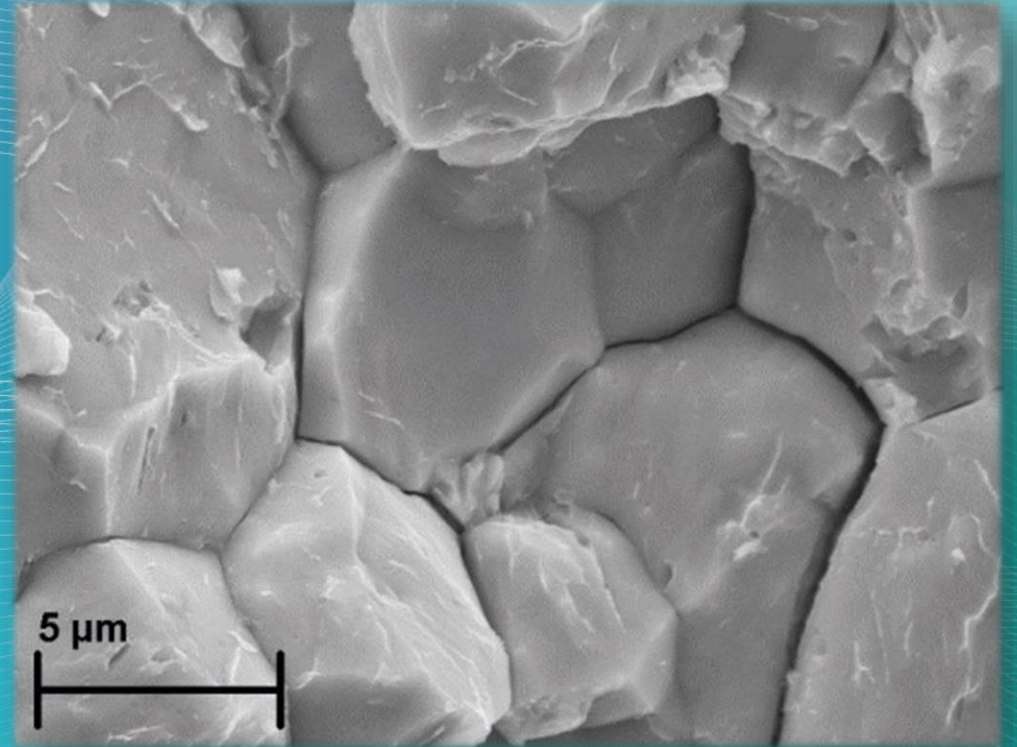


Bewertungskonzepte für sichere Wasserstofftechnologien

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

C. Fischer, K. Wackermann, H. Oesterlin, A. Muth,
F. Schweizer, T. Michler, I. Varfolomeev,
M. Schmitz-Elbers, C. Schweizer

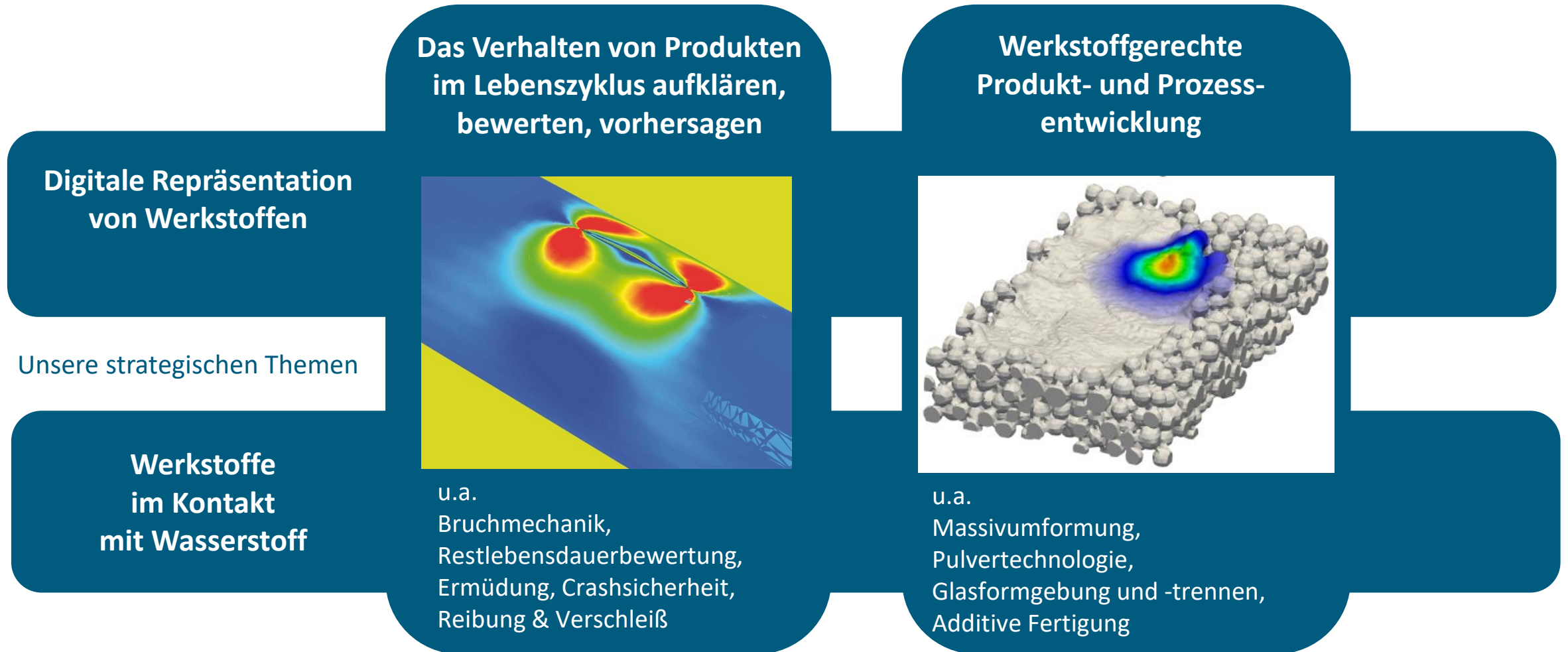


Suisse TP Innovation trifft Werkstoffkompetenz
25.10.2023, Freiburg im Breisgau

wasserstoff@iwm.fraunhofer.de

Fraunhofer IWM: Wir machen Werkstoffe berechenbar

Unsere Alleinstellung: Kombination von experimenteller und computergestützter Werkstoffmechanik



Werkstoffe unter Wasserstoffeinfluss berechenbar machen Qualifizierung der Erdgasinfrastruktur für die Wasserstoffspeicherung

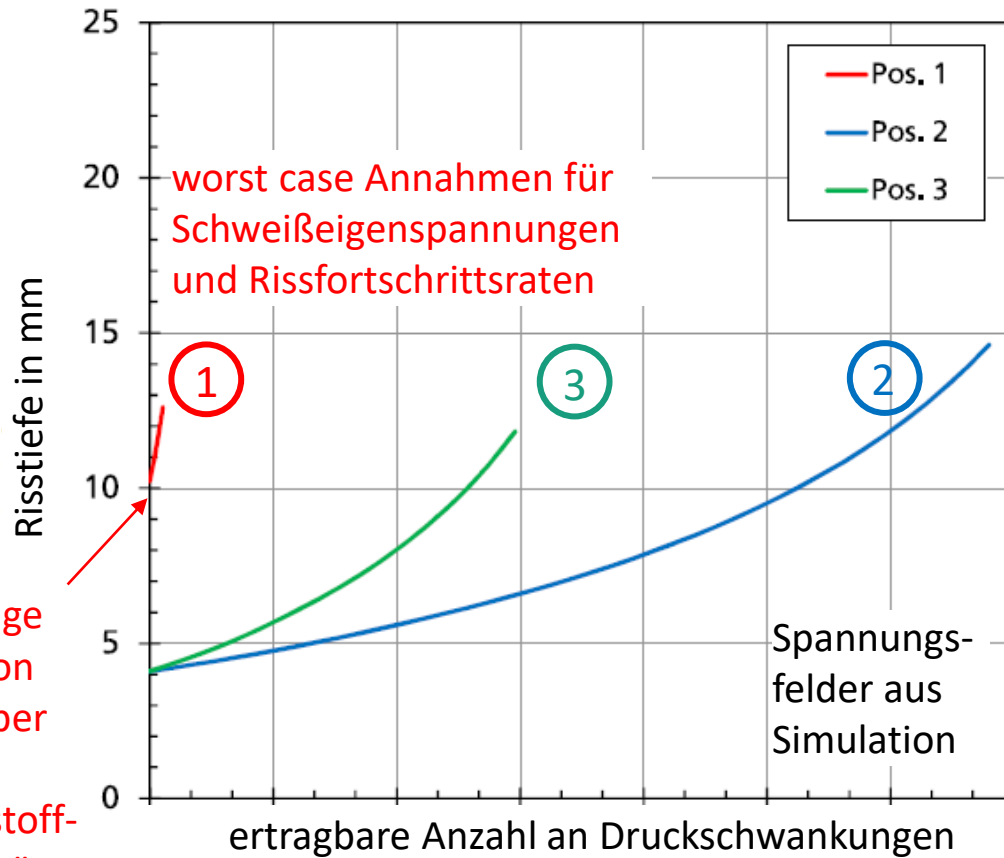
Schweißeigenspannungsmessungen durch das Fraunhofer IWM an einem geschweißten Kugelventil und Rohrleitungen



Werkstoffe unter Wasserstoffeinfluss berechenbar machen

Wozu benötigt man das Fraunhofer IWM?

