Vulkan Verlag

SONDERDRUCK
Heft 04/2021

Industrie**armaturen**
Dichtungstechnik

Industriearmaturen für anspruchsvolle H_2-Anwendungen

JOACHIM RÖDIGER
STÖHR ARMATUREN GmbH & Co KG

Industriearmaturen für anspruchsvolle H_2-Anwendungen

JOACHIM RÖDIGER

Armaturen zur Verarbeitung von Wasserstoff sind langjährig auf dem Markt verfügbar und insbesondere für tiefkalte Temperaturen bereits seit den 1960er Jahren. Beispiele für heutige Anwendungen sind u. a. in der Gase-Industrie, der Raumfahrt (Wasserstoff- und Sauerstoffversorgung für Launcher-Triebwerke sowie Teststände), bei Nutzfahrzeugen (Stadtbusse) oder in der Marinetechnik (U-Boot 212 mit Brennstoffzellentechnik) zu finden. Im vorliegenden Fachbericht werden die verschiedenen Anforderungen an Armaturen mit dem Einsatzfeld Wasserstoff näher erläutert. Ein besonderer Blick liegt dabei auf den zukünftigen Wasserstoff-Anwendungen, die im Vergleich zu den bisherigen technisch erheblich anspruchsvoller sein werden, was sich ebenso auf die hierfür benötigte Armaturentechnik auswirkt.

Die sich aktuell in Entwicklung befindlichen Projekte für zukünftige Anwendungen der „ersten Welle" mit einem industriellen Reifegrad bzw. ersten Einsatz in den nächsten zwei bis drei Jahren liegen voraussichtlich in der zivilen Schifffahrt (u. a. Fähren), bei Lkws sowie in der Wasserstoff-Erzeugung und -Speicherung (H_2-Infrastruktur).

Für andere Anwendungen wurde bereits mit der Entwicklung begonnen, allerdings wird ein industrieller Reifegrad und Praxiseinsatz (über die Prototypenphase hinaus) erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt erwartet. Hierzu zählen u. a. die Luftfahrt, die Bahntechnik oder militärische Überwasserfahrzeuge (Fregatten).

Aus Sicht der Armaturenhersteller sind die neu aufkommenden H_2-Anwendungen gegenüber heutigen Anwendungen unter anderem gekennzeichnet durch:

- zunehmend mobile Anwendungen mit sehr hohen und spezifischen Anforderungen für den individuellen Einsatz;
- noch nicht vollständig bekannte oder definierte technische Spezifikationen (z. B. Einbausituation von Tank und Absperrarmatur, Regelstrecke), sowie auch noch nicht abschließend definierte Nutzungsprofile und Einsatzszenarien/Missionen;
- fehlende bzw. noch unvollständige Definition des spezifischen Regelwerks (bezüglich Auslegung, Materialanforderungen, Test- und Prüfvorschriften).

Deshalb bleibt zunächst nur die Orientierung an bestehenden Richtlinien für Druckbehälter (Europäische Druckgeräte-Richtlinie und AD-2000) und die heutige Praxis.

ANFORDERUNGEN AN ARMATUREN FÜR ANSPRUCHSVOLLE H_2-ANWENDUNGEN IM ÜBERBLICK

Zukünftige H_2-Anwendungen werden technisch erheblich anspruchsvoller sein, was sich ebenso auf die hierfür benötigte Armaturentechnik auswirkt. In vielen Fällen wird dies nicht mit heute verfügbaren Standardprodukten aus dem Regal erfüllt werden können, sondern spezifische Entwicklungen/Anpassungen erfordern (**Bild 1**). Nachfolgend sollen einige dieser Anforderungen vertiefend betrachtet werden.

Anforderungen im Einzelnen

Medium und Medientemperatur

Unter dem Sammelbegriff „Wasserstoffanwendungen" tauchen unterschiedliche Begrifflichkeiten auf, die sich unter anderem nach Medientemperatur (tiefkalt, kalt,

