



Ermittlung thermischer Einsatzgrenzen bei der H₂- Betankung von Typ IV-Behältern

Dr.-Ing. Sebastian John, Dipl.-Ing. Heiko Hartung

Duisburg, Februar 2026

**Mehr Wert.
Mehr Vertrauen.**

TÜV SÜD RAIL GmbH

- Benannte nationale und internationale Bewertungsstelle im Bahnbereich
- Bewertung von Batterie- und Wasserstoffsystemen (Alternative Antriebe)
- Unabhängige Sicherheitsbewertung von zahlreichen nationalen und internationalen H₂-Projekten
- Entwicklungsbegleitende Zusammenarbeit mit System- & Fahrzeugherstellern und Betreibern

Dr.-Ing. Sebastian John

Sachverständiger
Alternative Antriebssysteme

Dipl.-Ing. Heiko Hartung

Gutachter für fahrzeugseitigen Arbeitsschutz,
Sachverständiger für fahrzeugseitigen Brandschutz,
Sachverständiger für Alternative Antriebssysteme

Messung der Temperaturgrenzen am Liner von Typ IV-Behältern



01 Problemstellung

02 Von der Konzeptidee zum reproduzierbaren Versuch

03 Darstellung von Versuchsergebnissen

Problemstellung

Anforderungen an die H₂ Betankung im Bahnsektor,
Validierung der Rückwirkungen des "Hot-Case" auf den Liner

Problemstellung

H₂ Betankung im Bahnsektor, Validierung des "Hot-Case"

- Betankungsdauer für großvolumige Typ IV-Behälter
- Nicht validierte theoretische Simulationen
- Einströmbedingungen (Massestrom und Gaseintrittstemperatur) und deren Einfluss auf Strömungs-/ Temperaturverteilung im Behälter
- **Fokus:** Untersuchung des Wärmeeintrages (Joule-Thomson-Effekt, Kompressionsarbeit) im Behälter unter Realbedingungen



„Coradia iLint im Besitz der LNVG, betrieben von der evb und angetrieben von Linde“
Bildquelle: Alstom/ <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2022>

- Risikominimierung durch Vermeidung der Grenzwertüberschreitungen am Liner-Material (85°C)
- Aufrechterhaltung der dichtenden Schutzfunktion des Liners über die Lebenszeit

Problemstellung

H₂ Betankung im Bahnsektor, Validierung des "Hot-Case"

Anforderungen:

- Sicherheit in umbauten Räumen
- Maximale Oberflächen- bzw. Werkstofftemperatur des Behälters/ Liners von 85 °C
[fixiert durch DIN EN 17127 oder ISO 19880-1]
- Schaffung eines faktenbasierten Vertrauens in die technische Behältersicherheit und in die Betankungsprozesse
- Überprüfung liegend integrierter Behälter



„Alstom Coradia iLint am
evb-Instandhaltungsstandort
Bremervörde“
Bildquelle: TÜV SÜD Rail GmbH