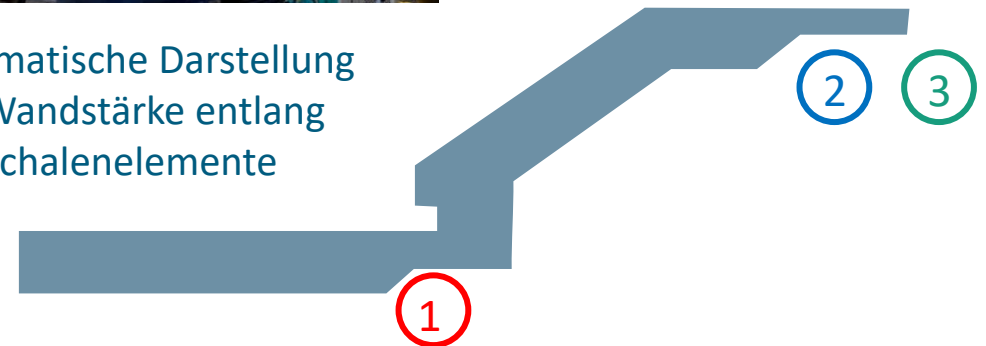
Sehr konservative Rissfortschrittsberechnung auf Basis eines Regelwerks



Anfangsrislänge ist abhängig von Wandstärke aber unabhängig von der Werkstoff- & Bauteilqualität



Schematische Darstellung der Wandstärke entlang der Schalenelemente



Bündelung von Expertise und Infrastruktur beim Thema Wasserstoff

H₂-Hochdrucklabor

Autoklaven bis 1000 bar – Hohlprobentechnik -
Beladungstechnik

H₂-Tribolabor

Modellierung von Tribokontakten –
Schmierstoffbewertung – Barrierschichten

Das Fraunhofer IWM Wasserstofflabor

H₂-Mikrolabor

Aufklärung wasserstoffinduzierter
Schädigungsprozesse an mikroskaligen Proben

H₂-Simulabor

Multiskalensimulation von Quantenphysik bis
Kontinuumsmechanik und Bauteilberechnung

H₂-Schadenslabor

Schädigungsmechanismen – Schadens-
vermeidung - Mikrostrukturanalytik

Werkstoffe unter Wasserstoffeinfluss berechenbar machen

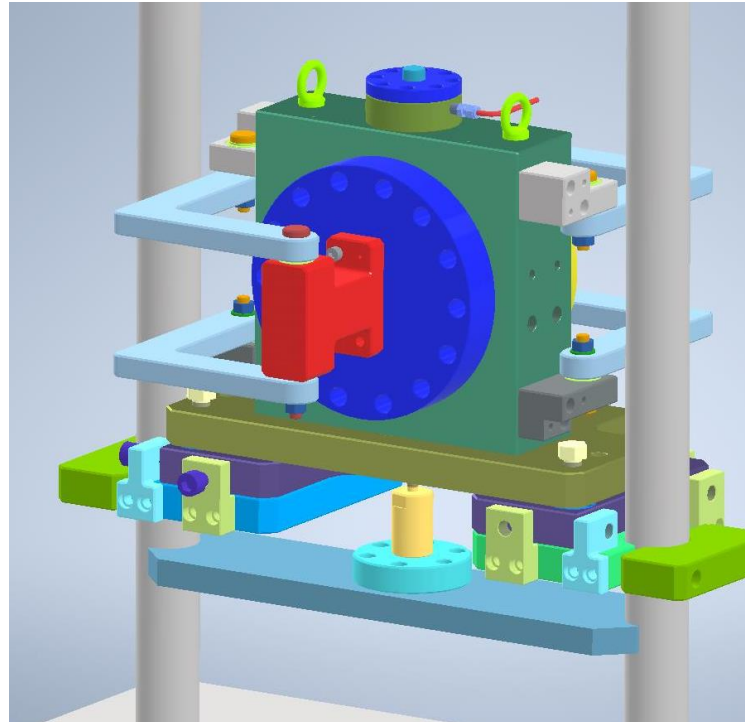
Der große Bedarf an Werkstoffdaten erfordert Skalierung der Druckwasserstoffprüfkapazitäten

1000 bar Autoklav

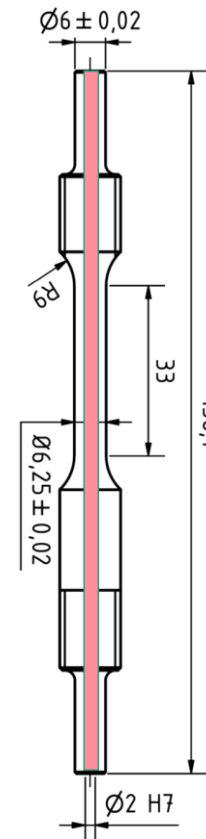


ca. 1.000.000 €

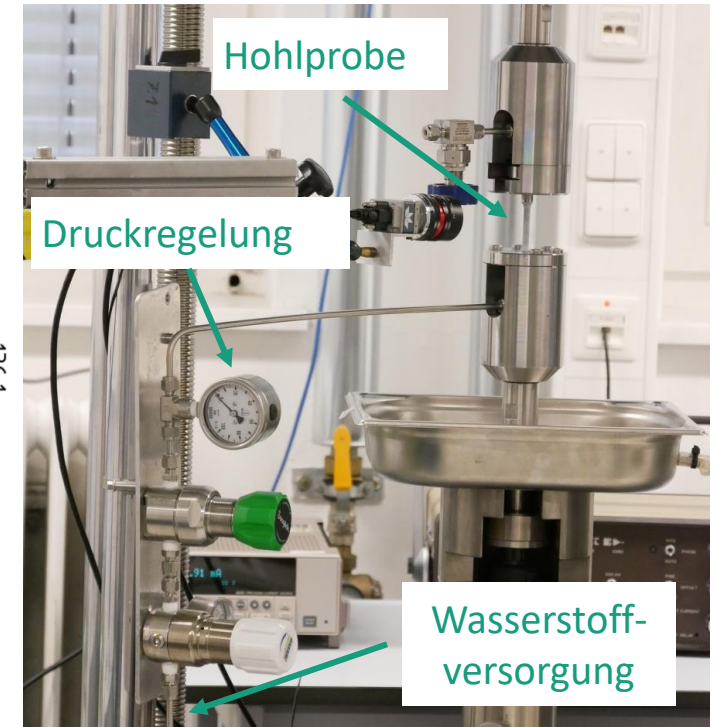
Miniautoklaven



ca. 120.000 €



Hohlprobenaufbau



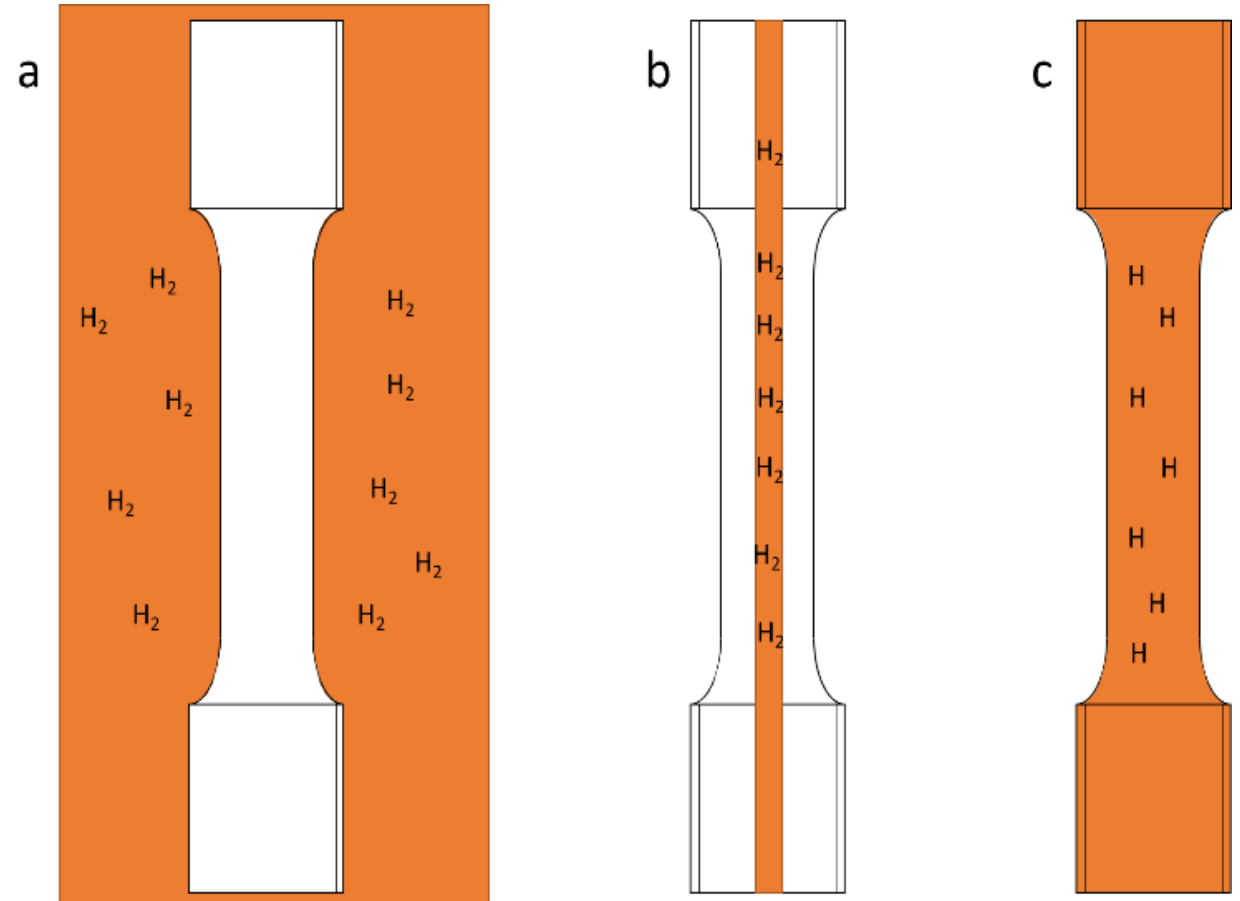
ca. 3.000 €

Die Hochdruckprüfung

H_2 -Hochdrucklabor

Autoklaven bis 1000 bar – Hohlprobentechnik - Beladungstechnik

- Prüfung unter Hochdruckwasserstoffatmosphäre im Autoklaven an Standardproben (a).
- Prüfung an Hohlproben (mit H_2 -Füllung) in normaler Laborumgebung (b).
- Prüfung an mit Wasserstoff vorbeladenen Standardproben in normaler Laborumgebung (materialabhängig), (c).



