

# Barksdale®

CONTROL PRODUCTS

CRANE

Barksdale, Inc./Barksdale GmbH  
A Subsidiary of Crane Co.

## INNOVATIVE SENSORLÖSUNGEN FÜR WASSERSTOFF GEWÄHRLEISTUNG VON SICHERHEIT UND EFFIZIENZ BEIM ÜBERGANG ZU NACHHALTIGEN ENERGIESYSTEMEN

[www.barksdale.de](http://www.barksdale.de)



White Paper

Die Wurzeln von Barksdale Control Products reichen bis ins Jahr 1949 zurück, als Mr. Barksdale begann, die hydraulische Steuerung in Öl- und Gasanwendungen zu revolutionieren. Mit einer Vision für Präzision und Innovation leisteten wir Pionierarbeit bei der Entwicklung der differenzierten Shear-Seal®-Technologie, einem Durchbruch, der die Branchenstandards neu definieren sollte. In den vergangenen 75 Jahren hat Barksdale seine globale Präsenz mit Werken in Los Angeles, Deutschland, Indien und China ausgebaut und beliefert Märkte auf der ganzen Welt. Abgesehen von unseren technologischen Fortschritten ist unsere Geschichte auch eine Geschichte des unermüdlichen Engagements für unsere Kunden. Von Federungssystemen und Bewässerungssteuerung bis hin zu Wasserstoff-Brennstoffzellen und Prozessautomatisierung haben unsere Lösungen eine wichtige Rolle bei der Gestaltung von Branchen und der Förderung von Wachstum gespielt. Heute, da wir uns der digitalen Innovation annehmen, bleibt unser Engagement für Präzision und Zuverlässigkeit stärker denn je. Wir bei Barksdale Control Products liefern technische Lösungen, die die sich entwickelnden Anforderungen unserer Kunden übertreffen und unsere Position als zuverlässiger Partner in der Wasserstoffindustrie festigen.

### Zusammenfassung

Die Wasserstoffindustrie ist im Begriff, eine zentrale Rolle bei der weltweiten Umstellung auf nachhaltige Energiesysteme zu spielen. Als vielseitiger und sauberer Energieträger bietet Wasserstoff erhebliche Vorteile für Anwendungen in den Bereichen Verkehr, Energiespeicherung, industrielle Prozesse und Stromerzeugung. Der Einsatz von Wasserstofftechnologien wird jedoch durch Probleme der Materialverträglichkeit erschwert, insbesondere durch Wasserstoffversprödung und -permeation, die die Sicherheit und Effizienz von Wasserstoffspeicher- und -transportsystemen beeinträchtigen können. In diesem Bericht werden einige verschiedene Anwendungen von Wasserstoff untersucht, die technischen Probleme im Zusammenhang mit Wasserstoffumgebungen erörtert und zwei Sensorlösungen zur Bewältigung dieser Herausforderungen vorgestellt. Es wurde eine vergleichende Analyse zwischen vergoldeten piezoresistiven Drucksensoren und einteiligen monolithischen Sensoren aus 316 L durchgeführt, insbesondere im Hinblick auf Leistung und Eignung für Wasserstoffanwendungen. Diese umfassende Analyse unterstreicht die Zukunft der Sensorik und den kritischen Bedarf an innovativen Materialien und Technologien, um die sichere und effiziente Nutzung von Wasserstoff zu gewährleisten und damit seine Rolle in einer nachhaltigen Energiezukunft zu unterstützen.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung zu Wasserstoff	4
2	Anwendungen	5
3	Herausforderungen	6
4	Lösungen	8
5	Testvergleiche	10
6	Test 1 Ergebniss	11
7	Test 2 Ergebniss	13
8	Zusammenfassung	17

## 1 | Einleitung Wasserstoff

Wasserstoff ist das erste Element im Periodensystem und das am häufigsten vorkommende Element im Universum. Er ist das leichteste Element und spielt die wichtigste Rolle in der Chemie des Universums. Er ist der Grundbaustein von Sternen und Galaxien und ist ein Hauptbestandteil von Wasser und allem organischen Leben. In der Natur kommt es hauptsächlich in seiner zweiatomigen Form vor - dem H<sub>2</sub>-Gas. Aufgrund seines hohen Energiegehalts pro Masseneinheit und seiner Fähigkeit, bei der Verbrennung Wasser zu erzeugen, gilt Wasserstoff als vielversprechender sauberer Energieträger.

