



Auslegungsrichtlinien für Bauteile  
und Komponenten der  
Wasserstoffinfrastruktur




GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung





## Autorinnen und Autoren

Heiner Oesterlin – Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM

Dr. Thorsten Michler – Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM

## Zitationsvorschlag

H. Oesterlin, T. Michler, Auslegungsrichtlinien für Bauteile und Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur. doi:10.24406/publica-1164

## Mit besonderem Dank an die Reviewer

Dr. Ulrich Marewski – Open Grid Europe GmbH, Essen

Janina Senner – Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Essen

Thomas Systemans – DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Bonn



## Disclaimer

Die Erarbeitung des Positionspapiers erfolgte durch eine ausgewählte Autorenschaft des TransHyDE-Projekts Sichere Infrastruktur aus dem Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE. Die Inhalte der TransHyDE-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.



## Impressum

Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE  
Geschäftsstelle Kommunikation und Koordination  
E-Mail: [koordination@transhyde.de](mailto:koordination@transhyde.de)

cruh21 GmbH  
Erste Brunnenstraße 1  
20459 Hamburg

Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen  
und Geothermie IEG  
Gulbener Straße 23  
03046 Cottbus

Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion  
Stiftstraße 34-36  
45470 Mülheim an der Ruhr

# Inhaltsverzeichnis

01	Vorwort	S. 7
02	Hauptteil	S. 9
2.1	Wasserstoffversprödung metallischer Werkstoffe, insbesondere Stähle	S. 9
2.2	Auslegungsrichtlinien	S. 9
2.3	Optimierungskriterien und -potential	S. 11
03	Ausblick	S. 12

# Abbildungsverzeichnis

- S.10    Abbildung 1: Abhängigkeit der rechnerischen Lebensdauer in Abhängigkeit von der angenommenen Anrisstiefe nach ASME B31.12.

# Tabellenverzeichnis

- S.8 Tabelle 1: H<sub>2</sub>-Readiness wichtiger Auslegungsrichtlinien für Bauteile und Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur.

# 1

## Vorwort

Wasserstoff kommt in der Dekarbonisierung der Industrie und als Speichermedium in der Energiewende eine zentrale Bedeutung zu. Für den Transport und die Speicherung von Wasserstoff kann Deutschland auf eine großflächige bestehende Erdgasinfrastruktur zurückgreifen, die allerdings für den Betrieb mit Wasserstoff neu qualifiziert werden muss. Viele Industriezweige prüfen gerade, ob ihre Produkte für die aufzubauende Wasserstoffinfrastruktur verwendet werden können. Bei dieser Bewertung haben Auslegungsrichtlinien eine zentrale Bedeutung, da sie Handlungsanweisung geben, wie Unternehmen ihre Produkte nach dem aktuellen Stand der Technik bewerten müssen. Wichtige Auslegungsrichtlinien sind die Druckbehälterrichtlinie AD2000 (diese enthält alle Sicherheitsanforderungen der European Pressure Equipment Directive (2014/68/EU) und die Normenreihe EN13445 basiert auf der AD2000), die FKM-(Rechnerischer Festigkeitsnachweis von Maschinenbauteilen) Richtlinien für Bauteile und Komponenten des allgemeinen Maschinenbaus sowie die DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches)-Merkblätter/Arbeitsblätter G409, G463 und G464 für Pipelines. Der aktuelle Stand der Technik bei Wasserstoffanwendungen wird in der AD2000 und den FKM-Richtlinien gar nicht oder unzureichend abgebildet. Dies führt dazu, dass Firmen ihre Produkte nicht hinreichend bewerten können, was momentan ein großes Hindernis beim Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur darstellt. Insbesondere

das DVGW-Merkblatt G464 gibt für den Transport von Wasserstoff eine sehr gute Orientierung für eine Bewertung der bestehenden Pipelineinfrastruktur.