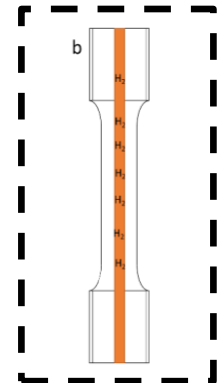
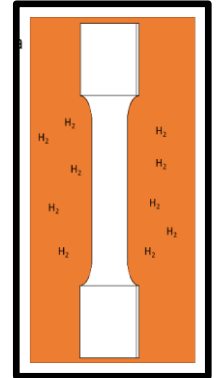
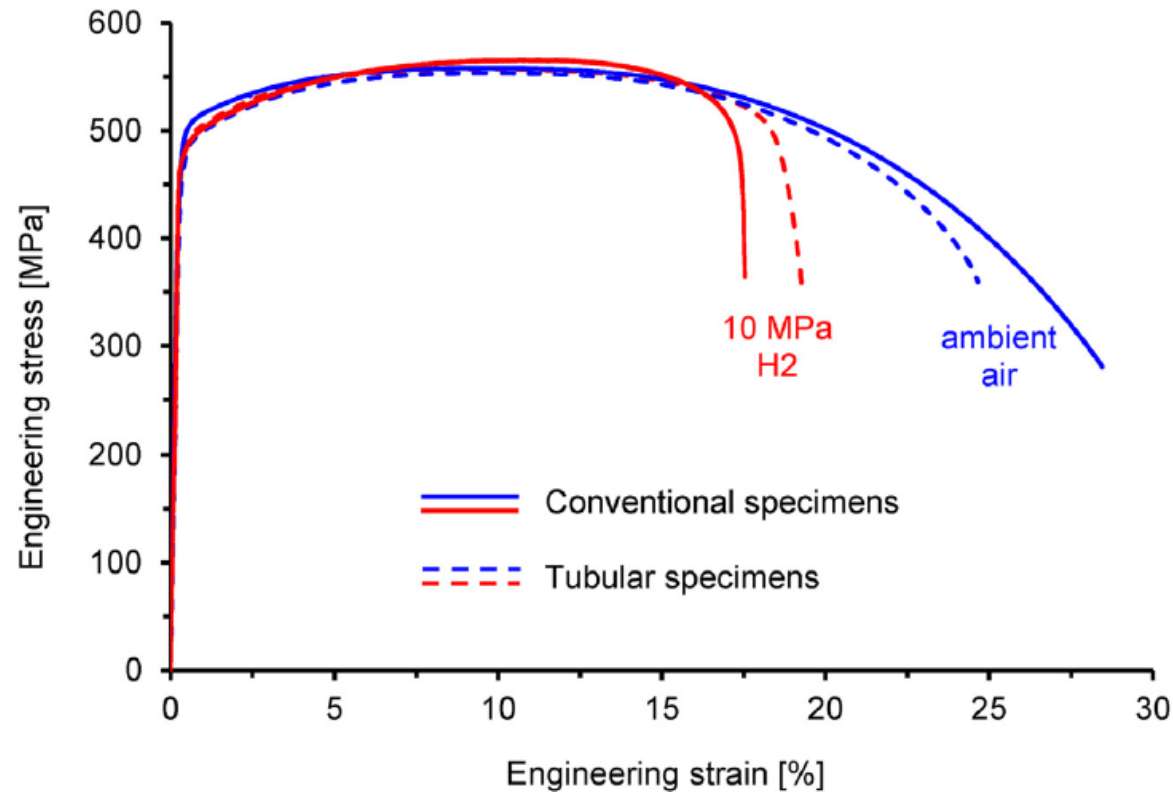
Die Hochdruckprüfung

Zugversuche: Vergleich zwischen Hohl- und Vollproben

H₂-Hochdrucklabor

Autoklaven bis 1000 bar – Hohlprobentechnik - Beladungstechnik

- Vergleichbare Ergebnisse für Hohlproben und Vollproben im quasistatischen Zugversuch (Zugfestigkeit + Dehngrenze).
- Kleine Unterschiede bei der Bruchdehnung.



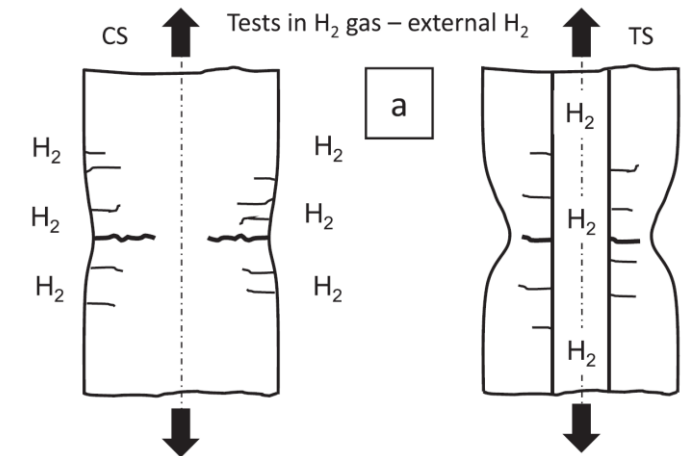
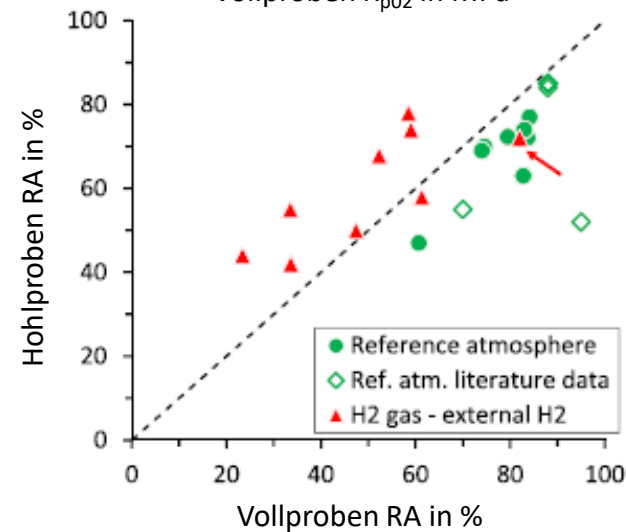
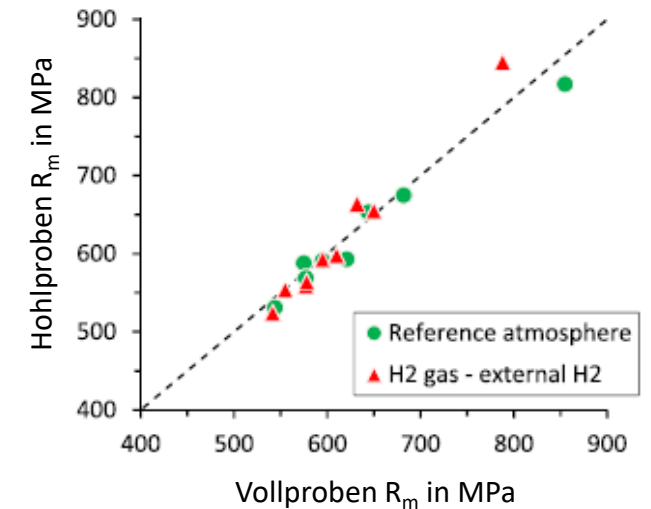
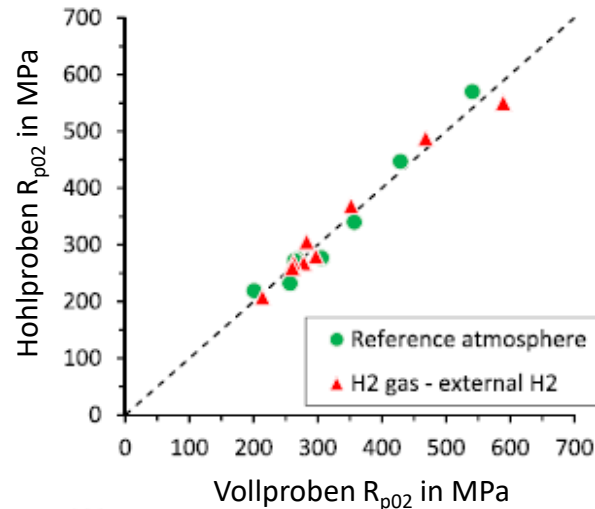
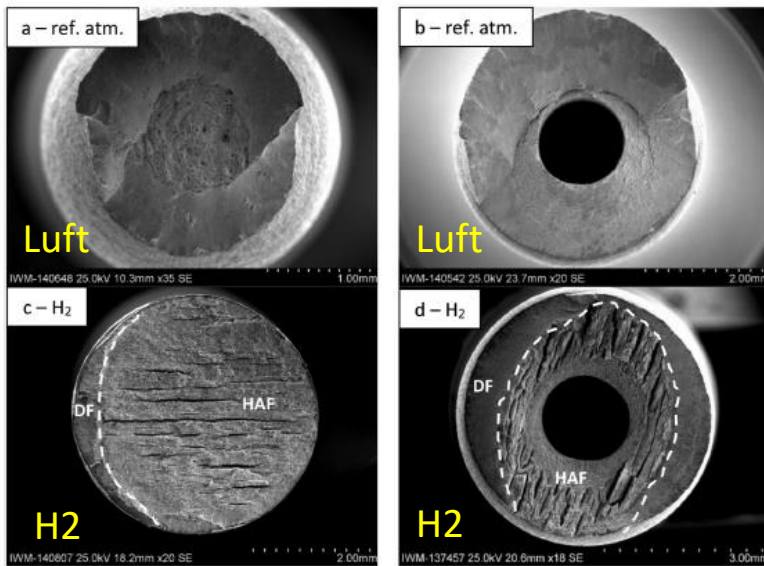
Die Hochdruckprüfung