Problemstellung

Herausforderungen



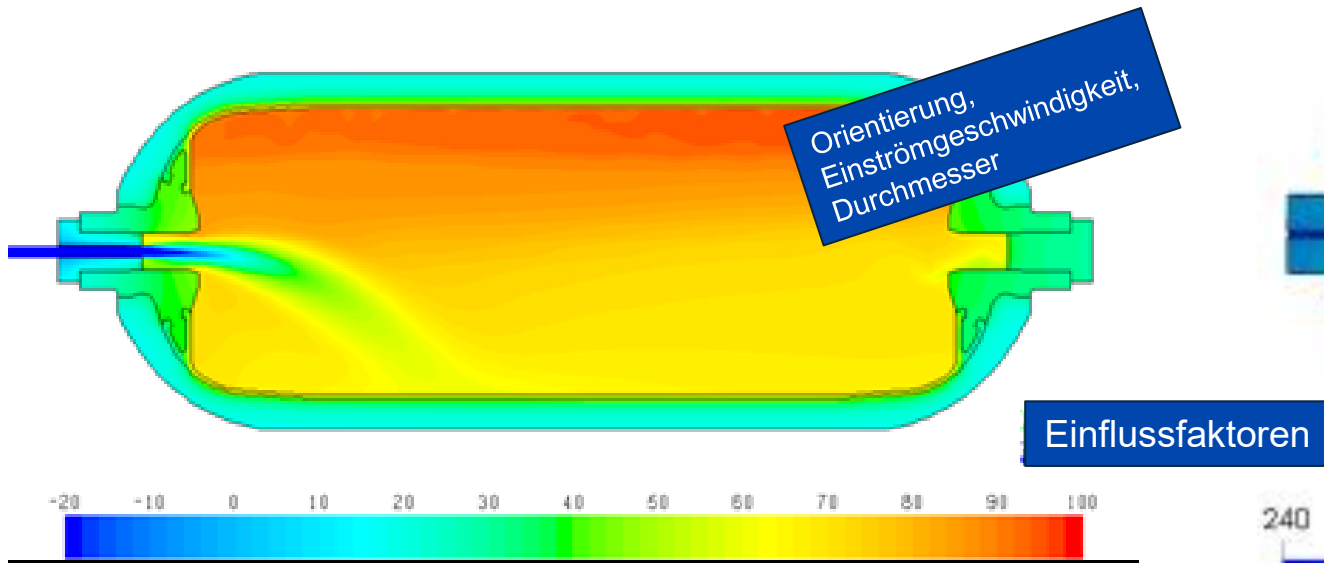
- Definition einsatzspezifischer **Betriebslasten**
- Berücksichtigung von **Prozess- und Regelungstechnik** (Druck-Korridor, Bankumschaltungen, Vorkühlung, etc.)
- Berücksichtigung von **Peripherien** (Verrohrung, Ventile, Regler und weitere Strömungskomponenten)
- Abbildung von **Strömungs- und Schichtungsvorgänge** im Behälter (Experiment ← Validierung → Simulation)



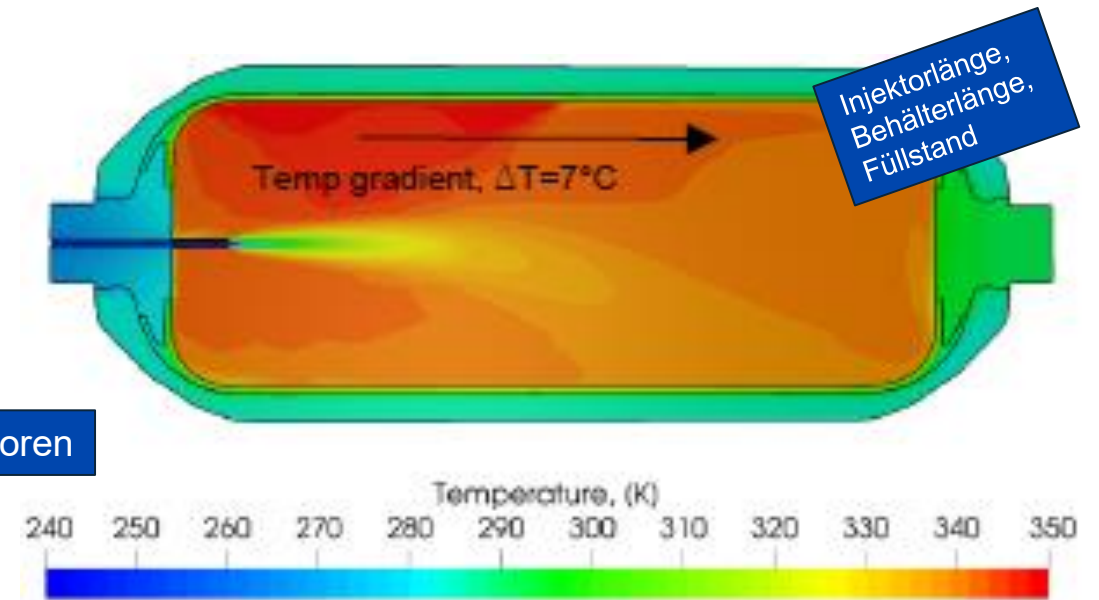
Problemstellung

Komplexität und Einflussfaktoren

- komplexe Strömungs- und Schichtungsvorgänge im Behälter
- experimentelle Validierung von Simulationsmodellen erforderlich