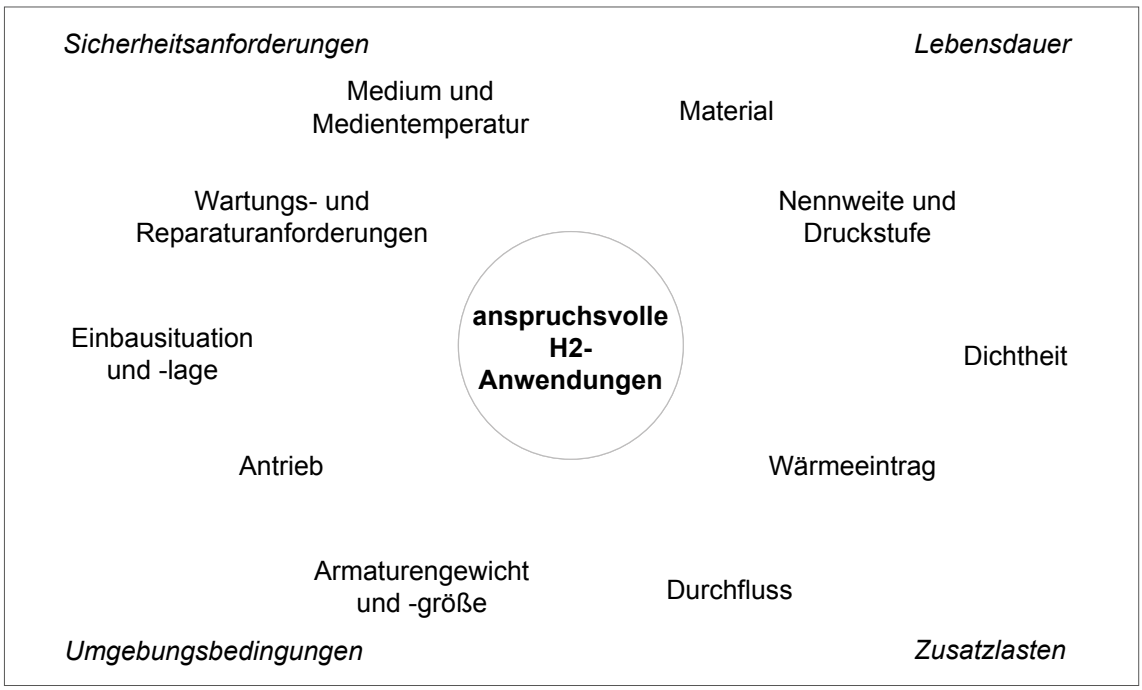


Bild 1: Anforderungen an Armaturen für anspruchsvolle H2-Anforderungen im Überblick

warm) und Aggregatszustand (flüssig, gasförmig) unterscheiden lassen (**Tabelle 1**). Auch Wasserstoff-Verbindungen zählen im weiteren Sinne dazu.

Material

Armaturen für Wasserstoffanwendungen müssen neben den grundsätzlichen Vorgaben der bestehenden Regelwerke (z. B. DGRL-Modul H, AD-2000 HP0) auch erweiterte Anforderungen an die Medienverträglichkeit erfüllen und die dabei auftretende Wasserstoffversprödung ausschließen. Hierzu werden austenitische Edelstähle aus der 316L/N-Familie eingesetzt, die die Dichtheitsanforderung (Diffusion der H_2-Moleküle durch das Material) sowie Kaltzähigkeit (bei tiefkalten Temperaturen) erfüllen.

Bei tiefkalten Medientemperaturen ist es wichtig, dass Kaltlecks vermieden werden. Hierunter wird eine temperaturabhängige, temporäre Leckage des Druckkörpers nach außen verstanden, die einen Medienverlust nach sich zieht. Besonders nachteilig sind Kaltlecks bei Isolierung der Armatur nach außen mittels Vakuum, da die Leckage das Vakuum brechen würde. Deshalb ist die Verwendung von Edelstahl-Gussmaterial bei tiefkalten Temperaturen nicht angeraten. Dem kann nur durch die Verwendung von Vollmaterial mit besonderer Behandlung (Elektroschlacke-Umschmelzverfahren (ESU) begegnet werden. Bei Armaturen mit großen Nennweiten (> DN 100 bis DN 300) kommt i. d. R. gewalztes oder geschmiedetes Material zum Einsatz.