Die technische Herausforderung ist die sogenannte Wasserstoffversprödung, insbesondere von Stahl. Bei Kontakt mit Wasserstoffgas können diverse mechanische Eigenschaften verringert und somit die Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit (SLZ) von Bauteilen und Komponenten reduziert werden. Im DVGW-Merkblatt G464 zur Bewertung der „H<sub>2</sub>-Readiness“ von Pipelines ist dieser Mechanismus bereits integriert<sup>1</sup>. Aufbauend auf diesem Stand der Technik wurden im TransHyDE-Projekt Sichere Infrastruktur, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird, erste Bewertungskriterien für die Qualifizierung von Pipelines optimiert. Diese geben einen Einblick, welche potenziellen Verbesserungen bei Werkstoffen und Fertigungsverfahren den größtmöglichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben.

Ziel für kommende Forschungsaktivitäten ist, diesen Schädigungsmechanismus in den nächsten Jahren in weitere wichtige Auslegungsrichtlinien (AD2000 und FKM) zu integrieren und so den Unternehmen eine sichere Bewertung ihrer Bauteile und Komponenten zu ermöglichen (Tabelle 1).

Tabelle 1: H<sub>2</sub>-Readiness wichtiger Auslegungsrichtlinien für Bauteile und Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur.

	Anwendung	H <sub>2</sub> -Readiness
DVGW G406 DVGW G409 DVGW G463 DVGW G464 ASME B31.12	<p>Pipelines</p>  <p>iStock.com/Petmal</p>	ja
AD2000-S2	<p>Druckbehälter</p>  <p>iStock.com/Vanit Janthra</p>	eingeschränkt
FKM-Richtlinien	<p>Armaturen</p>  <p>iStock.com/insagostudio</p>	nein



# 2

## Hauptteil

### 2.1 Wasserstoffversprödung metallischer Werkstoffe, insbesondere Stähle

Pipelines, Rohre und Armaturen des Gastransportnetzes sind i. d. R. aus verschiedensten Stahlsorten gefertigt. Die SLZ dieser Bauteile und Komponenten wird unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften der Stähle berechnet. Wasserstoff kann als kleinstes existierendes Atom in den Stahl eindringen und so diverse mechanische Eigenschaften reduzieren. Der Effekt kann zu einem plötzlichen Versagen des Bauteils führen. Werkstoffprüfungen zum Einfluss von Wasserstoff auf die mechanischen Eigenschaften sind aufwendig und nur wenige Labore in Deutschland, Europa und weltweit sind in der Lage, diese durchzuführen.

In den BMBF geförderten Wasserstoff-Leitprojekten TransHyDE und H<sub>2</sub>Mare werden einfache Prüfapparaturen entwickelt und verschiedene Stähle systematisch auf ihre Möglichkeit zur Wasserstoffversprödung hin untersucht. Da beim Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur nicht alle am Markt erhältlichen Stähle experimentell geprüft werden können, werden in Kombination mit numerischen Simulationen zur Interaktion von Wasserstoff mit der Legierungsstruktur, konservative Grenzwerte für nicht geprüfte Stähle der gleichen Werkstoffklasse ermittelt.

### 2.2 Auslegungsrichtlinien

Die Druckbehälterrichtlinie AD2000, die FKM-Richtlinien für Bauteile und Komponenten des allgemeinen Maschinenbaus sowie das DVGW-Merkblatt G464 für Pipelines decken einen großen Teil der Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur ab. Bei allen Auslegungsrichtlinien steht der sichere Betrieb der Transport- und Speichersysteme im Mittelpunkt. Die getroffenen Annahmen in diesen Auslegungsrichtlinien sind konservativ, um einen sicheren Betrieb oder Neubau zu gewährleisten.

Im deutschen Mittelstand häufig angewandte und akzeptierte Auslegungsrichtlinien sind die FKM-Richtlinien. Diese werden für die Auslegung einer Vielzahl von Bauteilen und Komponenten verwendet. Zum jetzigen Zeitpunkt beinhalten diese Richtlinien jedoch noch nicht den Anwendungsfall „Wasserstoff“, so dass diese Richtlinien zur Bewertung von Bauteilen und Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur nur sehr eingeschränkt herangezogen werden können. Erste Ansätze zur Erweiterung der FKM-Richtlinien hinsichtlich Wasserstoff wurden im BMWK-Förderprojekt MathyP (2018-2021) formuliert. Ein Folgeprojekt startete Anfang 2023 (IGF-Projekt Bauteilberechnung unter Wasserstoff-Einfluss), weitere parallele Projekte sind jedoch erforderlich, um schnell eine Auslegungsrichtlinie für diese Anwendungen zur Verfügung stellen zu können.