Temperaturschichtung bei geringen Einströmgeschwindigkeiten in einem 36 l-Behälter [1]



Exemplarische Darstellung der Gas-Temperaturverteilung im Behälter während eines Befüllvorgangs [2]

[1] HyTransfer – Final Webinar slides 2016-12 ; [2] CFD analysis of fast filling strategies for hydrogen tanks and their effects on key-parameters 2014-10

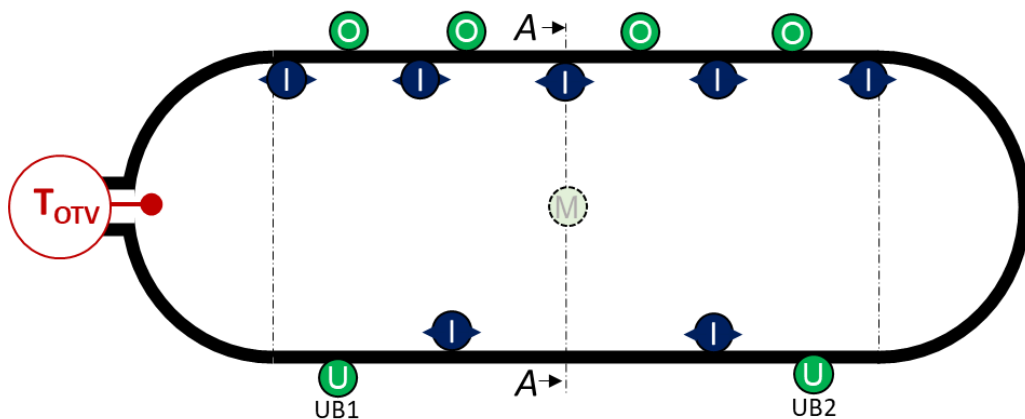
Problemstellung

Versuchsumsetzung

Unabhängige Inspektionsstelle der **TÜV SÜD Rail GmbH** :



- Sensorinstrumentierung im Behälter



- Messwerterfassung und Versuchsbegleitung



- Gesamtheitliche Analyse und Bewertung aller Messwerte

Prüfstelle **ZBT** :



- Regelung
 - Vorlage Druckniveau
 - Behältertemperatur (aktive Erwärmung bis $T_{\infty} \leq 50^{\circ}\text{C}$)
 - Temperierung des Füllmediums (H₂-Kühlung/ Vorwärmung)
 - Massestrom/ Druckanstiegsrate



- Messung
 - Drücke und Gastemperaturen
 - Masseströmen/ Druckverlusten
 - Behältertemperatur an Behälter-Innen- & Außenflächen

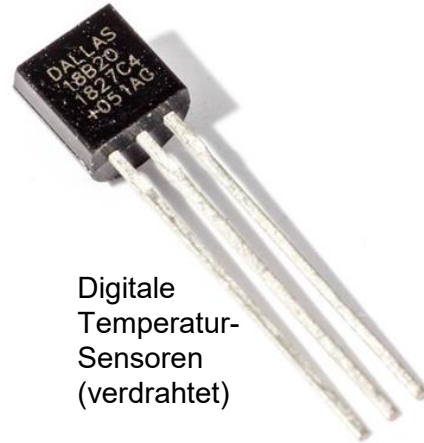
Von der Konzeptidee zum reproduzierbaren Versuch