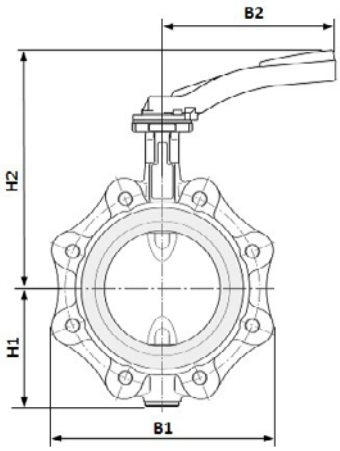
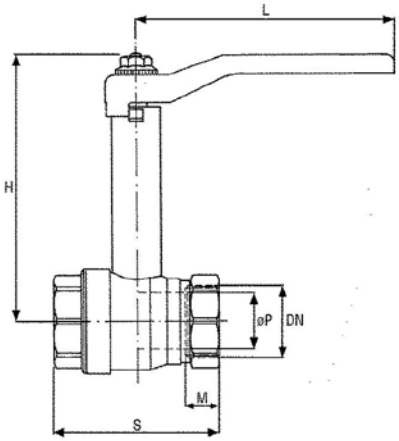
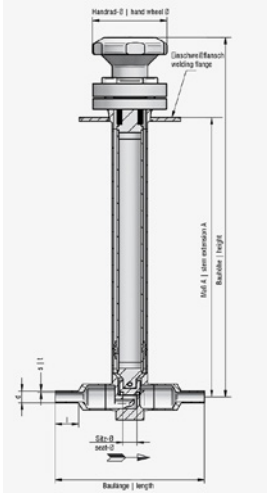
Tabelle 1: Begrifflichkeiten in Zusammenhang mit Wasserstoffanwendungen

Bezeichnung	Medientemperatur [Kelvin (Celsius)]	Aggregatszustand	Bemerkung
sLH_2 / LH_2	20 K (-253° C)	flüssig	tiefkaltes flüssiges Gas, sehr flüchtig
Cryo-compressed H2 (CcH_2)	30K bis 340K (bei Speicherdruck bis 35 MPa)	gasförmig	Unter hohem Druck gespeichertes Gas
GH_2	243 bis 323 K (-30° bis +50° C)	gasförmig	„warmes“ Gas
„H2 ready“	0 K (273° C)	gasförmig	Beimischung von Wasserstoff, z. B. zu Erdgas (bis zu 20 Volumenprozent)
Methanol (CH_3OH)	338 K (65° C)	flüssig	klare, farblose, entzündliche und leicht flüchtige Flüssigkeit mit alkoholischem Geruch
Ammoniak (NH_3)	240 K (-33° C)	gasförmig	stark stechend riechendes, farbloses und giftiges Gas

Tabelle 2: Leckage unterschiedlicher Abdichtungsarten nach außen

Abdichtung nach außen	Leckage (mbar*l/sec)	entspricht Gasverlust
Stopfbuchspackung	$1x\ 10^{E-3}$	1 cm^3 Gas in 15 min
O-Ring	$1x\ 10^{E-6}$	1 cm^3 Gas in 10 Tagen
Faltenbalg	$1x\ 10^{E-8}$	1 cm^3 Gas in 3 Jahren

Tabelle 3: Dichtheit im Ventilsitz bei verschiedenen Arten von Armaturen

Abdichtung im Sitz	Leckage (mbar*l/sec)	Konstruktionsbeispiel
Absperrklappe	$1x\ 10^{E-3}$	
Kugelhahn	$1x\ 10^{E-4}$	
Sitzventil	$1x\ 10^{E-6}$	

Nennweiten (DN), Druckstufe (PN)

Für mobile Wasserstoffanwendungen, insbesondere zur Versorgung einer Brennstoffzelle, kommen in der Regel relativ kleine Nennweiten (bis DN 25) bei niedrigen Druckstufen von 5 bis 10 bar zum Einsatz. Mittlere Nennweiten (DN 25 bis DN 100) werden tendenziell bei der Speicherung großer Wasserstoffmengen in Verbindung mit hohen Durchflusskoeffizienten und ggf. hohen Druckstufen angewendet, ebenso wie in Verteilzentren zur Entnahme und Beladung. Große Nennweiten (> DN 100) kommen überwiegend beim Wasserstofftransport zur Einspeisung in Gaspipelines sowie bei der späteren Gastrennung zum Einsatz.

Zur technisch dichten Abdichtung benötigte Faltenbälge sind derzeit auf dem Markt nur bis zu einer Druckstufe von bis zu PN 420 verfügbar, die die Auslegung entsprechender Armaturen druckseitig begrenzen. Um für zukünftige Anwendungen höhere Druckstufen bis zum Nenndruck von PN 1.000 bar darstellen zu können, wurden frühzeitig Entwicklungen eingeleitet, so dass solche Faltenbälge heute zur Verfügung stehen. Die derzeit in Entwicklung befindlichen Projekte nutzen dies noch nicht voll aus und fordern eine Absperrung bei PN 500 bis 650 bar.