Zugversuche: Vergleich zwischen Hohl- und Vollproben

Zugversuche

- Werkstoffkennwerte von Voll- und Hohlproben werden systematisch verglichen

Bruchflächen am Beispiel 1.4301



Die Hochdruckprüfung

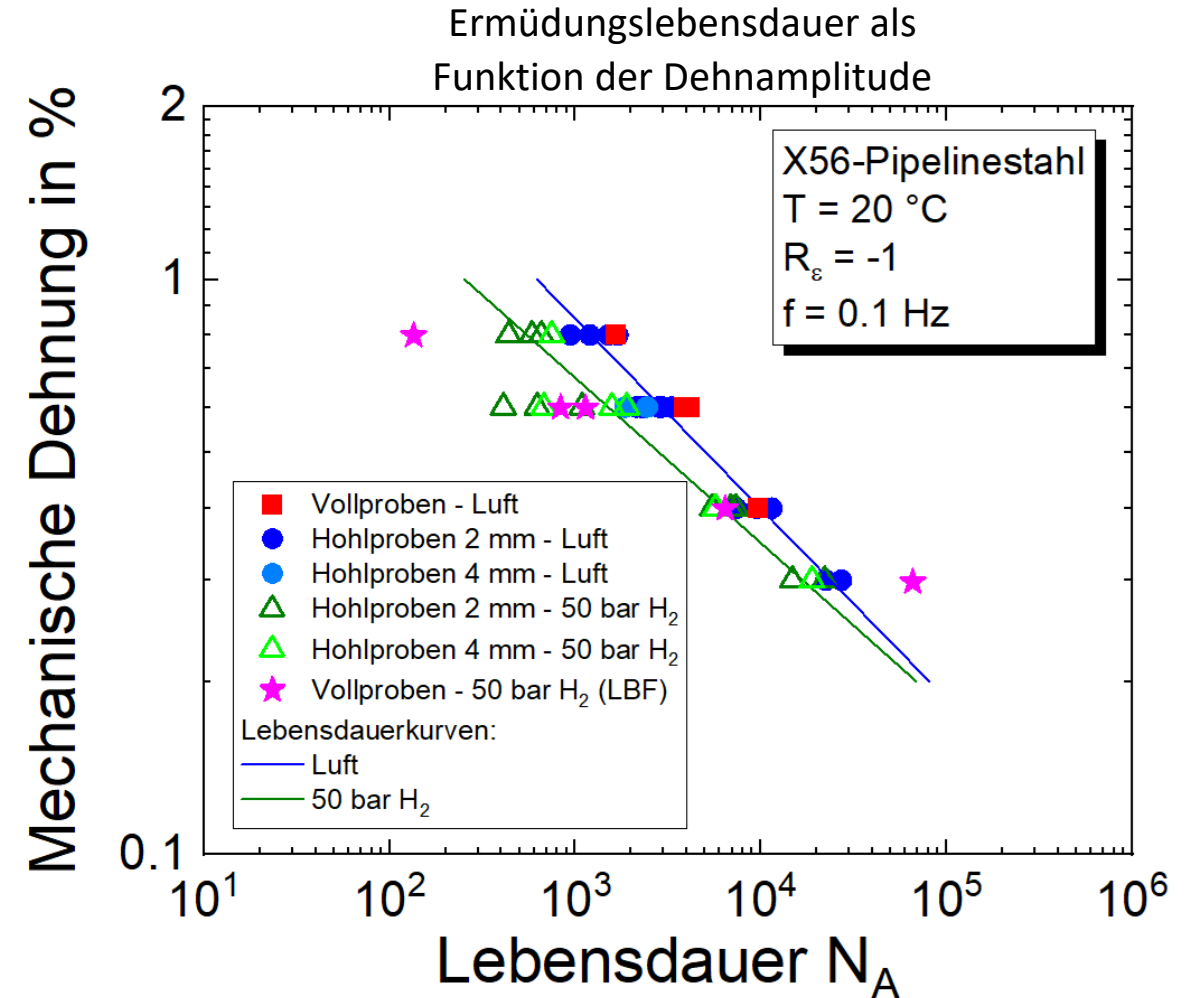
Ermüdungsversuche an Hohlproben

Niederzyklische Ermüdungsversuche an X56-Pipelinestahl

- Vergleichbare Lebensdauern an Voll- und Hohlproben
- Lebensdauer wird durch 50 bar Wasserstoffdruck reduziert
- Die Lebensdauerreduktion unter Wasserstoff nimmt mit der Belastung zu
- Spürbare Streuung der Hohlprobenversuche mit Wasserstoff
- Bohrungsdurchmesser hat keinen Einfluss (sowohl an Luft als auch bei Wasserstoff)

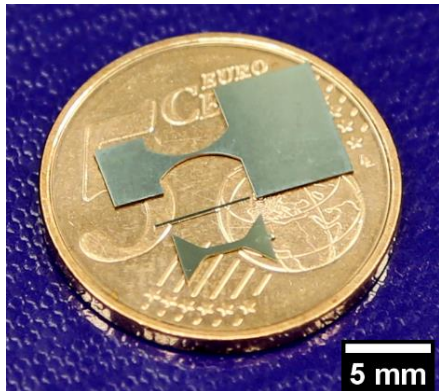
H₂-Hochdrucklabor

Autoklaven bis 1000 bar – Hohlprobentechnik - Beladungstechnik

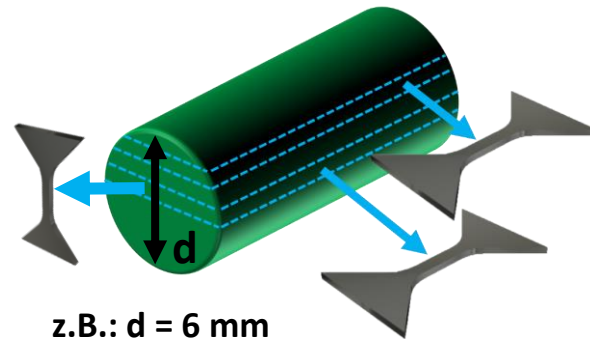


Die Mikroprobenprüfung

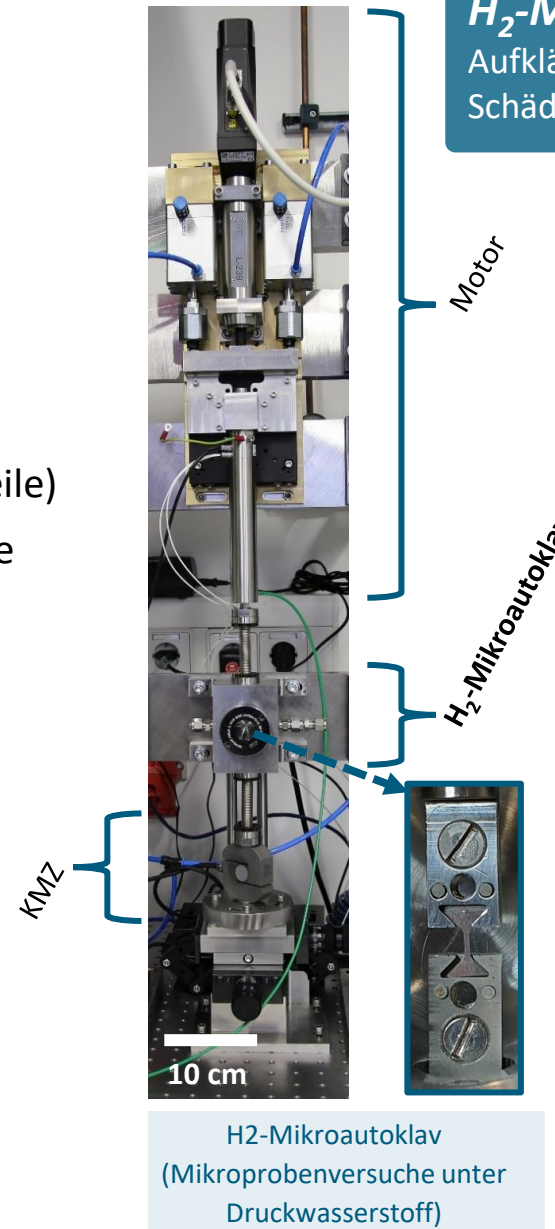
- Zug-, Biege- und Biegeresonanzversuche an Mikroproben
- Probenquerschnitt $\leq 1 \text{ mm}^2$ (z.B. $400 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$)
- Charakterisierung kleiner Bauteile und ortsaufgelöst (große Bauteile)
- Entwicklung und Optimierung mikromechanischer Versuchsstände
- **Option 1: Mikroproben vorbeladen mit Druckwasserstoff**
- **Option 2: *In-situ* unter Druckwasserstoff (ab Oktober 2023)**



Mikroprobengeometrien
(Biegeresonanz/ Biegung / Zug)

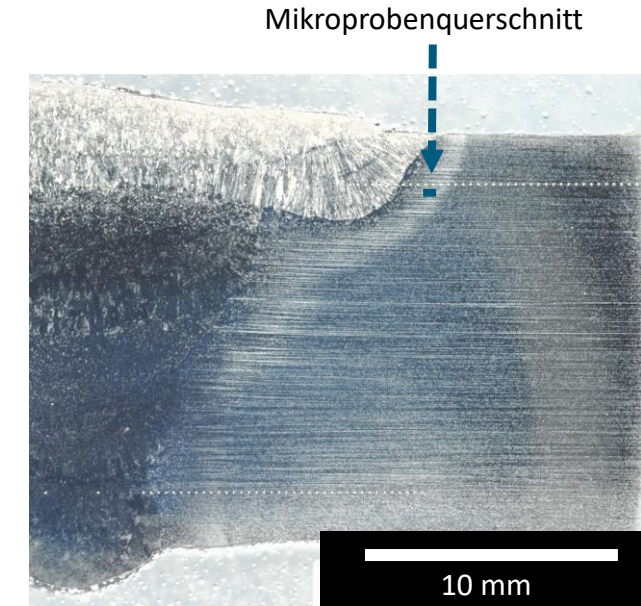


Ortsaufgelöste Bestimmung mechanischer
Eigenschaften



H₂-Mikrolabor

Aufklärung wasserstoffinduzierter
Schädigungsprozesse an mikroskaligen Proben



Mikromechanische Charakterisierung
verschiedener Schweißnahtbereiche

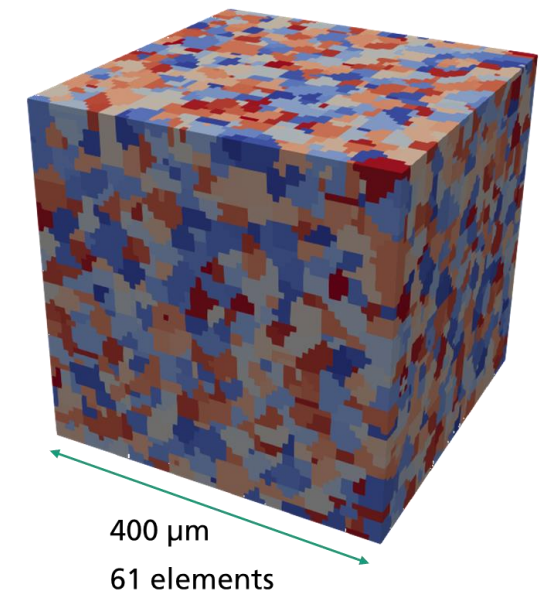
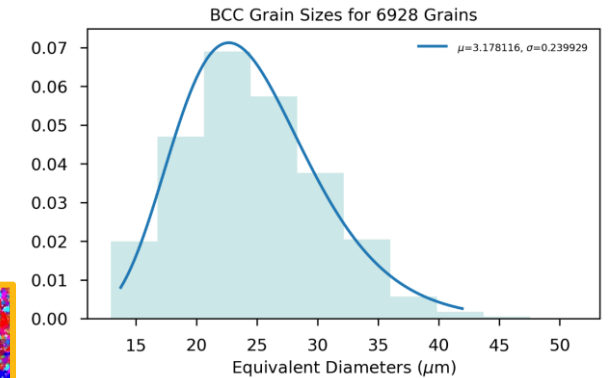
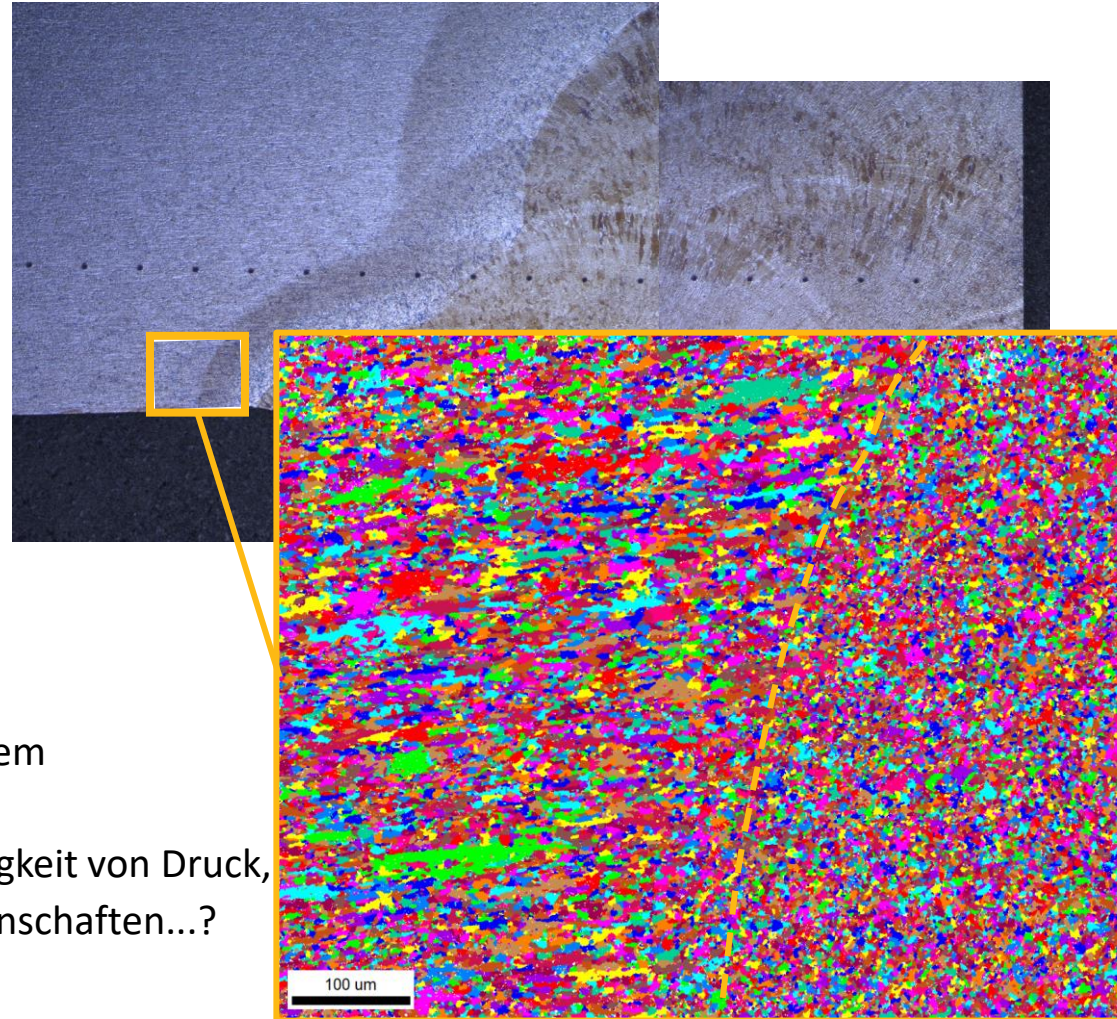
Werkstoffe unter Wasserstoffeinfluss berechenbar machen

