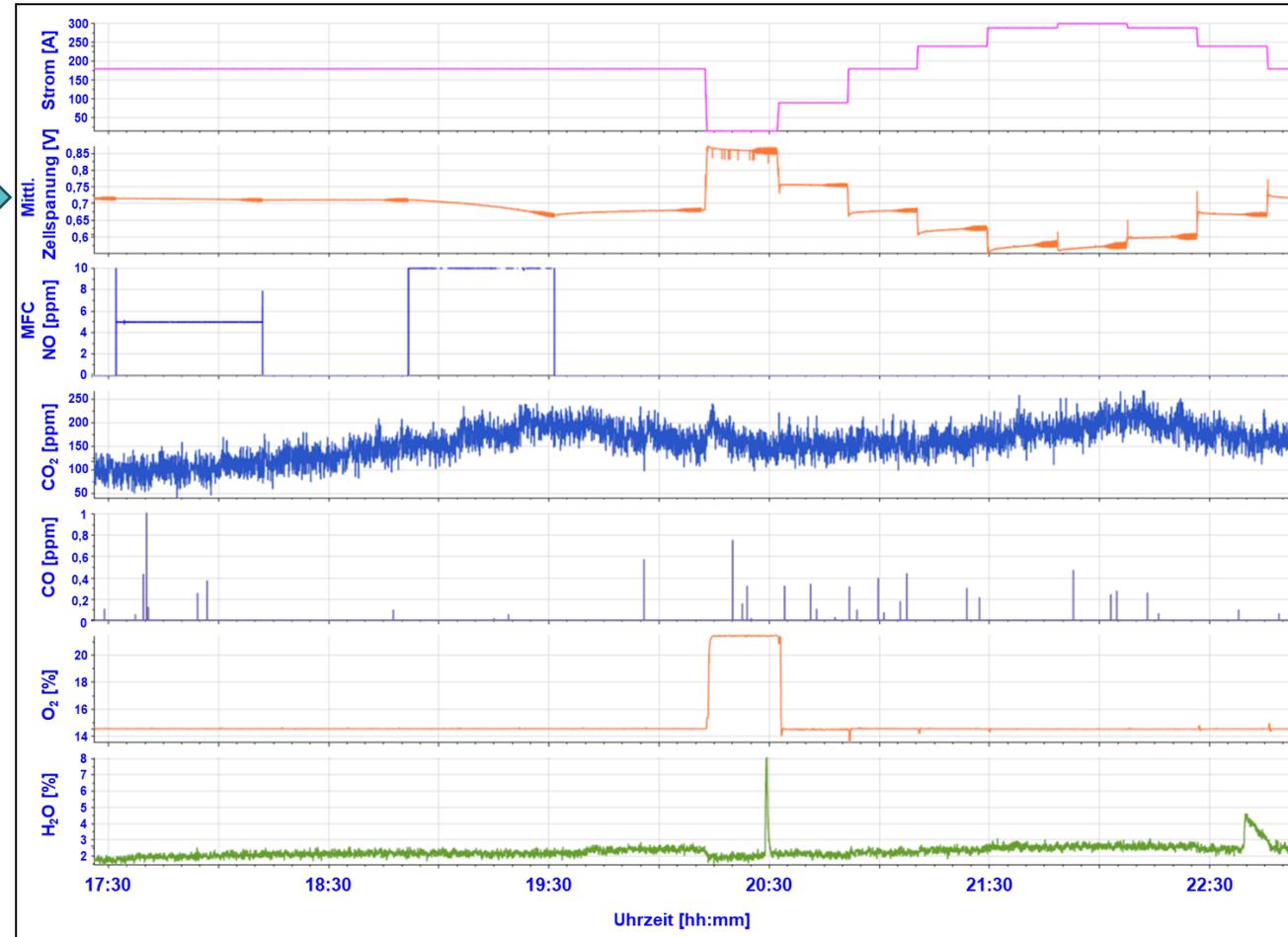


& O₂-Gasanalysator
& Teststand