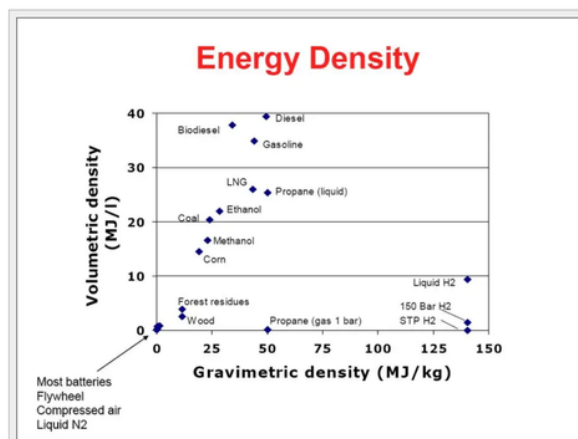
Komprimiertes Erdgas (CNG) und Wasserstoff gelten beide als saubere Alternativen zu herkömmlichen fossilen Brennstoffen, unterscheiden sich jedoch erheblich in ihren chemischen Eigenschaften und Energiekennwerten. Zum besseren Verständnis vergleichen wir reinen Wasserstoff mit Methan, das normalerweise etwa 90 % eines Erdgasgemischs ausmacht.

Property	Hydrogen	Natural Gas (Methane)
Chemical Formula	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Molecular Weight	2	16
Flammability limit (% of fuel in a fuel/air mixture that's required to ignite)	4% to 75%	7% to 20%
Flame Speed (cm/sec)	200-300	30-40
Adiabatic Flame Temperature (deg F)	4000	3565
Heating Value (Energy content per unit mass – BTU/lb)	51623	21518

Wie bereits erwähnt, hat Wasserstoff im Vergleich zu CNG einen höheren Energiegehalt pro Masseneinheit und bietet somit eine höhere Energieeffizienz und geringere Treibhausgas- und Schadstoffemissionen.

Vorteile bei der Verwendung von Wasserstoff

- Wasserstoff ist farb-, geruch- und geschmacklos und kann von den menschlichen Sinnen normalerweise nicht wahrgenommen werden.
- Es ist ungiftig und nicht toxisch.
- Es ist 14-mal leichter als Luft, wodurch es sehr schnell aufsteigen (20 Meter/Sekunde) und sich rasch verteilen kann. Dieser Auftrieb ist ein eingebauter Sicherheitsvorteil in der Außenwelt.
- Es hat den höchsten Energiegehalt pro Masseneinheit unter den vorherrschenden Optionen, etwa das Dreifache von Benzin und mehr als das Zweifache von CNG.



source:<http://www.olicognography.org/graph/energydensity>

## 2 | Einsatzbereiche

### 1. Transport

- Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCVs): Umweltfreundliche Autos, Lastwagen und Busse, die von Wasserstoff-Brennstoffzellen angetrieben werden, stoßen nur Wasserdampf aus.
- Öffentlicher Nahverkehr: Mit Wasserstoff betriebene Busse und Züge tragen zur Verringerung der Luftverschmutzung in den Städten bei.
- Luftfahrt und Schifffahrt: Die Entwicklung von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen und Schiffen soll die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Langstreckenreisen und Frachttransporten verbessern.



### 2. Industrie-Prozesse

- Raffinierung: Wasserstoff entfernt Schwefel aus Kraftstoffen, wodurch saubereres Benzin und Diesel entsteht.
- Ammoniak-Produktion: Das Haber-Bosch-Verfahren, das für Düngemittel unerlässlich ist, basiert auf Wasserstoff.
- Methanol-Produktion: Wasserstoff ist von entscheidender Bedeutung für die Synthese von Methanol, einem wichtigen chemischen Grundstoff.
- Stahlherstellung: Die Verwendung von Wasserstoff als Reduktionsmittel kann die Kohlenstoffemissionen bei der Stahlherstellung erheblich senken.



### 3. Stromerzeugung und -speicherung

- Wasserstoff-Brennstoffzellen: Liefern sauberen Strom für Gebäude und abgelegene Standorte.
- Wasserstoffturbinen: Können durch die Verbrennung von Wasserstoff, allein oder gemischt mit Erdgas, Strom erzeugen.
- Energiespeicherung: Wasserstoff speichert überschüssige erneuerbare Energie, um sie bei geringem Angebot zu nutzen und so das Problem der Unterbrechung der Energieversorgung zu lösen.



### Heizung für Privathaushalte und Unternehmen

- Wasserstoff-Heizkessel: Ersetzen Erdgasheizkessel und bieten kohlenstofffreie Heizung und Warmwasserbereitung.
- Vermischung mit Erdgas: Durch die Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas wird der Kohlenstoff-Fußabdruck von Heizsystemen schrittweise verringert.