Beispiel: Kopplung von Diffusion und mechanischer Beanspruchung auf Gefügebene

Wasserstoffdiffusion und
-versprödung sind
belastungsabhängig

Fragen

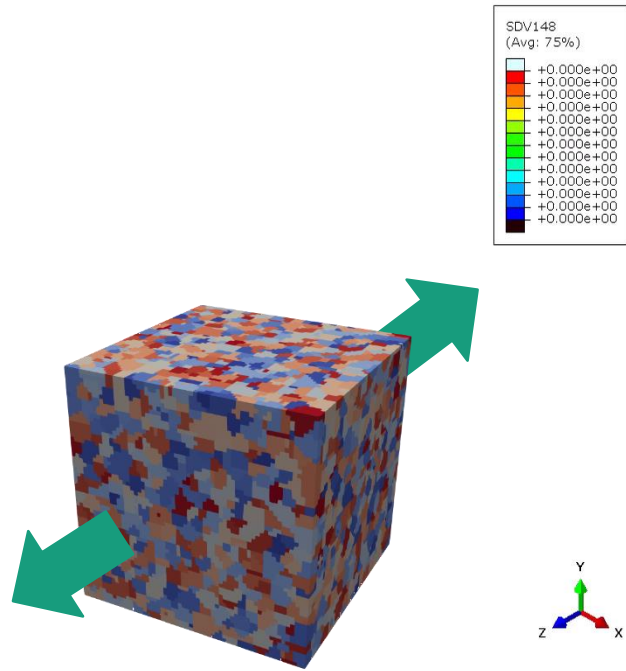
- Wo reichert sich der Wasserstoff im Gefüge an?
- Welche Rolle spielen Trapping-Mechanismen? („Wasserstofffallen oder -senken“)
- Wie ist die Interaktion zwischen einem wachsenden Ermüdungsriss und der Wasserstoffdiffusion in Abhängigkeit von Druck, Frequenz, Belastung, Diffusionseigenschaften...?



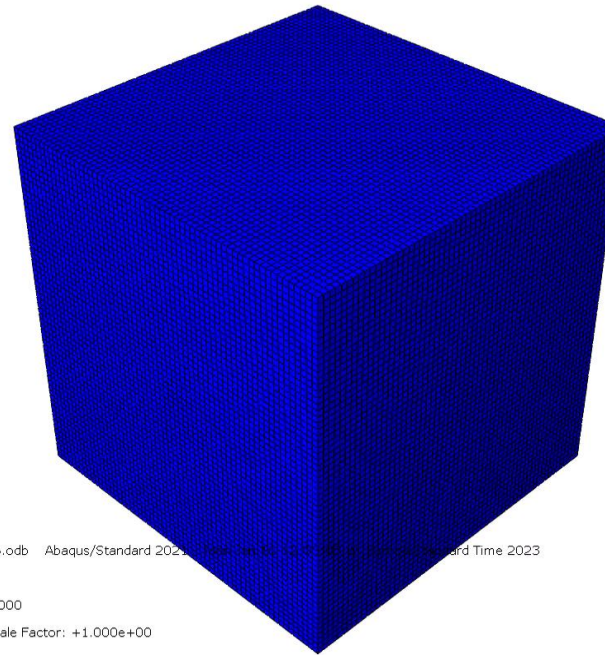
Werkstoffe unter Wasserstoffeinfluss berechenbar machen

Beispiel: Kopplung von Diffusion und mechanischer Beanspruchung auf Gefügebene

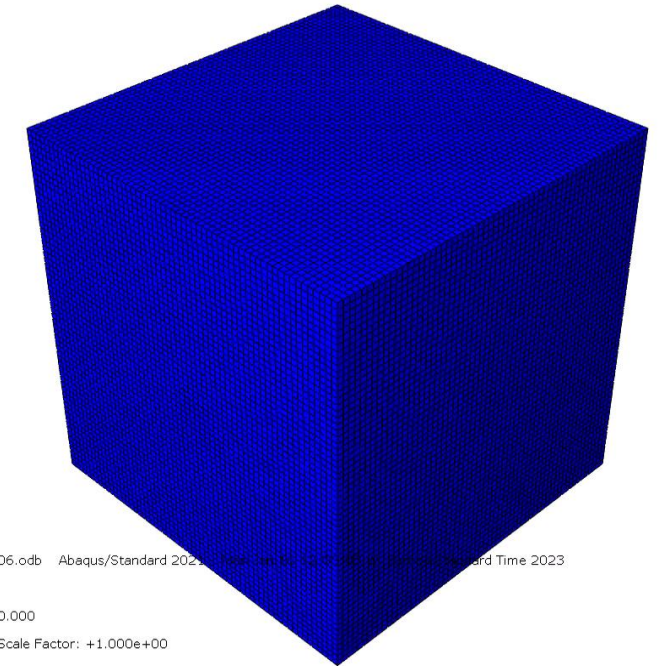
Wasserstoffdiffusion und -versprödung sind belastungsabhängig



Simulation der plastischen Dehnung im Gefüge



Simulation der Wasserstoffkonzentrationsentwicklung im Gefüge



Werkstoffe unter Wasserstoffeinfluss berechenbar machen

Vorhersage der Ermüdungseigenschaften

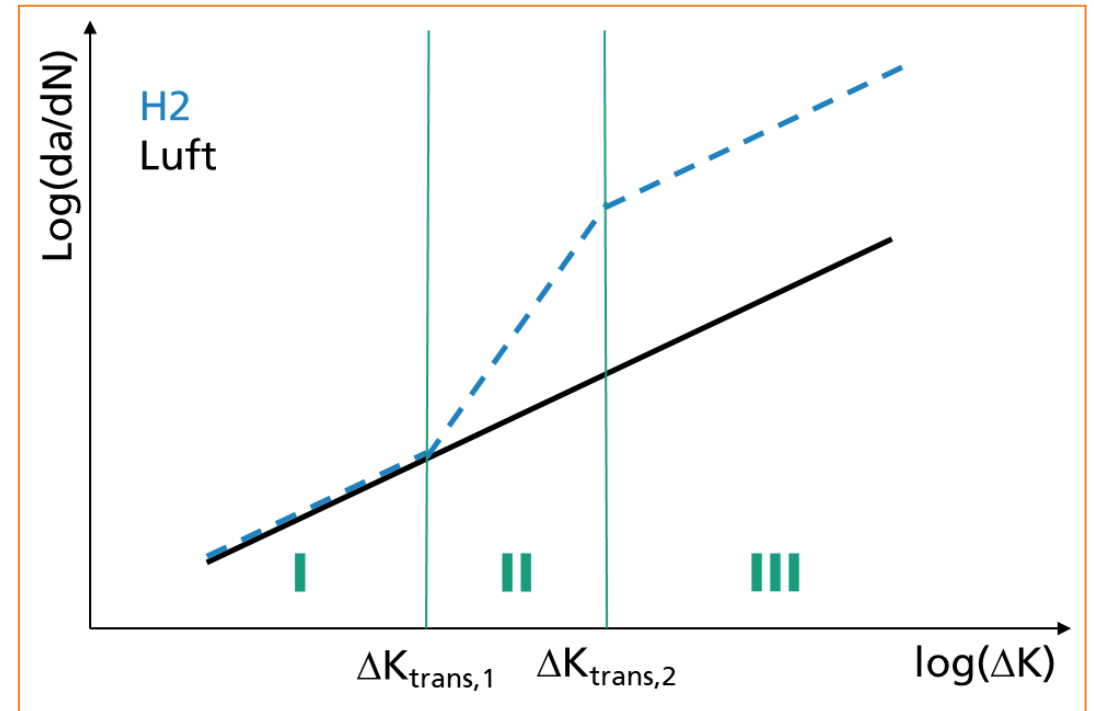
Zusammenhänge zwischen Anrisslebensdauer und Risswachstum

- LCF-Bereich: Anrisslebensdauer ist mikrorisswachstumsdominiert
- Mikroriss startet bei ca. 10 -50 μm und wächst bis ca. 1 mm
- Wenn man weiß wie Mikro- und Makrorisswachstum unter Wasserstoffeinfluss zusammenhängen kann aus einer (Makro)Risswachstumskurve die LCF-Lebensdauer berechnen

$$N_a = \int_{a_0}^{a_f} \frac{dn}{da} \cdot da$$

Thesen

- Wer Mikrorisse versteht, versteht auch LCF-Lebensdauern
- Mikro- und Makrorisse folgen an Luft den annähernd gleichen Gesetzen (elastisch-plastische Bruchmechanik)