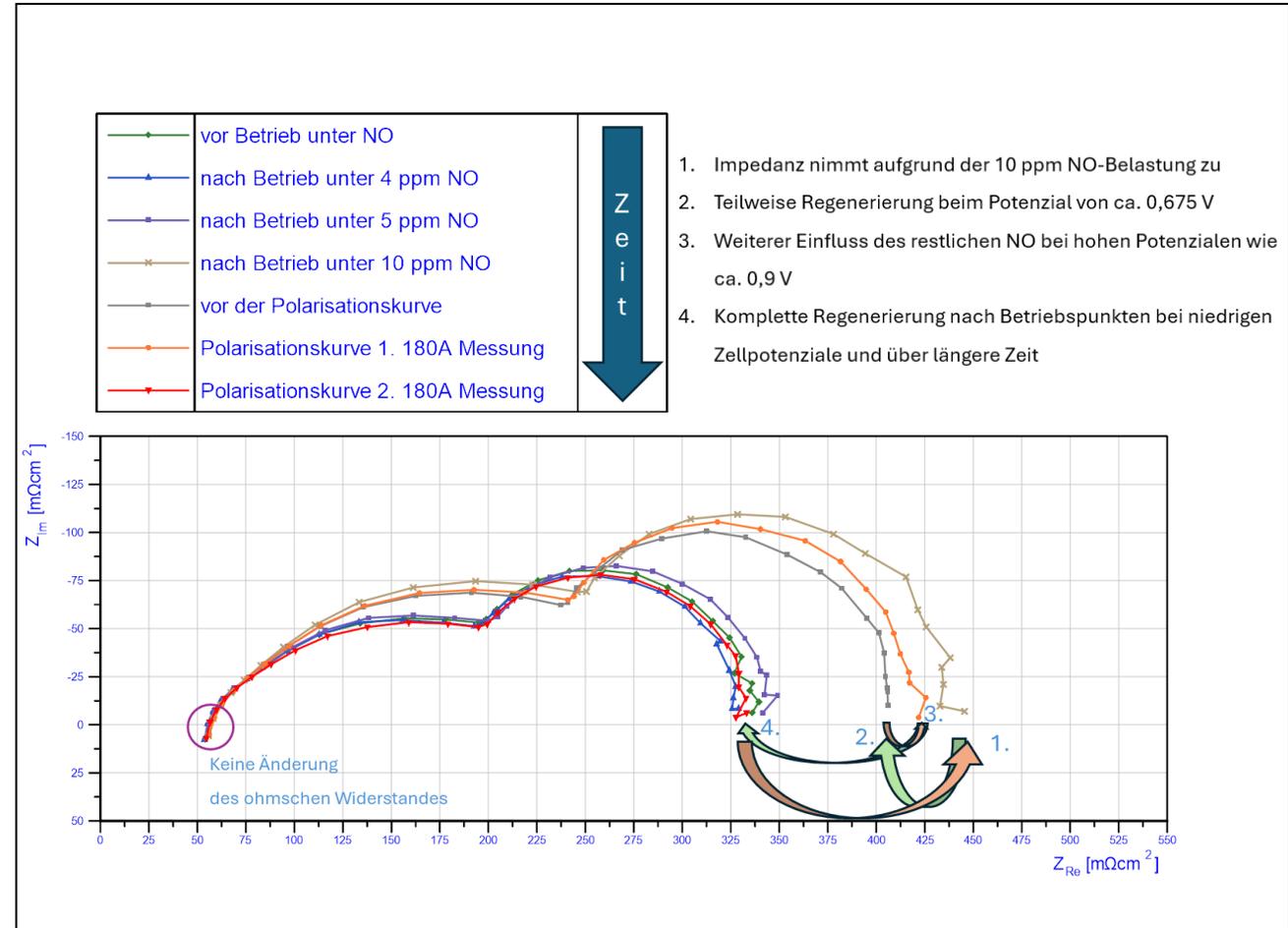
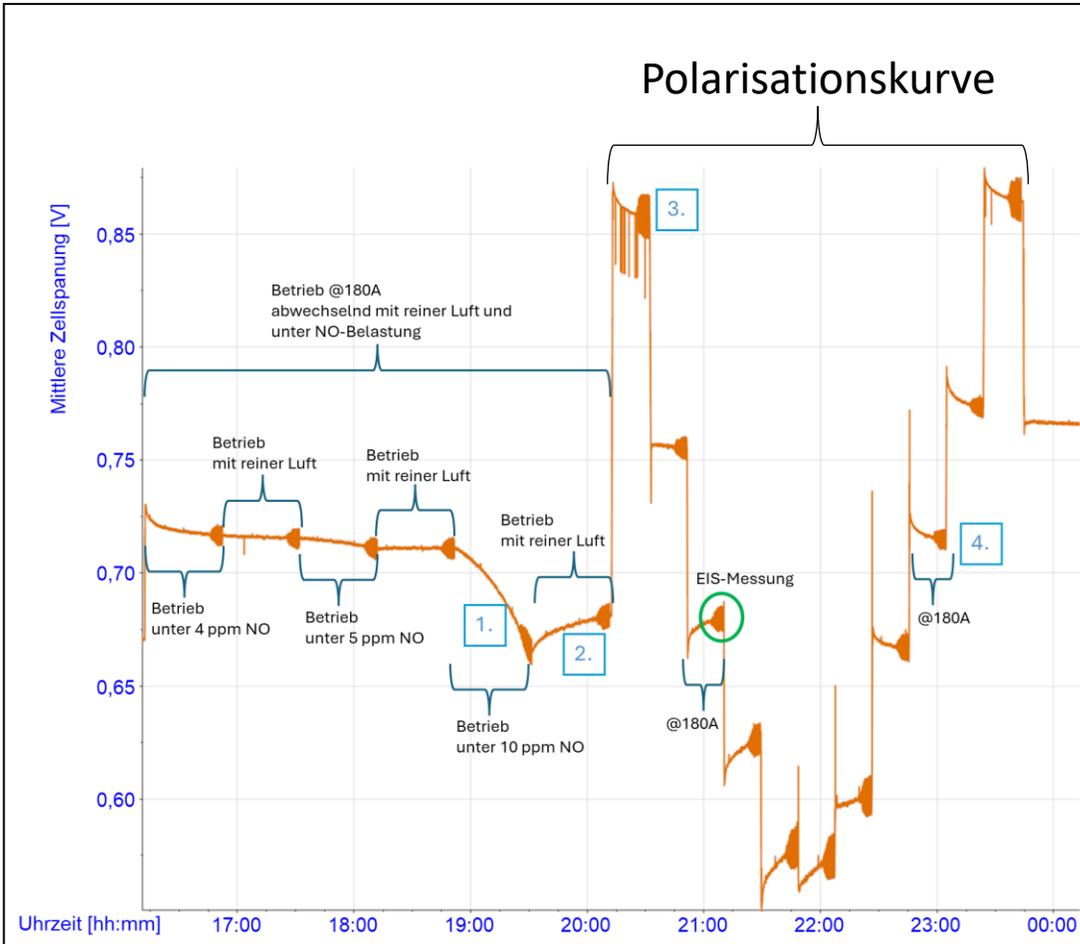