Die fachgerechte Konstruktion von Druckbehältern regelt die Druckbehälterrichtlinie AD2000. In diesem Regelwerk wird für Wasserstoffanwendungen ein pauschaler Sicherheitsfaktor von 10 gefordert, was i. d. R. zu einer sehr konservativen Auslegung führt. Eine Aktualisierung dieser Richtlinie ist von großem wirtschaftlichem Interesse, da neuste Forschungsergebnisse aus TransHyDE auf eine Reduzierung des Sicherheitsfaktors hindeuten. Die Wasserstofftauglichkeit von Pipelines kann mit Hilfe des DVGW-Merkblattes G464 bewertet werden. Diese Richtlinie lehnt sich stark an das amerikanische Regelwerk ASME B31.12 an, so dass hier eine transatlantische Kompatibilität gegeben ist. Diese Richtlinien sind die am weitesten entwickelten für Wasserstoffanwendungen und zeigen ein prinzipielles Vorgehen für die Integration des Anwendungsfalls Wasserstoff. Die Vorgehensweise wird im Folgenden kurz beschrieben.

Bauteile werden vom Hersteller vor der Auslieferung auf Defekte geprüft. Es gibt kleinste feststellbare Defekte, die u. a. vom verwendeten Prüfverfahren abhängen. Für die Bewertung wird konservativ angenommen, dass im Bauteil ein Defekt vorliegt, der genau unter der Nachweisgrenze des verwendeten Prüfverfahrens liegt.

Bauteile sind im Betrieb Druckschwankungen ausgesetzt. Diese Belastungsänderungen lassen einen möglichen Defekt wachsen, bis er eine kritische Risstiefe erreicht hat. Bei Erreichen der kritischen Risstiefe wird ein plötzliches Versagen des Bauteils möglich.

Die Anzahl der zulässigen Belastungszyklen ergibt sich so rechnerisch aus

- der Belastungssituation des Bauteils,
- der Bauteilgeometrie,
- der anzunehmenden Anfangsdefektgröße – maßgeblich abhängig vom verwendeten Prüfverfahren,
- der Risswachstumsgeschwindigkeit unter Druckwasserstoff und
- der Risszähigkeit unter Druckwasserstoff.

Bei jedem der genannten Einflüsse werden im Rahmen der Genauigkeit konservative Werte verwendet. Als Beispiel ist die anzunehmende Anfangsdefektgröße in Abbildung 1 dargestellt. Eine häufige konservative Annahme ist, dass ein Defekt mit einer Tiefe von 10 % der Pipelinewanddicke sicher erkannt wird. Wenn es gelingt, Messverfahren zu entwickeln, die Defekte mit einer Tiefe von 5 % sicher erkennen, erhöht sich die rechnerische Lebensdauer ungefähr um einen Faktor 3, bei einer Defekttiefe von 2,5 % sogar um einen Faktor von über 9. Die rechnerische Grundlage – die Bruchmechanik – ist seit Jahrzehnten hinreichend etabliert und verifiziert. Aufgrund dieser Kontinuität ist Erfahrung zur Anwendung dieser Bewertungsmethode in den Unternehmen der Bauteilfertigung, Auslegung und Betrieb von Transportsystemen in vielen Fällen vorhanden. Der Wasserstoffeinfluss zeigt sich in den letzten beiden verwendeten Materialkennwerten (Risswachstumsgeschwindigkeit und Risszähigkeit).