### 5. Zukünftige Anwendungen

- Synthetische Kraftstoffe: Mit Wasserstoff lassen sich nachhaltige Alternativen zu fossilen Kraftstoffen herstellen.
- Rechenzentren: Wasserstoff-Brennstoffzellen bieten eine zuverlässige Ersatzstromquelle.
- Erforschung des Weltraums: Wasserstoff ist ein wichtiger Raketentreibstoff für aktuelle und zukünftige Weltraummissionen.



### 3 | Herausforderungen

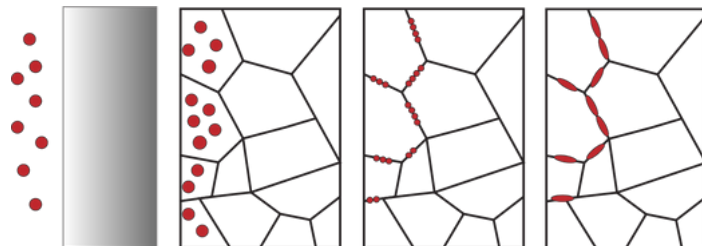
Trotz seines Potenzials als saubere Energiequelle ist die Verwendung von Wasserstoff in industriellen Umgebungen mit einigen Herausforderungen verbunden. Diese Herausforderungen ergeben sich in erster Linie aus den physikalischen und chemischen Eigenschaften von Wasserstoff, die sorgfältige Überlegungen und fortschrittliche technische Lösungen erfordern.

#### 1. Wasserstoff-Versprödung

Unter Versprödung versteht man das Phänomen, das zu Sprödigkeit und Verlust der Duktilität eines Werkstoffs führt. Da Wasserstoff ein so kleines Atom ist, kann er leicht durch Mikroporen und Risse in der Oberfläche eines Werkstoffs eindringen. Dort verbindet er sich mit anderen Wasserstoffatomen und geht anschließend eine Bindung mit weiteren H<sub>2</sub>-Molekülen ein, wodurch eine Masse von Wasserstoff entsteht, die Druck auf die Risse im Material ausübt und zu Rissen führt. Daher stellt die Wasserstoffversprödung eine große Herausforderung dar.

- Absorption und Diffusion: Wasserstoffatome diffundieren in Metallstrukturen, was zu inneren Spannungen und einer Schwächung des Materials führt.
- Spannungskonzentration: Wasserstoff verschlimmert bestehende Defekte und Mikrorisse, was zu einem vorzeitigen Versagen führt.
- Materialverschlechterung: Metalle wie Stahl können an Duktilität und Festigkeit verlieren, was zu erhöhten Wartungs- und Ersatzkosten führt.

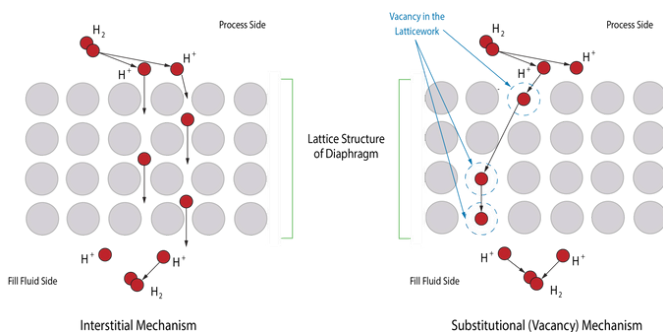
#### Wasserstoff-Versprödung



#### 2. Wasserstoff-Permeation

Bei der Wasserstoffpermeation diffundieren Wasserstoffatome durch Materialien, was zu Leckagen und potenziellen Sicherheitsrisiken führt. Wasserstoffionen könnten durch die Membran eines Drucksensors dringen und sich auf der anderen Seite der Membran zu Wasserstoffblasen umformen und so die Genauigkeit des Sensors beeinträchtigen.

- Kleine Atomgröße: Wasserstoffatome können die meisten Materialien leicht durchdringen und Lecks verursachen.
- Druck und Temperatur: Höhere Drücke und Temperaturen beschleunigen die Permeationsraten und erschweren die Eindämmung und Lagerung.
- Schwächung von Materialien: Die kontinuierliche Einwirkung von Wasserstoff kann die Unversehrtheit von Materialien beeinträchtigen und so die Sicherheit und Leistungsfähigkeit gefährden.



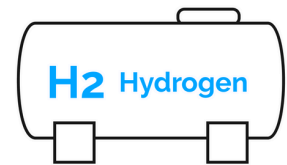
#### Wasserstoff-Permeation

# HERAUSFORDERUNGEN

## 3. Lagerung und Transport

Die sichere und effiziente Lagerung und Beförderung von Wasserstoff stellt eine logistische und technische Herausforderung dar.