FTIR

- Plausible Messwerte für CO₂, CO, SO₂, NH₃ und H₂O (nicht alle Konzentrationen im Diagramm abgebildet)
- CO₂-Konzentration in Abhängigkeit der NO-Konzentration und des Betriebspunkts
- Eventuelle Überlagerung NO₂ und H₂O im Spektrum
 - Anpassung der Quantisierungsparameter kann helfen



H2TwinTest



H2TwinTest



Zusammenfassung:

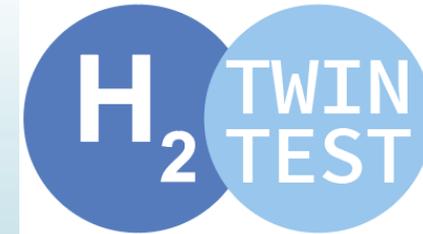
- Aufbau, Inbetriebnahme und Validierung eines Wasserstoffmotor-Prüfstandes Leistungsstufe II
- Fertigstellung und Inbetriebnahme eines Brennstoffzellen-Prüfstandes Leistungsstufe II
- Abschluss der Modellierung des Digitalen Zwillings des Brennstoffzellen-Prüfstandes Leistungsstufe II
- Abgleich des Digitalen Zwillings mit dem Prüfstand
- Aufbau und Inbetriebnahme der Schadgasanlage
- Untersuchungen zur Stack-Degradation

Ausblick:

- Fortsetzung des Abgleichs zwischen Digitalem Zwilling und Brennstoffzellen-Prüfstand
- Erprobung verschiedener Regelkonzepte mit Hilfe des Digitalen Zwillings
- Abschluss der Untersuchungen zur Stack-Degradation durch weitere Luftschadstoffe



H₂TwinTest



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

H₂-Kolloquium Baden-Württemberg | 04.–05. Juni 2024, Baden-Baden