Dichtheit nach außen

Die Dichtheit nach außen bezeichnet das Entweichen des Mediums in die unmittelbare Umgebung. Gleichzeitig wird die Diffusion von Luftfeuchtigkeit in das Medium unterbunden. Sie muss an der Verbindung des oberen Gehäusedeckels mit dem Gehäuse sowie am Einlass der Ventilspindel ins Gehäuse gewährleistet sein. Eine Leckage soll sowohl aus Sicherheitsgründen (Explosionsgefahr, Gasvergiftung in geschlossener Umgebung) als auch aus wirtschaftlichen Gründen (Medienverlust) generell minimiert werden. Bei mobilen Anwendungen kommt hinzu, dass dadurch auch die Reichweite/Betriebsdauer eingeschränkt wird.

Die Dichtheit gegen die Umgebung hängt von der Art der verwendeten Abdichtung des Druckkörpers nach außen ab (**Tabelle 2**). Während sich die statische Abdichtung zwischen Gehäusedeckel und Gehäuse als unproblematisch darstellt, ist die dynamische Abdichtung zwischen Ventilspindel und Gehäusedeckel (z. B. durch Stopfbuchspackung, Elastomer-O-Ring oder Faltenbalg) in Bezug auf Leckage deutlich kritischer. Die Stopfbuchsabdichtung weist die höchsten Werte auf und ist auch in ihrer Einsatzdauer limitiert.

Dichtheit im (Ventil-) Sitz

Die Dichtheit im (Ventil-)Sitz bezeichnet die Qualität der Absperrung des Mediums in der Medienleitung. Die Dichtheit im Sitz ist abhängig von der Art der verwendeten Abdichtung (Konstruktionsprinzip, Dichtungsmaterial)(**Tabelle 3**).

Ventile mit Ventilsitz (Sitzventile) weisen (auch bei gleichem Dichtungsmaterial) eine wesentliche höhere Dichtheit zur Medienabsperrung in der Leitung auf, während Absperrklappen oder Kugelhahn mit deutlichem Abstand folgen. Bei hohen Druckstufen (PN 100 und darüber) sind Kugelhahnarmaturen nach Herstellerangaben ohnehin zur Absperrung nicht empfohlen.

Maximal zulässiger Wärmeeintrag

Bei (tief-)kalter Medientemperatur ist der maximal zulässige Wärmeeintrag durch die Armatur ins Medium im Rahmen der Anlagenauslegung sehr bedeutend. Er bezeichnet die maximal erlaubte Wärmezufuhr durch die Armatur in das tiefkalte flüssige oder kalte gasförmige Medium.

Für Gasspeicherung und -transport wurde das Medium zuvor mit hohem technischem Aufwand und Energieeinsatz auf tiefkalte Temperaturen heruntergekühlt und ggf. verflüssigt oder unter hohem Druck gasförmig gespeichert. Um diesen Zustand möglichst lange zu behalten, soll deshalb ein Wärmeeintrag in das Medium vermieden werden. Ein Ansatzpunkt dazu ist zunächst ein optimiertes, massearmes Ventildesign. Zudem kann der Einbau einer Armatur in eine vakuumisolierte Leitung („Vakuumisolierung“) durch ein Mantelrohr oder, bei mehreren Armaturen, in einen Vakuumraum („Cold Box“) erfolgen. Diese sollte durch eine Umwicklung mit Spezialfolie („Multi Layer Insulation“ – MLI) gegen Wärmestrahlung ergänzt werden. Zusätzlich können auch Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit im Medienraum Verwendung finden, z. B. durch Materialalternativen (GfK, CfK) für die Ventilspindel anstelle von Vollmetall, um die Wärmeleitung in das Medium von außen zu unterbrechen. Dies kommt bisher allerdings eher bei Anwendungen mit Flüssighelium zum Einsatz und nicht so häufig bei Wasserstoff.