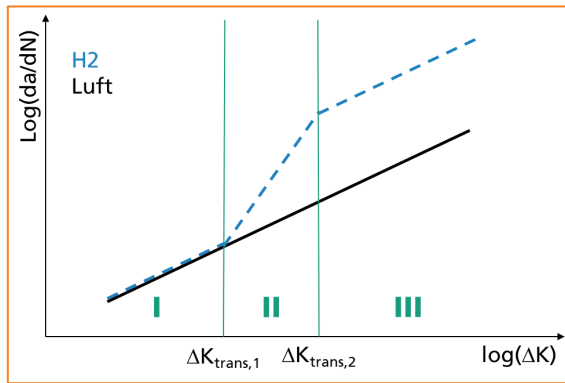


Werkstoffe unter Wasserstoffeinfluss berechenbar machen

Vorhersage der Ermüdungseigenschaften

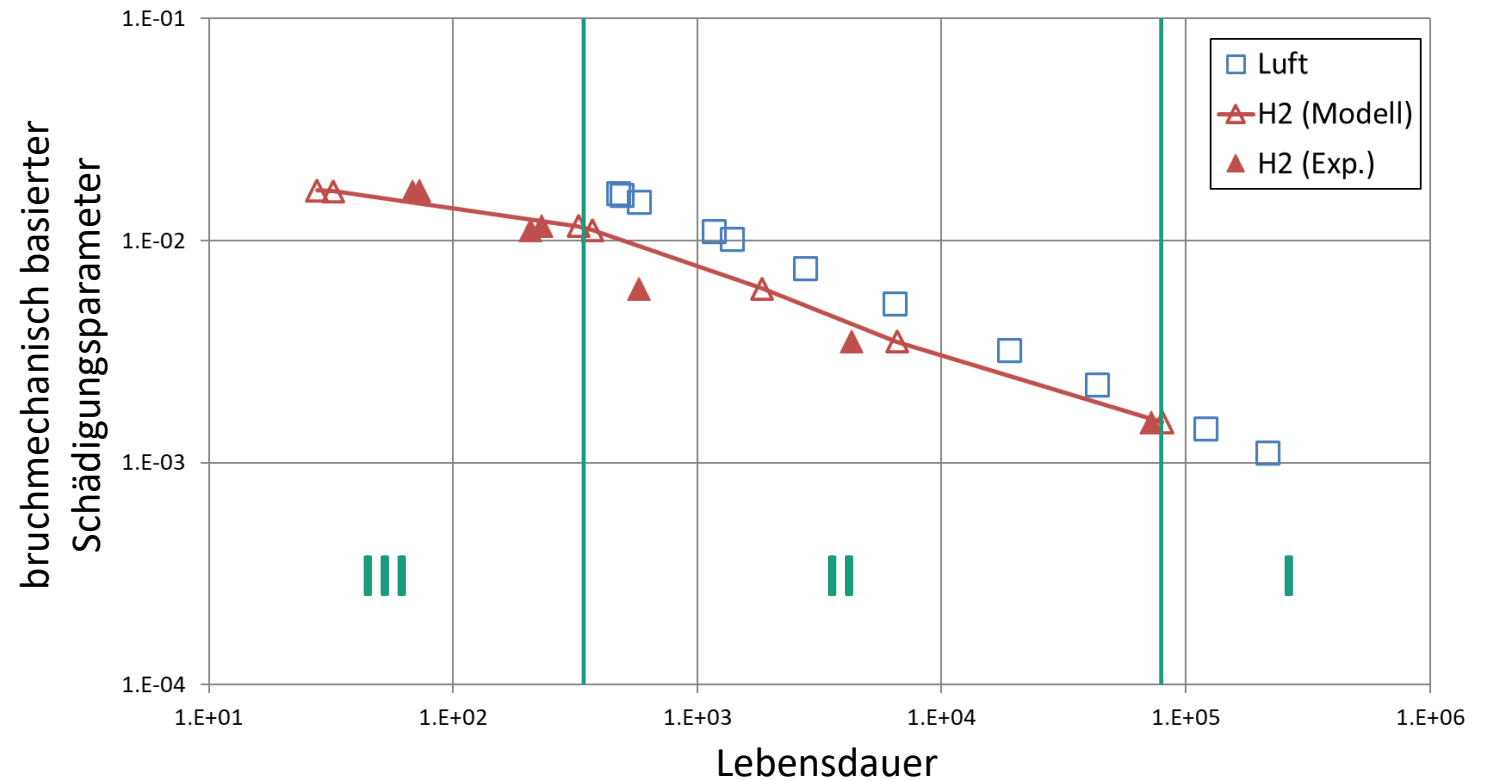
Zusammenhänge zwischen Anrisslebensdauer und Risswachstum

- Wir übertragen Kurzrissmodelle aus dem Hochtemperaturbereich auf Wasserstoff



- Benötigte Daten
 - Ermüdungsdaten an Luft
 - Risswachstumskurven an Luft und H2

Beispiel X56 Stahl



Fallbeispiel: Röhrenspeicher

Anwendung der ASME B31.12

Ziel: Wie konservativ ist das Regelwerk im Vergleich zu werkstoffspezifischen Kennwerten?

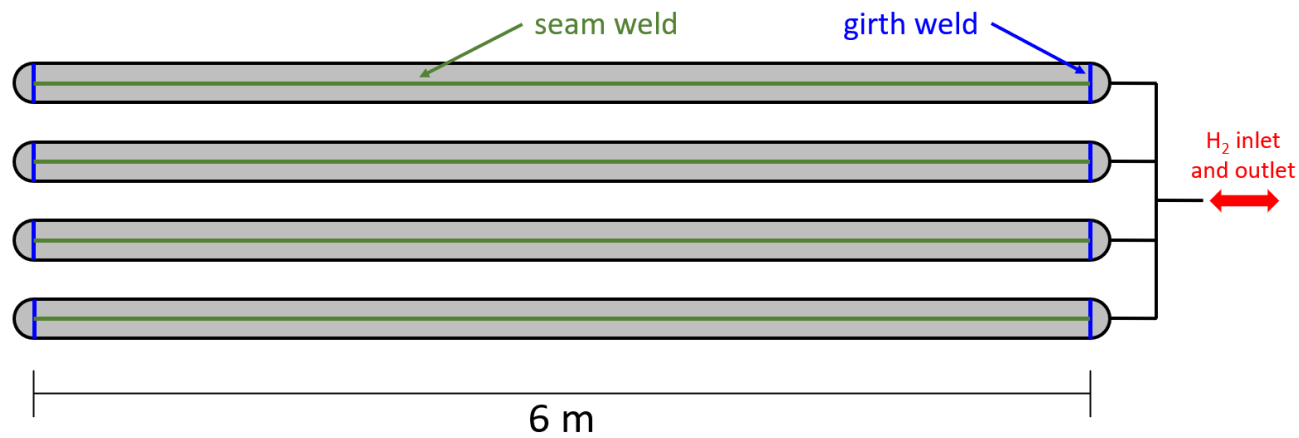


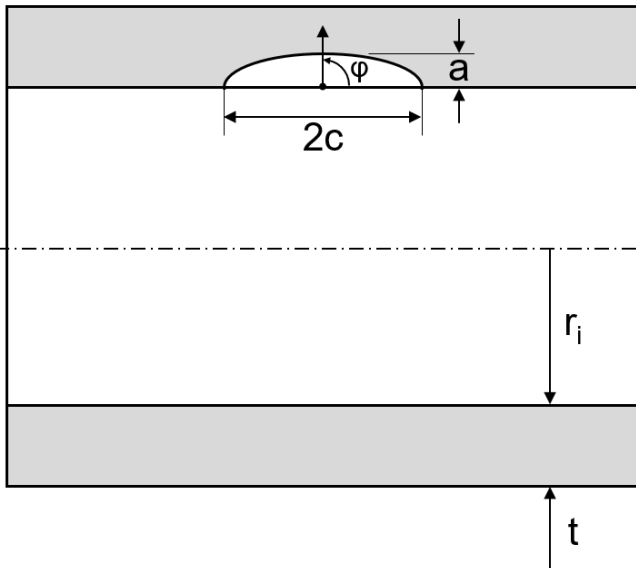
Photo: Copyright Saarstahl AG / Dirk Martin

Fallbeispiel: Röhrenspeicher

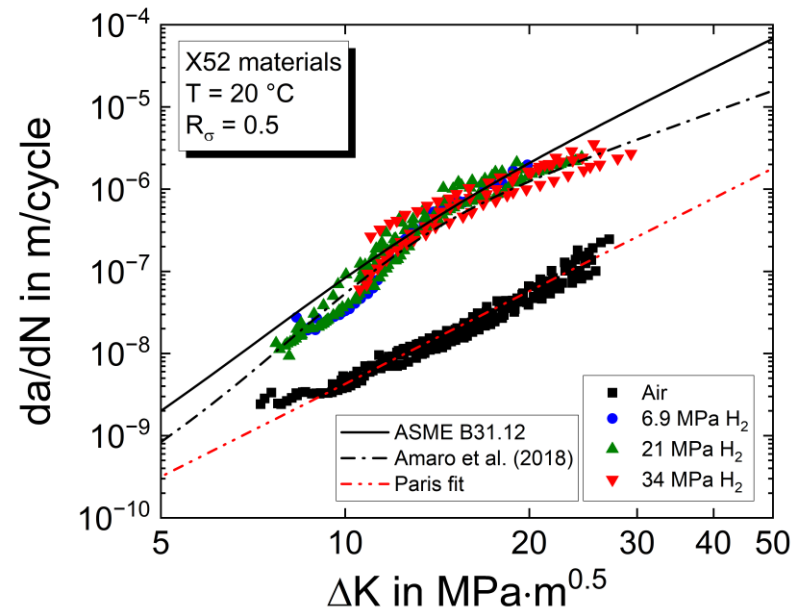
Anwendung der ASME B31.12

Ziel: Wie konservativ ist das Regelwerk im Vergleich zu werkstoffspezifischen Kennwerten?