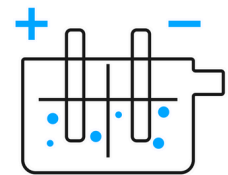
- Hoher Druck und niedrige Temperatur: Um eine ausreichende Energiedichte zu erreichen, muss Wasserstoff bei hohen Drücken (bis zu 700 bar) oder niedrigeren Temperaturen (kryogene Speicherung) gelagert werden.
- Anforderungen an die Infrastruktur: Der Aufbau einer flächendeckenden Wasserstoffinfrastruktur erfordert erhebliche Investitionen in Pipelines, Speicheranlagen und Tankstellen.
- Sicherheitsprobleme: Wasserstoff ist leicht entzündlich, und Lecks können zu Explosionen führen, wenn sie nicht ordnungsgemäß behandelt werden.



## 4. Energie-Effizienz

Die Verfahren zur Herstellung, Speicherung und Umwandlung von Wasserstoff sind mit Energieverlusten verbunden, die die Gesamteffizienz beeinträchtigen.

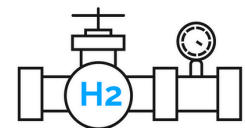
- Elektrolyse: Die Herstellung von Wasserstoff durch Wasserelektrolyse ist energieintensiv, und der Wirkungsgrad von Elektrolysesystemen kann relativ gering sein.
- Komprimierung und Verflüssigung: Die Komprimierung und Verflüssigung von Wasserstoff für die Speicherung und den Transport verbraucht zusätzliche Energie, was die Gesamteffizienz von Wasserstoff als Energieträger verringert.
- Wirkungsgrad von Brennstoffzellen: Obwohl Brennstoffzellen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren effizient sind, verlieren sie bei der Umwandlung immer noch Energie.



## 5. Materialverträglichkeit

Die Kompatibilität und Haltbarkeit der in Wasserstoffumgebungen verwendeten Materialien ist eine entscheidende Herausforderung.

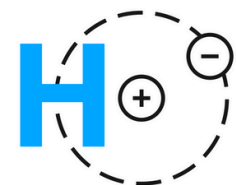
- Spezialisierte Materialien: Herkömmliche Werkstoffe können den Auswirkungen von Wasserstoff oft nicht standhalten, so dass der Einsatz spezieller, oft teurerer Materialien erforderlich ist.
- Beschichtungen und Behandlungen: Schutzbeschichtungen und Oberflächenbehandlungen sind notwendig, um die Wasserstoffversprödung und -permeation zu verringern, was die Systemkonstruktion komplexer und teurer macht.
- Integrität der Dichtung: Die Entwicklung von Dichtungen, die Wasserstofflecks über längere Zeiträume verhindern können, ist eine technische Herausforderung, insbesondere unter wechselnden Druck- und Temperaturbedingungen.



## 6. Sicherheit und Vorschriften

Die Eigenschaften des Wasserstoffs erfordern strenge Sicherheitsmaßnahmen und die Einhaltung von Vorschriften.

- Erkennung von Lecks: Es werden zuverlässige Detektionssysteme benötigt, um Wasserstofflecks schnell zu erkennen und zu beseitigen.
- Sicherheitsprotokolle: Umfassende Sicherheitsprotokolle und Schulungen sind für den sicheren Umgang mit Wasserstoff in industriellen Umgebungen erforderlich.
- Einhaltung von Vorschriften: Die Einhaltung von Vorschriften und Normen (z. B. ISO 11114) gewährleistet die sichere Verwendung von Wasserstoff, kann jedoch die Komplexität und die Kosten der Umsetzung erhöhen.





## 4 | Lösungen

Bei Barksdale haben wir uns der Entwicklung innovativer Drucksensorlösungen verschrieben, die den oben genannten Herausforderungen im Umgang mit Wasserstoff standhalten. In diesem Abschnitt werden wir zwei verschiedene Sensortechnologien untersuchen, die die Auswirkungen von Wasserstoffversprödung und Wasserstoff-Permeation eindämmen.



**Gold beschichteter Sensor**

### Gold beschichteter piezoresistiver Sensor

Die Vergoldung ist eine wirksame Methode zur Verhinderung der Wasserstoffpermeation in Drucksensoren. Die einzigartigen Eigenschaften von Gold machen es zu einer ausgezeichneten Barriere gegen Wasserstoff, wodurch die Membran geschützt und die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit von Drucksensoren, die in Wasserstoffumgebungen eingesetzt werden, erhöht wird.