Messkonzepte, Erfahrungen, Genauigkeit und Rückwirkungsfreiheit

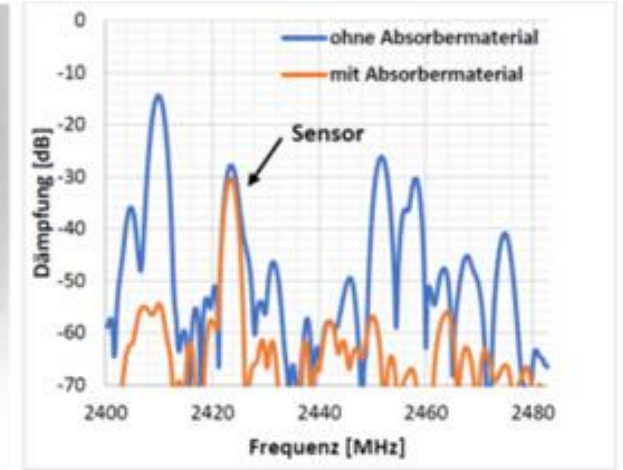
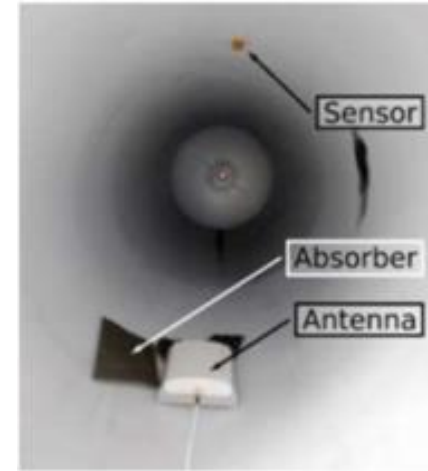
Von der Konzeptidee zum reproduzierbaren Versuch

Ausgangslage:

- Kein Stand der Technik zur Messung von Liner-Temperaturen vorhanden
- Nutzung der Simulationsmodelle zur Vorbestimmung der Messpunkte
- theoretische Simulationsmodelle liefern unterschiedliche Ergebnisse
- Erster Schritt: Einsatz weitgehend rückwirkungs-freier Mess-Apparaturen



Digitale
Temperatur-
Sensoren
(verdrahtet)



Surface Acoustic Waves Sensors (SAW)



Ultraschall

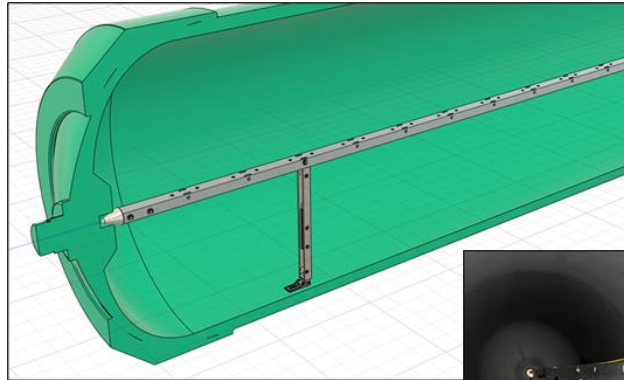


Temperaturmessstreifen

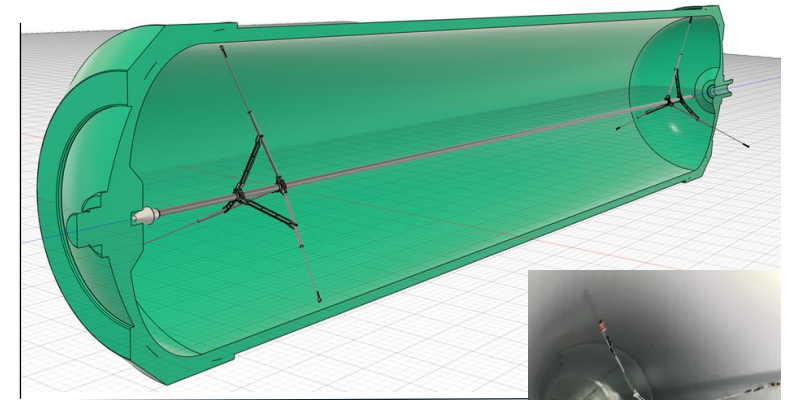
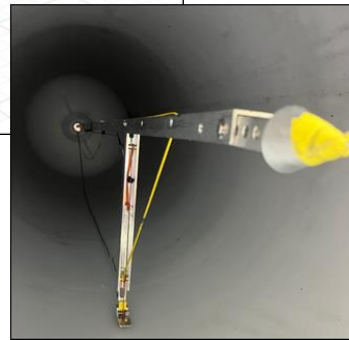
Von der Konzeptidee zum reproduzierbaren Versuch

Messkonzepte:

- Fokus: Verwendung digitaler verkabelter Sensoren
- Verklebung der Sensoren im Behälter mit Hilfsttechnik
- Magnet-gehaltene Sensoren mit der Option, die Position anzupassen
- Mess-Schirm mit Erfassung von Liner- und Gastemperaturen im Behälter