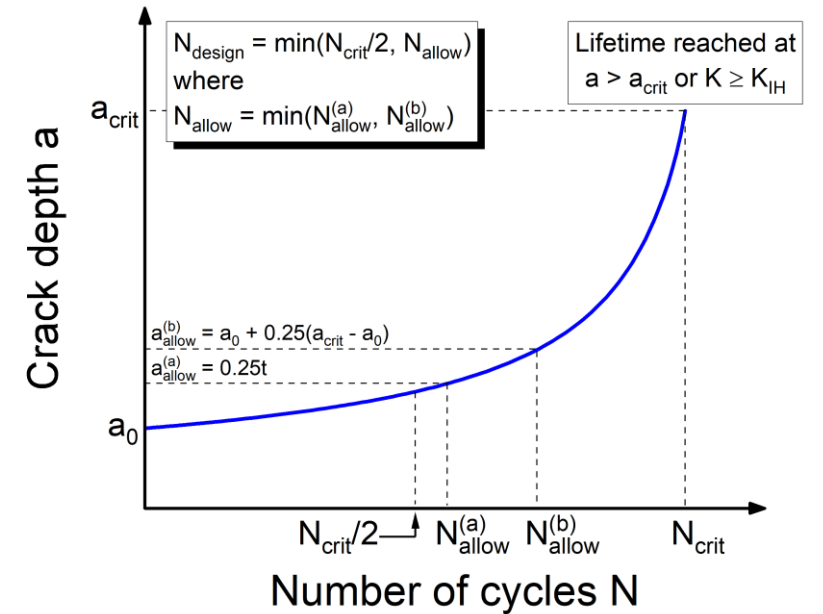
postulierter Anfangsdefekt
(a_0/c_0 , a_0/t)



Ermüdungsrisswachstum unter Wasserstoff durch Druckwechsel



Kriterien für die Design-Lebensdauer nach ASME B31.12

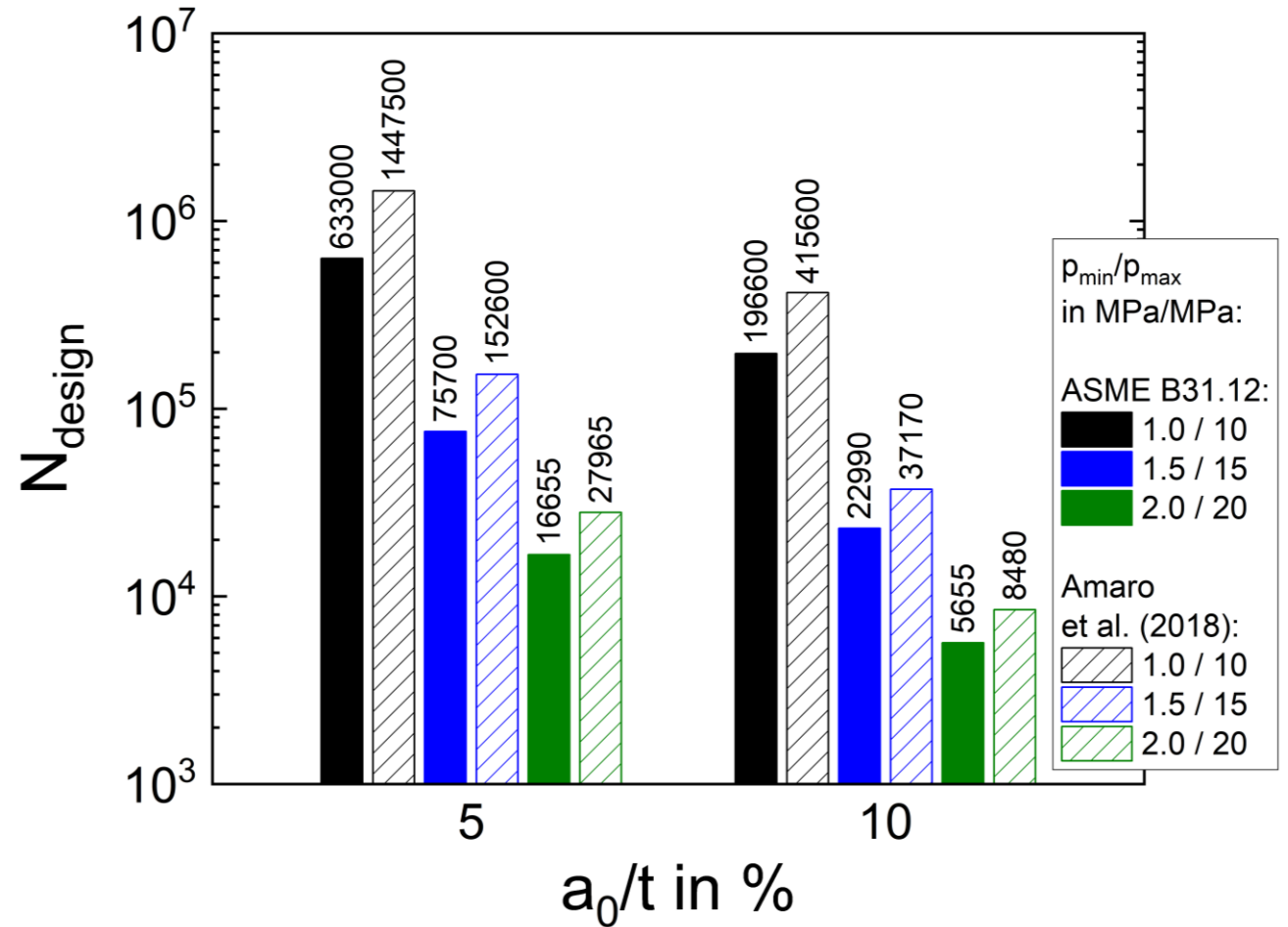
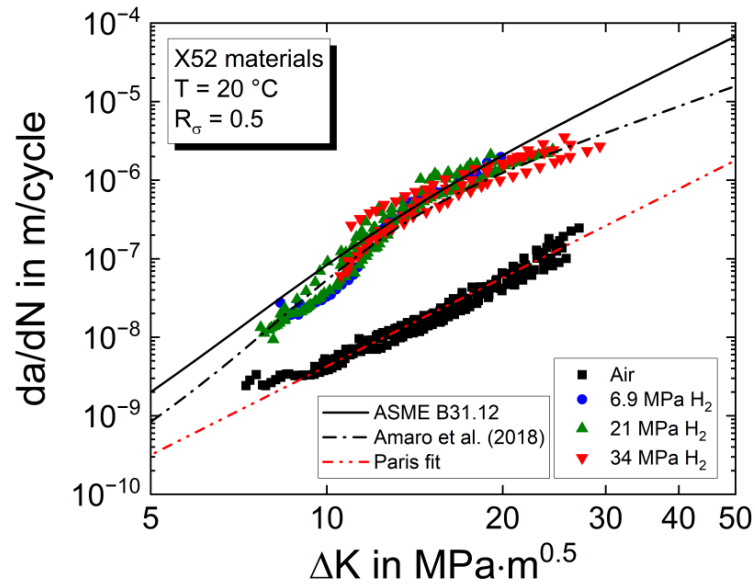


Fallbeispiel: Röhrenspeicher

Anwendung der ASME B31.12

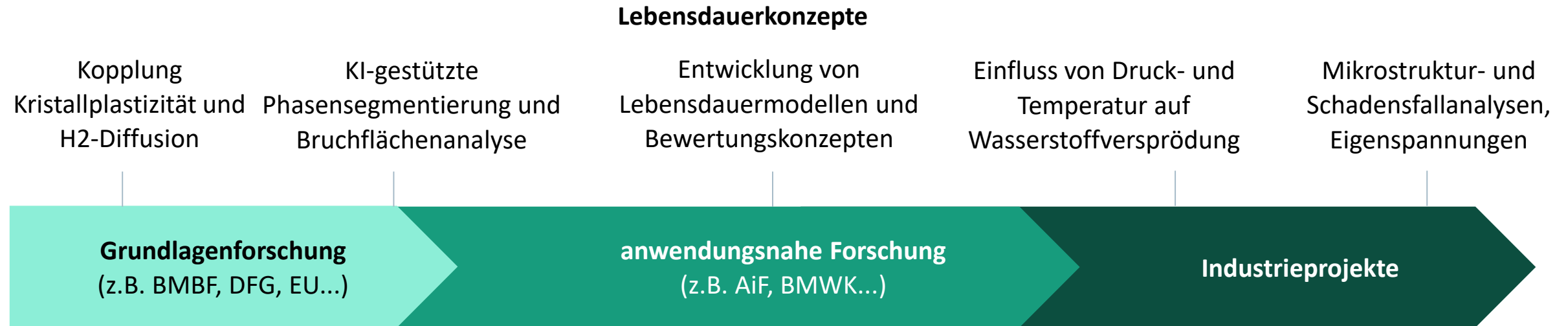
Ziel: Wie konservativ ist das Regelwerk im Vergleich zu werkstoffspezifischen Kennwerten?

- ASME B31.12: werkstoffunspezifisch und konservativ
- Amaro et al. (2018): werkstoffspezifisch für X52



Werkstoffe unter Wasserstoffeinfluss berechenbar machen

Reifegrad unserer aktuellen FuE-Themen



Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 03HY202F (TransHyDE) und 03HY301F (H2Mare) finanziell unterstützt



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen ?

Antworten: wasserstoff@iwm.fraunhofer.de

Dr. Christoph Schweizer
Fraunhofer IWM
Wöhlerstraße 11
79108 Freiburg

Telefon +49 (0)761 5142-382
christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de

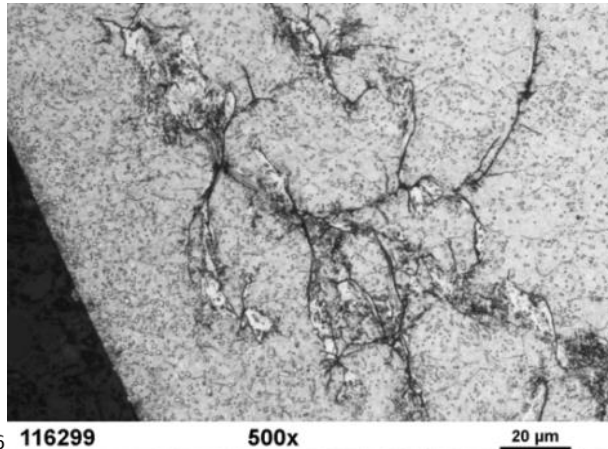
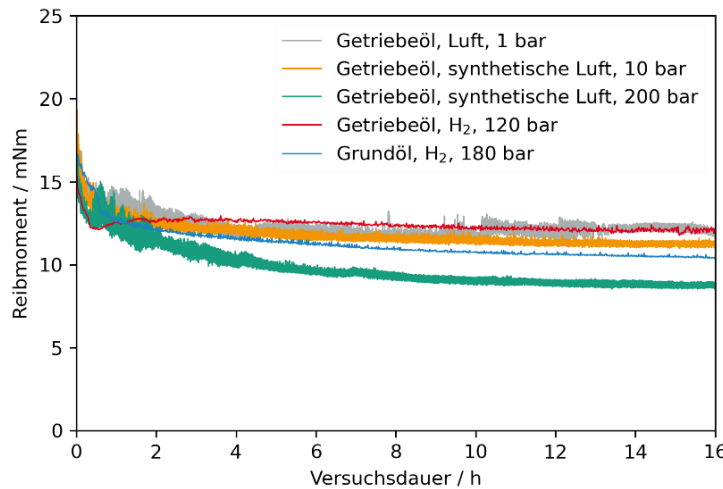
Wasserstoffinduzierte Ermüdung von tribologischen Kontakten