#### Vorteile der Goldbeschichtung

1. Wasserstoff Undurchlässigkeit
  - Dichte Struktur: Gold hat eine dichte atomare Struktur, die es für Wasserstoffatome sehr undurchlässig macht.
  - Geringe Löslichkeit: Gold hat eine sehr geringe Löslichkeit für Wasserstoff, was die Aufnahme und anschließende Permeation von Wasserstoffatomen verhindert.
2. Korrosionsbeständigkeit
  - Chemische Beständigkeit: Gold ist chemisch inert und korrosionsbeständig, selbst in rauen Umgebungen. Dies gewährleistet, dass der Sensor seine Integrität und Funktionalität über lange Zeit beibehält.
  - Schutz vor Oxidation: Die Goldbeschichtung verhindert die Oxidation des darunter liegenden Metalls, was sich besonders positiv auf die Genauigkeit und Langlebigkeit des Sensors auswirken kann.
3. Langlebigkeit und Zuverlässigkeit
  - Widerstandsfähigkeit gegen Verschleiß: Vergoldete Oberflächen sind verschleiß- und abnutzungsfest, was für die langfristige Zuverlässigkeit entscheidend ist.
  - Gleichbleibende Leistung: Die Stabilität und Widerstandsfähigkeit gegen Wasserstoffpermeation, die durch die Goldbeschichtung gewährleistet werden, stellen sicher, dass die Drucksensoren während ihrer gesamten Lebensdauer gleichbleibende und genaue Messwerte liefern.

Einige Punkte, die bei der Verwendung zu berücksichtigen sind, sind die Dicke der Beschichtung, die Haftung und die Kompatibilität mit dem Substrat sowie die Kosten.



## Einteilige monolithische Sensoren

Eine weitere Möglichkeit, die durch Wasserstoff verursachten Schwachstellen zu beseitigen, ist die Verwendung einteiliger Sensoren, die auch als monolithische Sensoren bezeichnet werden. Bei diesen bestehen Sensor und Gehäuse aus einem einzigen Metallblock mit einer dicken Metallmembran, ohne dass Schweißarbeiten erforderlich sind. Sie haben eine Reihe von Vorteilen, wie Schutz vor Versprödung, einfache Installation, höherer Berstdruck usw. Außerdem weist der Werkstoff 316 L eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit auf.

**Monolithischer Sensor**



### Vorteile von monolithischen Sensoren aus 316L

1. Geringeres Risiko der Wasserstoff-Versprödung
  - Durch das Schweißen können Schwachstellen in Materialien entstehen, die anfällig für Wasserstoffversprödung sind. Durch die Vermeidung von Schweißarbeiten wird das Risiko einer wasserstoffbedingten Verschlechterung minimiert, was die langfristige Zuverlässigkeit des Sensors erhöht.
2. Vereinfachte Installation
  - Schweißen kann ein komplexer und zeitaufwändiger Prozess sein, der qualifizierte Arbeitskräfte und Spezialausrüstung erfordert. Die Verwendung eines einteiligen Sensors ohne Schweißen vereinfacht den Installationsprozess und reduziert die Arbeitskosten und mögliche Fehler bei der Montage.
  - Die Abdichtung von Wasserstoff mit Elastomeren stellt aufgrund der einzigartigen Eigenschaften von Wasserstoff und der Beschränkungen von Elastomermaterialien eine Reihe von Herausforderungen dar. Dies wird durch die Verwendung einer einteiligen Sensorkonstruktion vollständig vermieden.
3. Erhöhte Langlebigkeit
  - Die monolithischen Sensoren haben eine Membran aus 316L und keine Silikonölfüllung. 316L weist eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit auf und bietet somit eine längere Lebensdauer des Sensors. Das Schweißen kann zu Spannungskonzentrationen führen und die strukturelle Integrität von Materialien schwächen. Einteilige Drucksensoren ohne Schweißung bieten eine robustere und haltbarere Lösung und minimieren das Risiko eines vorzeitigen Ausfalls und von Ausfallzeiten.
4. Kompatibilität mit Hochdruckumgebungen
  - Die dicke Membran ermöglicht dem Sensor eine gute Leistung bei schneller Kompression und Dekompression, so dass er höheren Drücken standhalten kann und einen höheren Berstdruck aufweist.