Medienfluss

Der Medienfluss, ausgedrückt durch den K_V-Wert (Durchflussfaktor oder Durchflusskoeffizient, Einheit m^3/h) ist ein Maß für den erzielbaren Durchsatz einer Flüssigkeit oder eines Gases durch ein Ventil. Der K_{VS}-Wert (Durchfluss bei voller Ventilöffnung) dient zur Auswahl und Dimensionierung von Ventilen bei der Anlagenauslegung. Ein hoher K_{VS}-Wert bietet die Möglichkeit, kleinere Nennweiten einer Armatur einzusetzen, um den angestrebten Mediendurchfluss zu

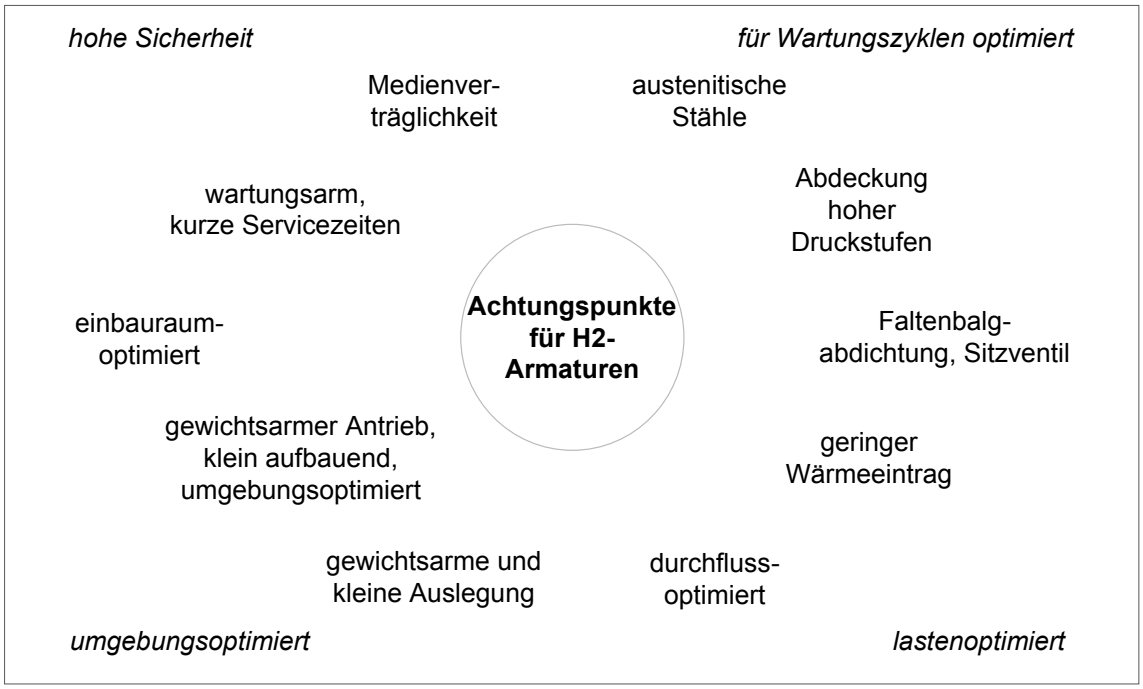


Bild 2: Achtungspunkte für H2-Armaturen bei anspruchsvollen Anwendungen

erreichen, und trägt somit indirekt zur Größen- wie auch Gewichtsoptimierung einer Armatur bei.

Gewicht und Einbaugröße der Armatur

Speziell für mobile H_2-Anwendungen ist die Optimierung des Anlagengewichts wichtig. Zum Anlagengewicht tragen neben den Großkomponenten wie Tank oder Wärmetauscher auch das Gewicht der Armaturen bei.

Bei den mobilen Anwendungen steht meist nur ein begrenzter Einbauraum zur Verfügung, und auch das maximale Gewicht ist begrenzt (Nutzfahrzeuge, Flugzeug). Eine optimierte Auslegung des Durchmessers der Medienleitung (möglichst klein), ein möglichst hoher K_{VS}-Wert der Armatur und ein möglichst niedriger Nenndruck beeinflussen Größe und Gewicht der zu verwendenden Armatur positiv. Der Zusammenhang dabei ist, dass Nennweite der Medienleitung sowie der Mediendruck durch die resultierenden Kräfte die Auslegung des benötigten Faltenbalgs bestimmen; der Faltenbalg determiniert Größe und Gewicht der eingesetzten Armatur wesentlich. Weiterhin beeinflussen diese Parameter auch die Auslegung eines vorzusehenden Antriebs mit direkten Folgen für dessen Gehäusegröße und Gewicht, siehe unten. Somit kommen der sorgfältigen Auslegung des Medienflusses für Gewicht und Größe von Armaturen und Antrieb die entscheidende Rolle zu. Alle zusätzlichen Optimierungen, wie z. B. die Verwendung gewichtssparender Materialien (Alu, Kunststoffe) für das Gehäuse, bieten, sofern regelkonform, ein vergleichsweise nur geringeres Optimierungspotenzial.