H₂-Tribolabor

H₂-Schadenslabor

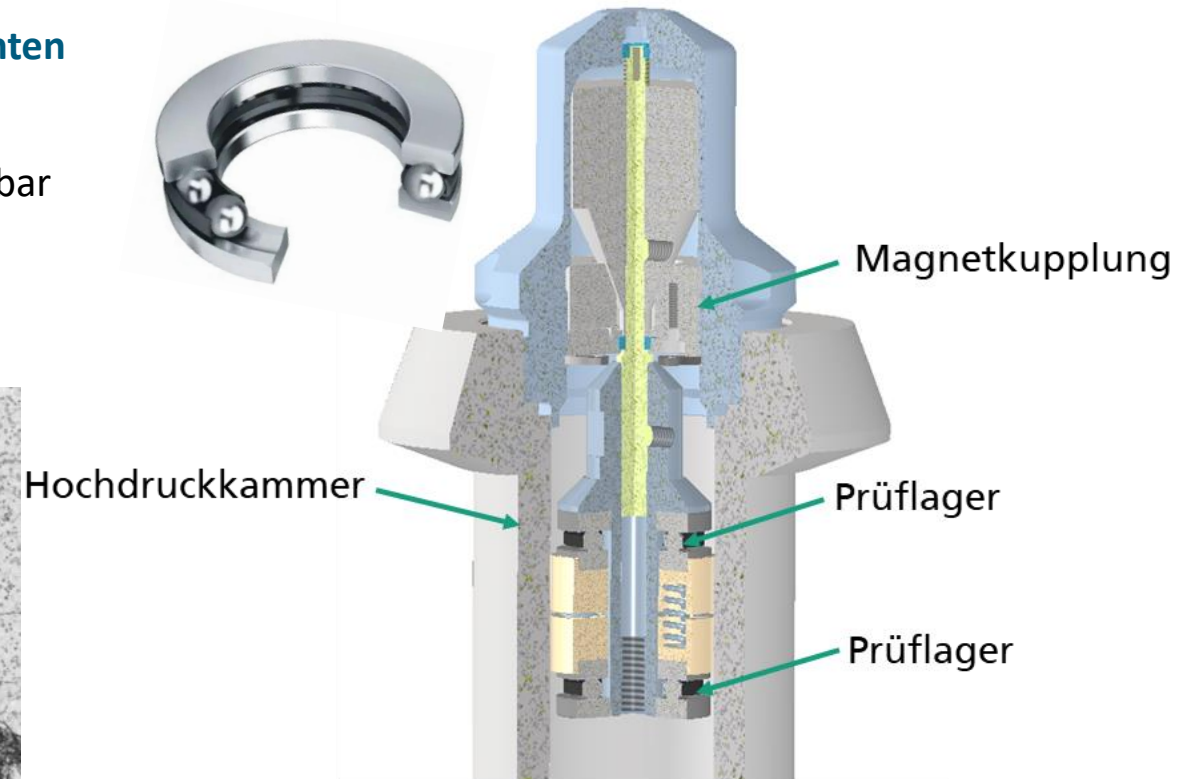
H₂-Simulabor

- Ziel: Lebensdauererhöhung von tribologischen Systemen unter erhöhten Wasserstoffkonzentrationen
- Wälz- und Gleitversuche unter Wasserstoffatmosphäre mit bis zu 300 bar
- Untersuchungen zum tribologischen Verhalten von Werkstoffen, Schmierstoffen, Beschichtungen in Wasserstoffatmosphäre



Möglich: Mikrostrukturanalyse der Schädigung (z.B.: White Etching Cracks, WEC)

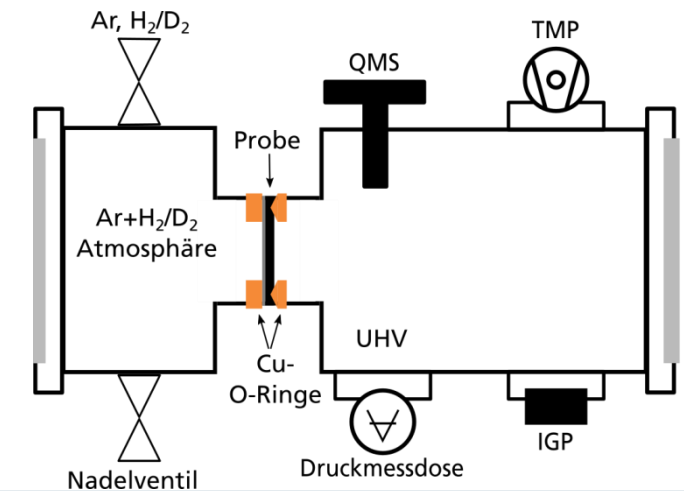
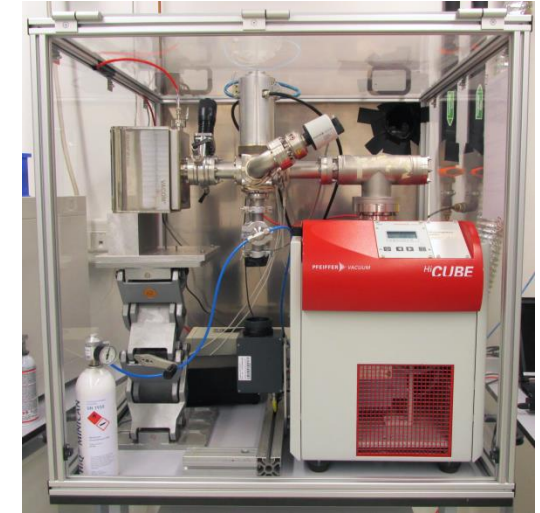
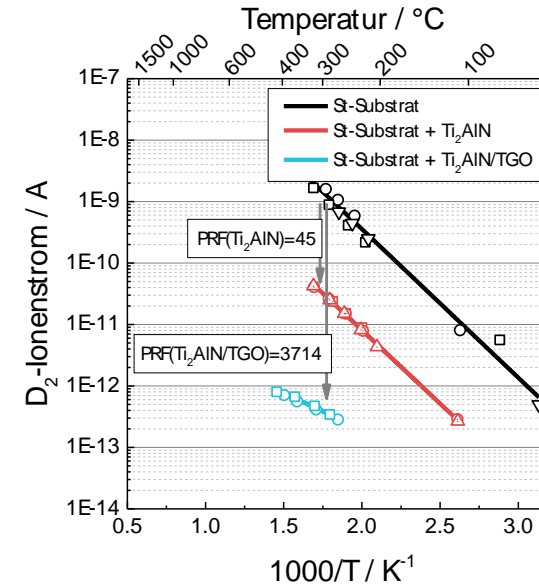
Erste Versuche mit dem Prüfaufbau mit unterschiedlichen Schmierstoffen, Atmosphären und Drücken



Wälzlagerprüfung in eine Hochdruckkammer am Rheometer MCR501 der Firma Anton Paar

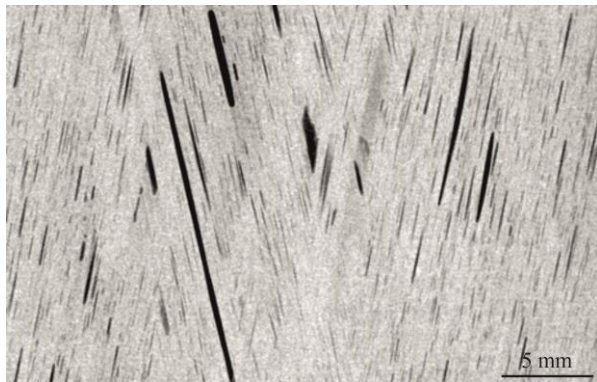
Barrierewirkung von Schichtsystemen

- Gas-Permeationsprüfstand
- Ermittlung von **Diffusionskoeffizienten**
- Berechnung der **Permeationsreduktionsfaktoren von Wasserstoffbarrierschichten**
- Ausstattungsdetails:
 - UHV-Technologie für hochsensitive Gasanalyse mittels Quadrupolmassenspektrometrie (QMS)
 - Verwendung des H₂-Isotops Deuterium (D₂) zur zweifelsfreien Detektion des Permeats
 - Probentemperatur: 30°C < T < ca. 300°C
- Probenmaterial:
 - **Metallbleche (Ø 33mm, 0,2 - 0,5 mm Dicke)**
 - **Polymerplatten (Ø 48mm, 1-2 mm Dicke)**



Probabilistische Bewertung von H₂-Hochdrucktanks

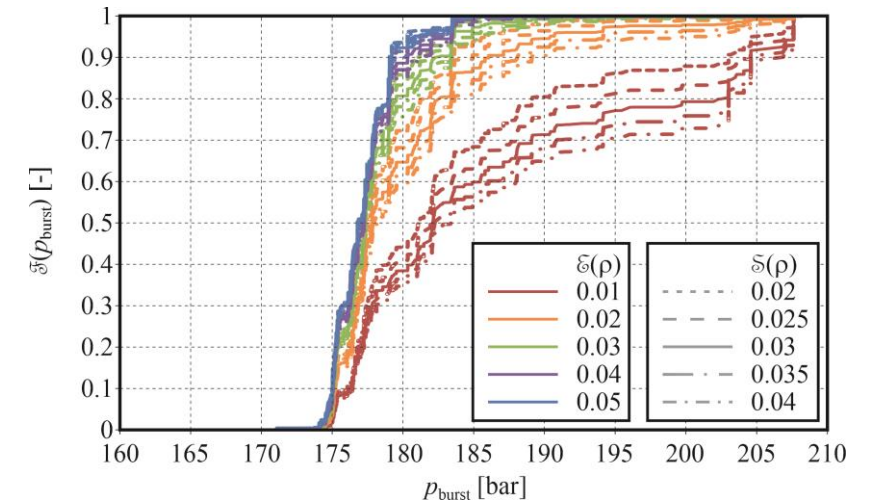
- Entwicklung von CFK H₂-Hochdrucktanks (1000 bar)
- Problemstellung:
 - inhärente, fertigungsbedingte Ungängen in CFK-Mantel
 - bilden Ausgangspunkte für Versagen
 - stochastisch verteilt
- Lösung: probabilistisches Bewertungskonzept
 - Analyse und Mapping relevanter Ungängen, stochastische Auswertung



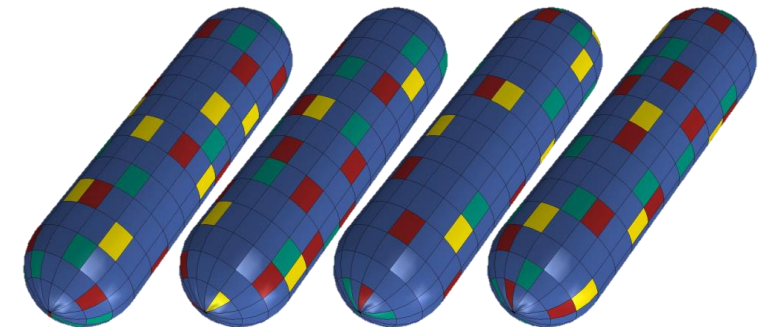
Tomographieaufnahmen von Schlauchporen im Referenzmaterial [1]

H₂-Simulabor

H₂-Schadenslabor



Ausfallwahrscheinlichkeit und Berstdruck für verschiedenen Defektdichten



Probabilistische Verteilung unterschiedlicher Defekte in stochastischen Hüllensimulationen gewickelter H₂-Hochdrucktanks.

[1] Kaufhold, C., Richter, F., Judt, P., Strohhäcker, J., Strubel, V., Jatzlau, P., Beckmann, C. & Schäuble, R. (2022). Challenges in the development of type 4-pressure vessels for high H₂ storage densities. IKV Coll. (Aachen, September08, 2022, in German).