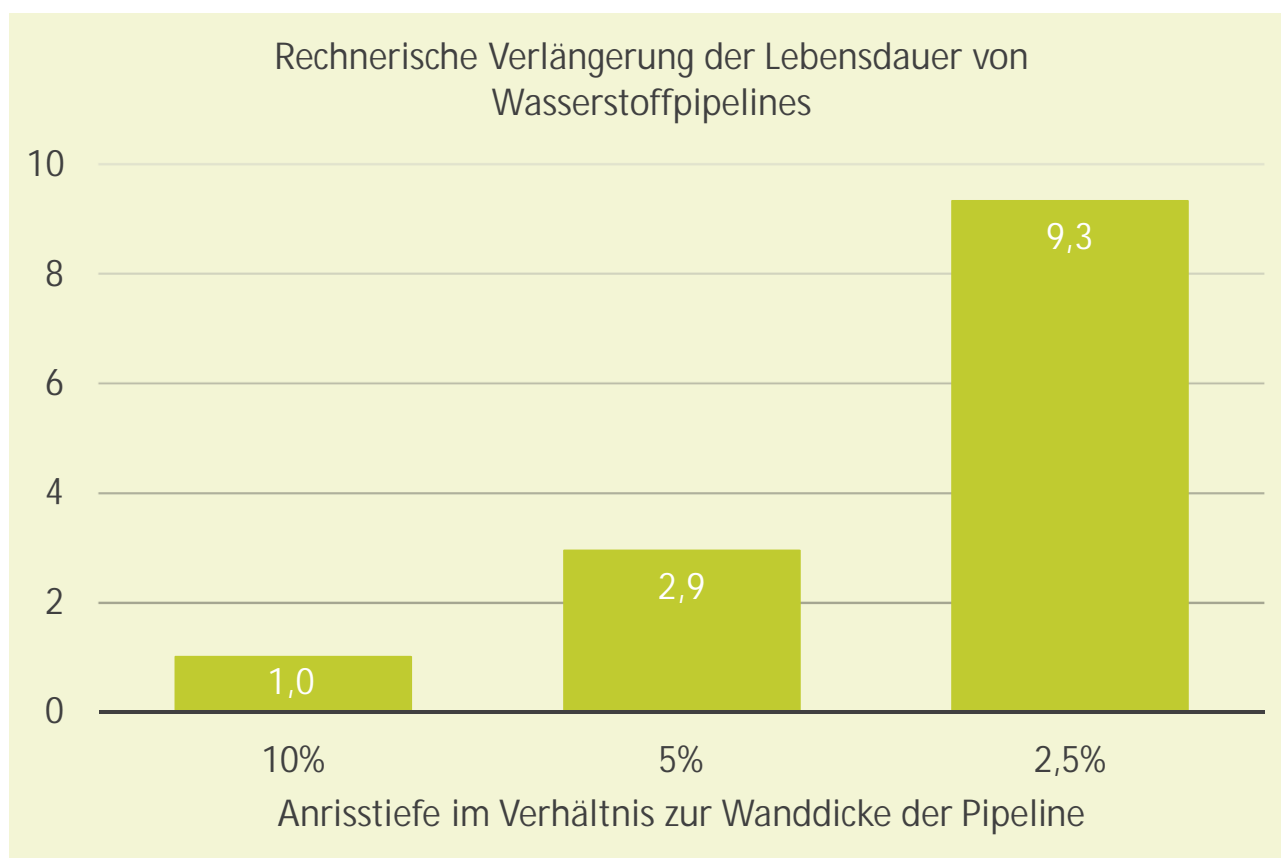
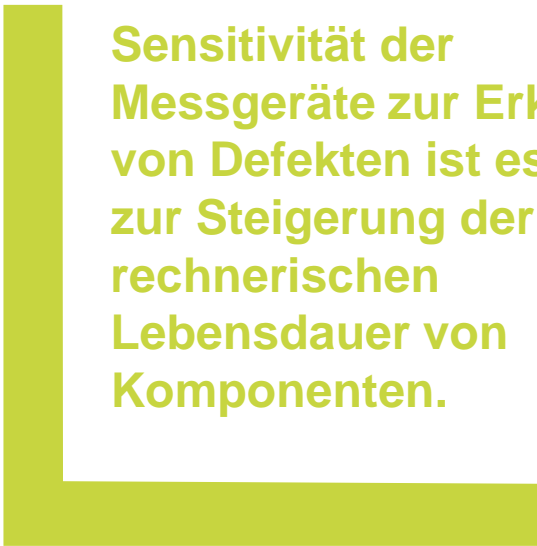


Abbildung 1: Abhängigkeit der rechnerischen Lebensdauer in Abhängigkeit von der angenommenen Anrisstiefe nach ASME B31.12.