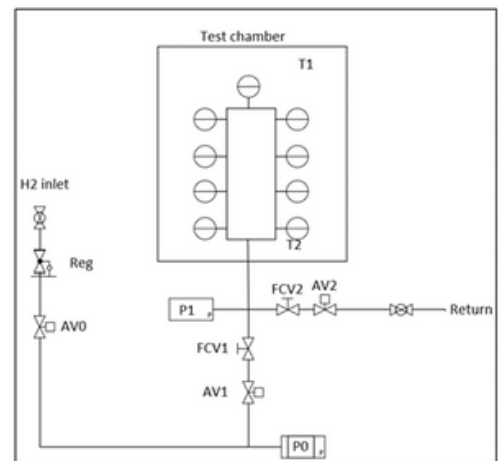
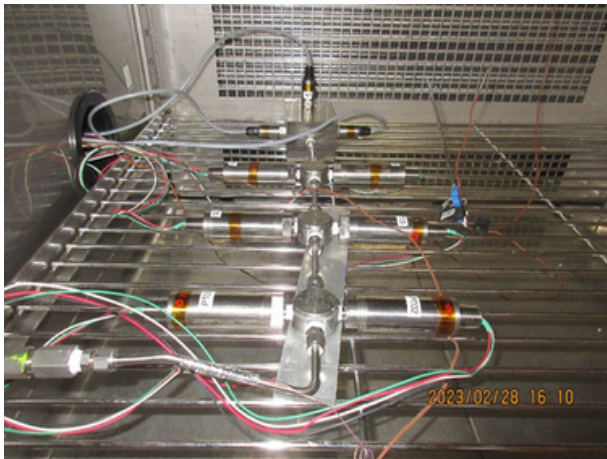


Es wurden eine Reihe von Tests mit ölfüllten piezoresistiven Sensoren aus Silizium (O), vergoldeten ölfüllten piezoresistiven Sensoren aus Silizium (G) und monolithischen Sensoren aus 316L (M) durchgeführt, um die Leistung der monolithischen Drucksensortechnologie im Vergleich zu den branchenüblichen vergoldeten piezoresistiven Sensoren zu bewerten.

## Test 1: Vergleichender Ausdauerstest

Beide Sensortypen wurden einem Lebenszyklus-Drucktest mit mehr als 100.000 Zyklen bei einem Druck von 450 bar (6500 psi) unterzogen, wobei Wasserstoff als Medium verwendet wurde. Faktoren wie Empfindlichkeit, Ansprechzeit und Langzeitstabilität wurden unter verschiedenen Druck- und Temperaturbedingungen gemessen.

### Test 1 Aufbau:



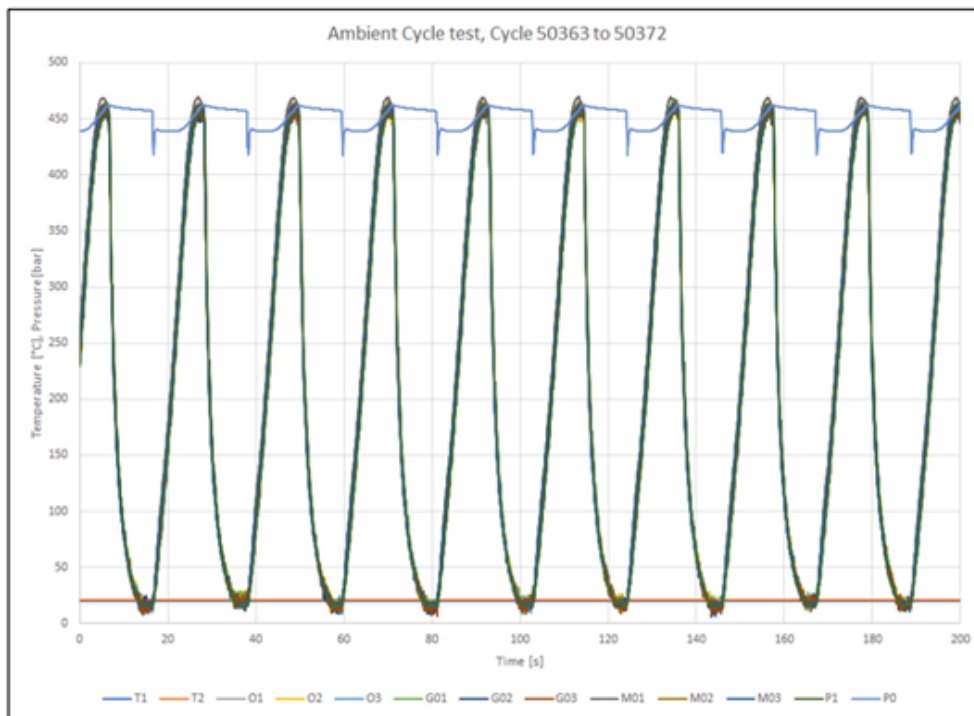
Bei dem,

- T1 ist eine Kammertemperatur • T2 ist eine Oberflächentemperatur an einer Probe
- P1 ist der Probendruck • P0 ist der Eingangsdruck