Antrieb

Das Gesamtgewicht eines Ventils wird zum großen Teil durch den Antrieb bestimmt. Deshalb ist es besonders für mobile Anwendungen, die automatisierte Antriebe einsetzen, entscheidend, diesen vorrangig gewichtsseitig zu optimieren.

Bei automatisierten Antrieben bietet der pneumatische unter den verschiedenen Antriebsarten aus Sicht des Konstrukteurs die größte Flexibilität und birgt die meisten Vorteile. Auch kann er oft aus gewichtssparendem Aluminium hergestellt werden. Sofern elektrische Antriebe eingesetzt werden, ist dies i. d. R. nur bei niedrigen bis mittleren Nenndrücken (in Abhängigkeit von der Nennweite) möglich, um die zum Schließen gegen den Mediendruck benötigten Kräfte darstellen zu können.

Ebenso wie für das Gewicht der eigentlichen Armatur, ist eine sorgfältige Auslegung des Medienflusses auch für Gewicht und Größe des Antriebs bestimmend, um diesen möglichst klein auslegen zu können.

Bei Einsatz elektrischer Antriebe für mobile Anwendungen ist zudem zu beachten, dass die heute auf dem Markt erhältlichen Antriebe im Wesentlichen nach Industriestandards ausgelegt sind. Für mobile Anwendungen müssen diese hinsichtlich der benötig-

ten technischen Standards sowie Gewicht und Größe an die jeweiligen Betriebs- und Einsatzbedingungen angepasst werden.

Einbausituation und -lage

Armaturen für den Einsatz bei tiefkalten Medientemperaturen sind hierfür in besonderer Weise konstruktiv ausgelegt. Dies muss hinsichtlich der Einbausituation und Einbaulage in einer mobilen Anlage entsprechend berücksichtigt werden, da diese oft Beschränkungen aufweisen.

Kennzeichen von Ventilen für tiefkalte Medientemperaturen sind eine Spindelverlängerung zur thermischen Entkopplung des Antriebs vom tiefkalten Medium, sowie der Einbau der Spindelverlängerung in aufrechter Position mit maximal 30° seitlicher Neigung zur Medienleitung. Zwar ist der Einbau eines Kryoventils auch in horizontaler Position („90°-Neigung“) oder sogar über Kopf („180°-Neigung“) möglich, aber nur mit einer spezielle Ventilkonstruktion, die jedoch auch Nachteile mit sich bringt (aufwändigere Konstruktion, höherer Preis, höheres Gewicht, höherer Wärmeeintrag).

Wartungs- und Reparaturanforderungen

Insbesondere mobile Anwendungen stellen bezüglich Wartung und Reparatur zusätzliche sicherheitskritische Anforderungen an die eingesetzten Armaturen. Im Betriebsszenario sind dies eine hohe Zuverlässigkeit sowie eine geringe Ausfallwahrscheinlichkeit (MTBF). Dies kann ggf. durch doppelte Auslegung von kritischen Komponenten weiter erhöht werden.

Im Wartungsfall soll die Lebensdauer der zu wechselnden Komponenten mit den branchenüblichen Wartungszyklen in Übereinstimmung sein, so z. B. das Wechseln der Ventilspindel aufgrund des Erreichens der maximalen Hubanzahl mit den Regelchecks in der Luftfahrt, dem Kundendienstintervall eines Lkws oder der durchschnittlichen Liegezeiten eines Schiffs im Hafen.

Im Reparaturfall soll der Austausch von Komponenten schnell und einfach erfolgen können, z. B. durch Öffnen weniger Schrauben und leichten Tausch. Allerdings ist ggf. auch die zur Erwärmung der Metallkörper benötigte Zeit bei Abkühlung mit zu beachten.

ZUSAMMENFASSUNG DER ACHTUNGSPUNKTE FÜR H_2-ARMATUREN

Die nachfolgende Übersicht bietet eine Zusammenfassung der wesentlichen Achtungspunkte für H_2-Armaturen bei anspruchsvollen Wasserstoffanwendungen (**Bild 2**).

Autor

JOACHIM RÖDIGER
STÖHR ARMATUREN GmbH & Co. KG
86343 Königsbrunn
Tel.: +49 8231 3490-0
info@stoehr-armaturen.de