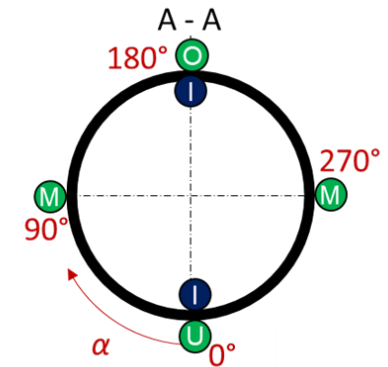
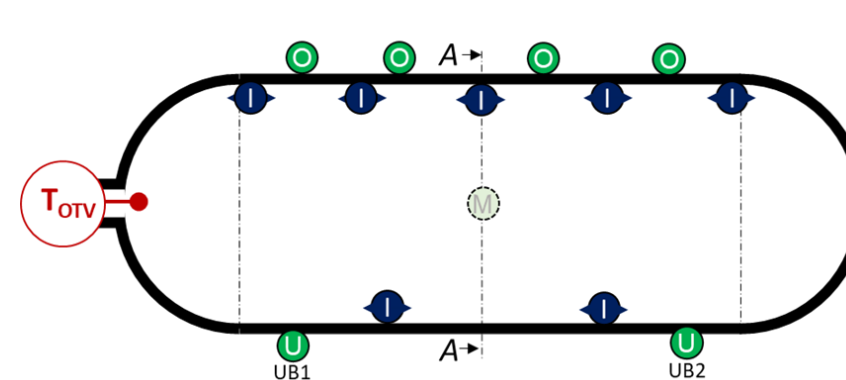
Sensorverklebung



Messschirm



„Magnetfixierung“ des innenliegenden Sensors



Festlegung der Sensorpositionen

Von der Konzeptidee zum reproduzierbaren Versuch

Erfahrungen

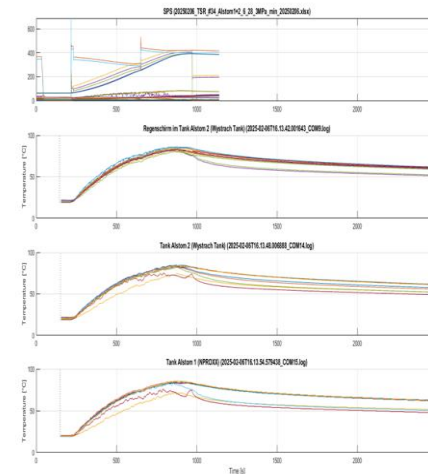
- Sehr hoher Zeitaufwand und Fehlschläge
- Reproduzierbare und nachhaltige Verklebe-Technik
- Findung behälterspezifischer Temperaturprofile
- Ermittlung von spezifischen Behälterkennfeldern durch versuchsbasierte Stützstellen



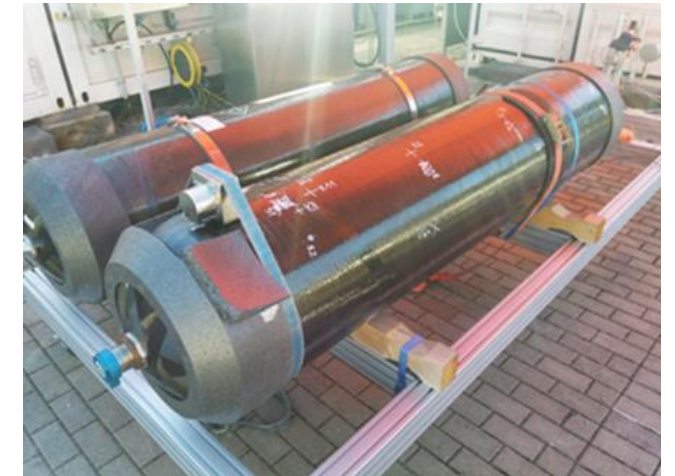
Analyse von Ursachen und Wirkung (z.B. auf die Verklebung)