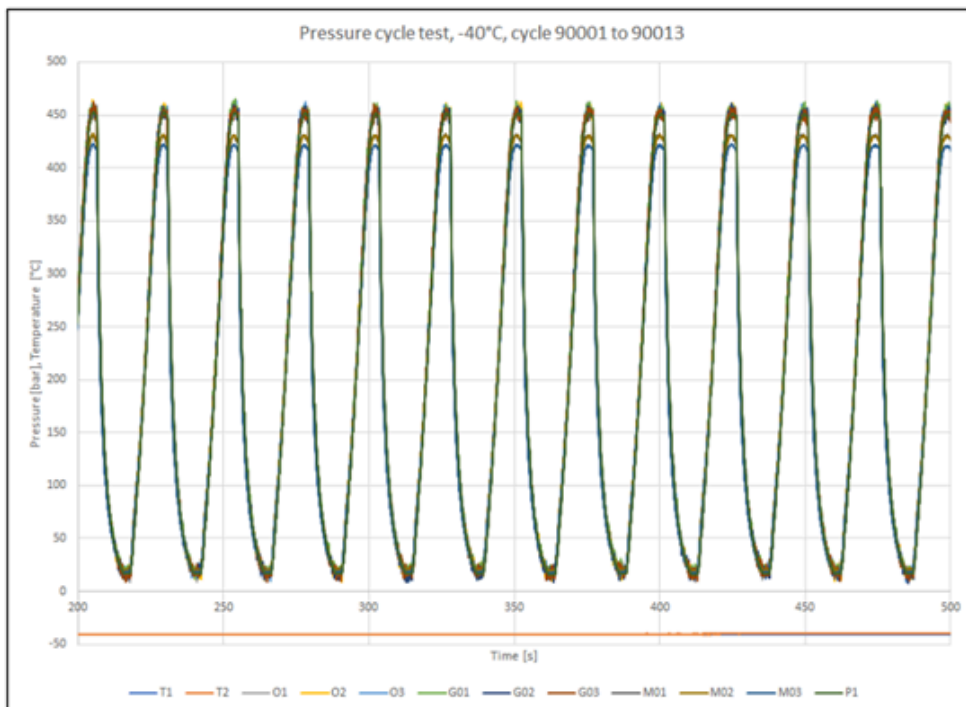
### Test 1 Bedingungen (Vergleichender Härtetest):

Drei Drucksensoren jedes Typs wurden mit Wasserstoffgas von 20 bar bis 450 bar (300 psi bis 6500 psi) unter Druck gesetzt. Die Zyklusrate betrug nicht mehr als 6 Zyklen pro Minute. 90% der Zyklen wurden bei 20°C, 5% bei -40°C und 5% bei +85°C durchgeführt. Während der Druckzyklusprüfung wurde in regelmäßigen Abständen eine Nullkontrolle durchgeführt. Die Proben wurden zu einem Verteiler zusammengebaut und vor der Prüfung einer externen Dichtheitsprüfung unterzogen, und zwar am Ende der Prüfung bei Raumtemperatur, bei minimaler und bei maximaler Temperatur