**Sensitivität der Messgeräte zur Erkennung von Defekten ist essentiell zur Steigerung der rechnerischen Lebensdauer von Komponenten.**

### 2.3 Optimierungskriterien und -potential

Für neu zu errichtende Speicher- und Transportsysteme für gasförmigen Wasserstoff ist es erforderlich, in der Konstruktion, der Werkstoffauswahl, der Fertigung und Prüfung, den Wasserstoffeinfluss berücksichtigen zu können. Die in TransHyDE formulierten Bewertungskriterien ermöglichen hierbei die Optimierungsbereiche mit dem größtmöglichen Potenzial zu identifizieren. Zu diesem Zweck wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt und mögliche Szenarien wie verbesserte Werkstoffe, Bauteilprüfungen und Prüfmethode zur Defektdetektion verglichen.

Besonders großes Optimierungspotenzial kommt demnach der Defektdetektion durch zerstörungsfreie Prüfung nach erfolgter Fertigung sowie der wiederkehrenden Prüfung eines bereits installierten Systems zu. Für besonders kritische Anlagenteile kann eine Einzelprüfung der verbauten Bauteile in Betracht gezogen werden. Die Optimierung der chemischen Zusammensetzung der Stähle und der dazugehörigen Wärmebehandlung mit dem Ziel, den schädigenden Einfluss des Wasserstoffs zu reduzieren, bietet ebenfalls Potenzial. Auch dies ist Bestandteil von TransHyDE.

# 3

## Ausblick

Die sichere Nutzung bestehender Transportinfrastruktur für Wasserstoff sowie dessen effizienter Neubau haben für die Dekarbonisierung der industriellen Produktion und für das Gelingen der Energiewende einen hohen Stellenwert, da sie einen großen Beitrag zur Versorgungssicherheit Deutschlands mit grüner Energie leisten. Transportnetzwerke in das europäische Ausland und darüber hinaus ermöglichen des Weiteren einen internationalen Wasserstoffmarkt mit relativ geringen Transportkosten. Insbesondere den Import von grünem Wasserstoff aus Ländern mit Überschuss an erneuerbarer Energie. Das DVGW-Merkblatt G464 ermöglicht eine sichere, konservative Bewertung und die im BMBF geförderten Leitprojekt TransHyDE formulierten Bewertungskriterien stellen einen wichtigen Beitrag zur weiteren Optimierung dar. Diese werden im bis 2025 laufenden Projekt durch ermittelte Kennwerte ergänzt. Parallel werden Prüfverfahren weiter verbessert. In enger Kooperation der beteiligten Forschungsstellen und Industrieunternehmen sollen die Bewertungskriterien schlussendlich Einzug in deutsche und internationale Normen und Verbandsrichtlinien halten. In dieser Form sind die Erkenntnisse auch für nicht beteiligte Unternehmen – insbesondere kleine und mittlere Unternehmen – anwendbar und können einen Beitrag zum sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der deutschen Wasserstoffwirtschaft leisten.

Eine große Lücke besteht bei der Bewertung der

Wasserstofftauglichkeit von Druckspeichern und weiteren Bauteilen und Komponenten, bei denen häufig die AD2000- oder FKM-Regelwerke verwendet werden. Hier besteht großer Handlungsbedarf, die „H<sub>2</sub>-Readiness“ dieser Regelwerke zu entwickeln. Weitere Details sind in <sup>2</sup> publiziert.

# Literaturangaben

- (1) U. Marewski, M. Steiner, Stickprobenartige Überprüfung von Stahlwerkstoffen für Gasleitungen und Anlagen zur Bewertung der Wasserstofftauglichkeit, 3R-Rohre 02-03 (2023)
- (2) C. Fischer, S. Fliegener, H. Oesterlin, T. Michler, S. Höhler, A. Mondry, P. Ertault de la Bretonniere, Codes and standards for the fatigue-based design of hydrogen infrastructure components, Int. J. Fatigue. 171 (2023) 107564. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107564>.