Überprüfung der Rückwirkungsfreiheit

- Vergleich Sensorverklebung mit berührungsloser Messung der Oberflächentemperatur
- Untersuchung der Einflüsse der Verkabelung
- Messmittel-Genauigkeitstoleranzen der Prozesskette
- c_v -Wert Vergleich zwischen original verbauten OTV und Hilfs-OTV mit Kabeldurchführungen
- Vergleichsanalyse von Messergebnissen unterschiedlicher Messkonzepte



Messwert-Analysen



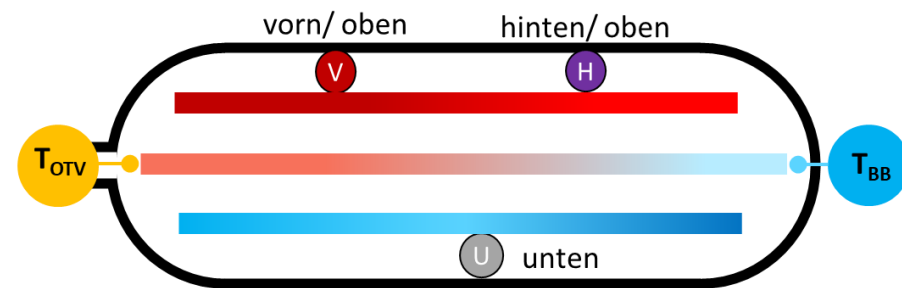
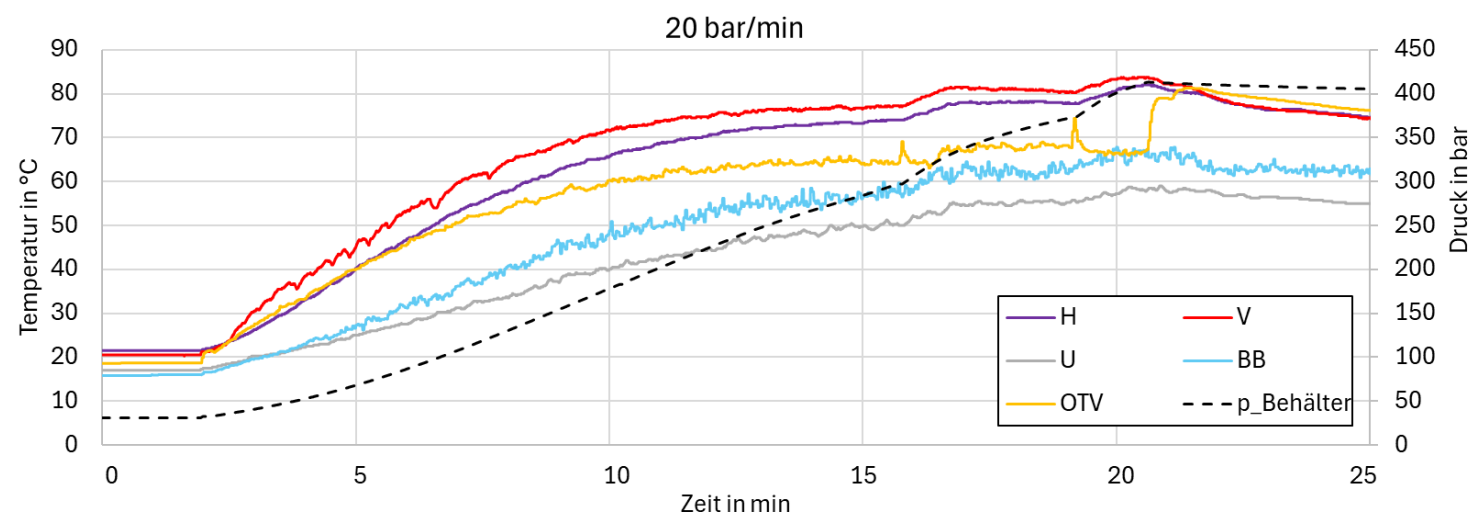
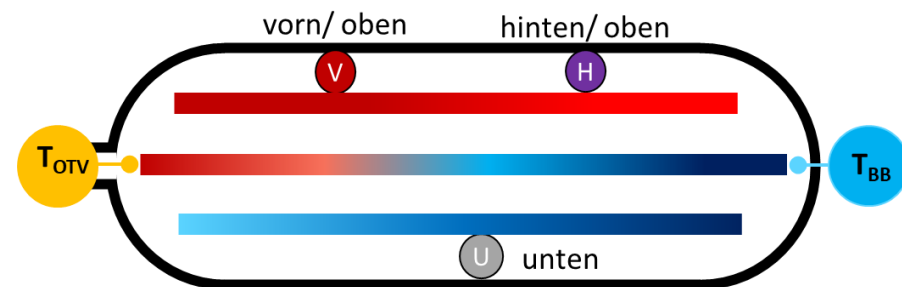
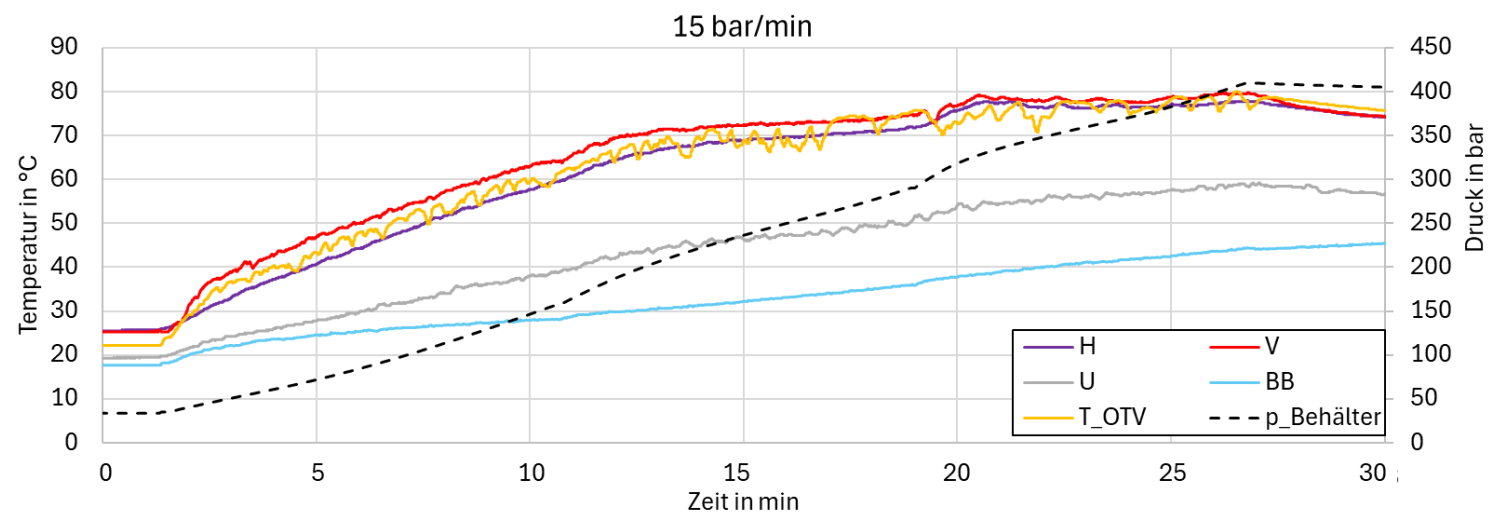
Durchführung von Parallelversuchen mit unterschiedlicher Sensorinstrumentierung pro Behälter

Darstellung von Versuchsergebnissen

Temperaturverteilungen / Praxistauglichkeit/ Behälter-Betankungs-Kennfeld

Versuchsergebnisse

Schichtungseffekte

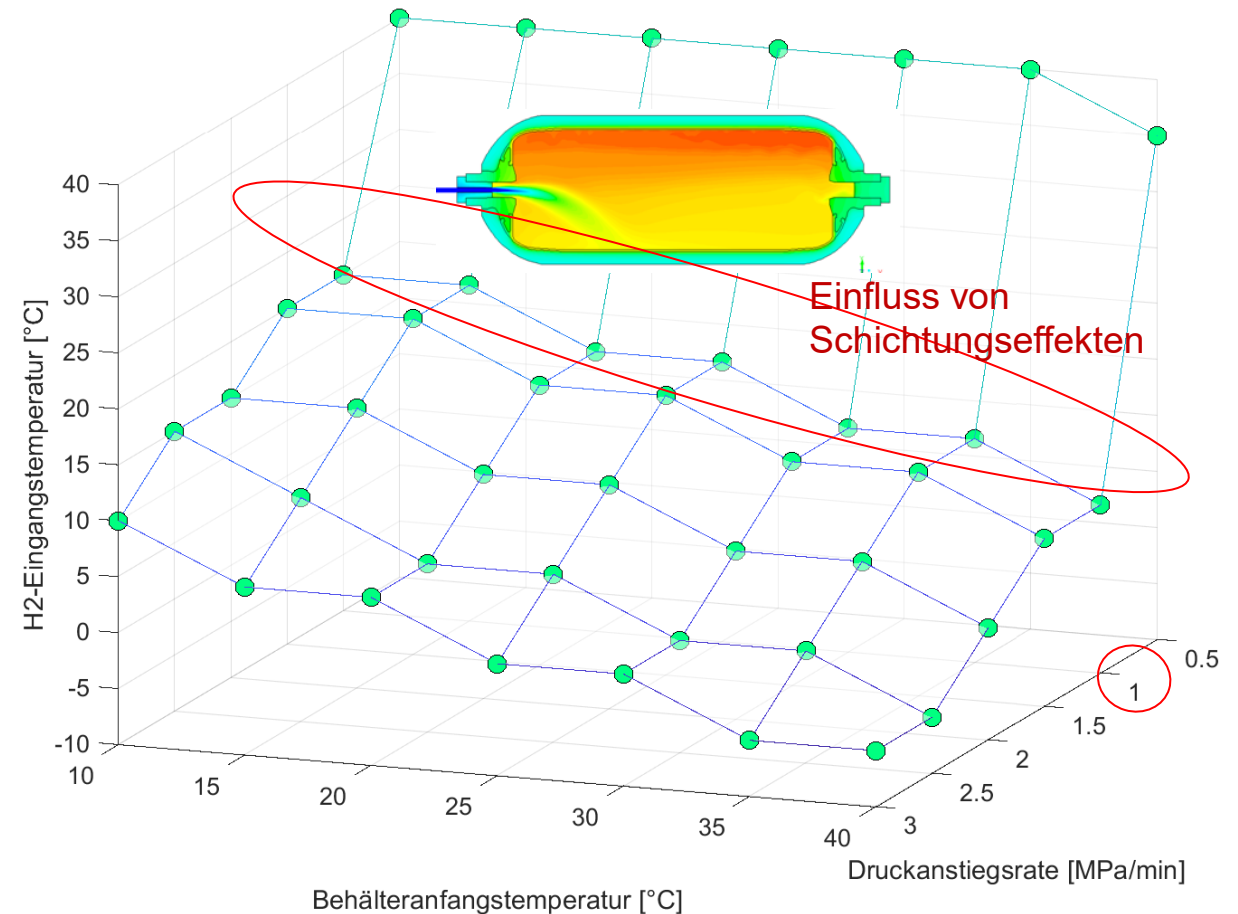


Versuchsergebnisse

Behälterkennfeld/ Optimierung

Abbildung behälterspezifischer thermisch zulässiger Einsatzbedingungen

- Zeitliche Optimierung: Schnelleres Betanken durch Vorkühlung
- Energetische Optimierung: Betankungszeit vs. Temperatur



Versuchsergebnisse

Überfüllung



Wann ist der Behälter voll?

- Zusätzlich zur Betrachtung der thermischen Kritikalität ist die Bestimmung der inneren **Gastemperatur** Voraussetzung für die **Bestimmung des Zieldruckes**
- Erforderliche Parameter: **SOC (State-of-Charge)** - Bestimmung durch Enddruck und Gastemperatur

SOC 100%: bei 15 °C = 350 bar / 85 °C = 423,15 bar

wenn SOC > 100%: - Gefahr durch zyklische Überlast → Leckage & Bersten
 - Gefahr durch kritischen Sonderereignisse: z.B. Bersten in Kombination mit Brand

→ Hot-Case (Übertemperierung) und Cold-Case (Überdruck) - sind zu beachten!

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen?

Kontaktinformationen:

Dr. Sebastian John

E-Mail: sebastian.john@tuvsud.com

Heiko Hartung

E-Mail: heiko.hartung@tuvsud.com

Follow us on:



tuvsud.com

info@tuvsud.com