# TEST 1 ERGEBNISSE

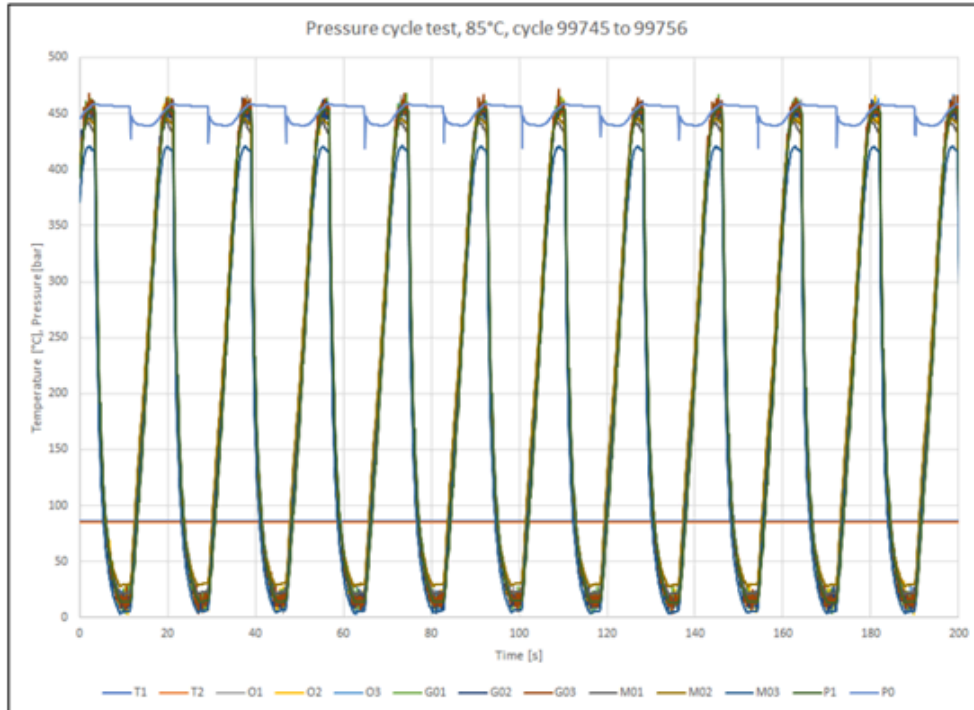


Die Proben zeigten über 90.000 Druckzyklen von 20 bar bis 450 bar (300 psi bis 6500 psi) bei 20 Grad Celsius die gleiche Leistung.



Die Proben zeigten über 5000 Druckzyklen von 20 bar bis 450 bar (300 psi bis 6500 psi) bei -40 °C die gleiche Leistung.

## TEST 1 ERGEBNISSE



Die Proben zeigten über 5000 Druckzyklen von 20 bar bis 450 bar (300 psi bis 6500 psi) bei 85 Grad Celsius eine identische Leistung.

Die Proben zeigten über 100.000 Zyklen hinweg keine Leistungseinbußen und haben den Test somit bestanden. Nach den oben genannten Tests wurden die Proben einer externen Dichtheitsprüfung bei 450 bar (6500 psi) unterzogen, die bei 20 °C, -40 °C und 85 °C durchgeführt wurde. Die Testergebnisse lauten wie folgt:

Pressure (PSI)	Sensor Type	Fatigue Cycles	Leakage
6500	Gold plated Piezo-resistive	100K	Passed
	Monolithic	100K	Passed

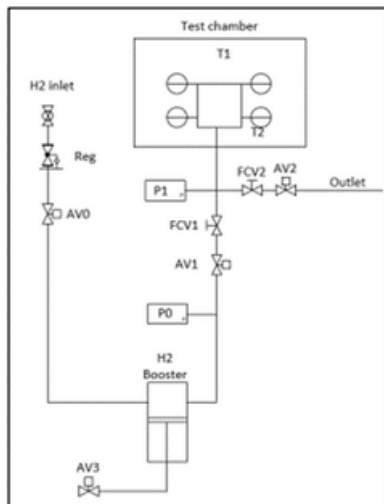
Die vorläufigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die monolithischen Drucksensoren in Bezug auf Nullpunktverschiebung, Linearität und Dauerhaftigkeit gleichwertig zu den piezoresistiven Sensoren mit Goldbeschichtung sind, die dem Industriestandard entsprechen.

# TEST 2 ERGEBNISSE

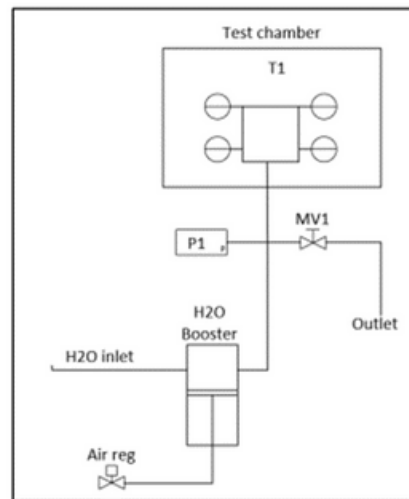
## Test 2: UL 122701 Test

Da die monolithischen Sensoren einem höheren Druckbereich standhalten können als die vergoldeten piezoresistiven Gegenstücke, wurde ein ähnlicher Test mit den monolithischen Sensoren bei 20000 psi und Wasserstoff als Medium durchgeführt. Dieser Test wurde in Übereinstimmung mit UL 122701 Klausel 6.2.3, 6.2.4 und 6.2.5 durchgeführt. Dieser Test bestand aus einem Dauertest, gefolgt von einem Leckagetest und einem hydrostatischen Bersttest.

### Test 2 Aufbau



Test 2A: Dauer-Test



Tests 2B: Leakage and 2C: Hydrostatic Test



Vier Sensoren (S1, S2, S3, S4) werden mit Wasserstoffgas unter Druck gesetzt

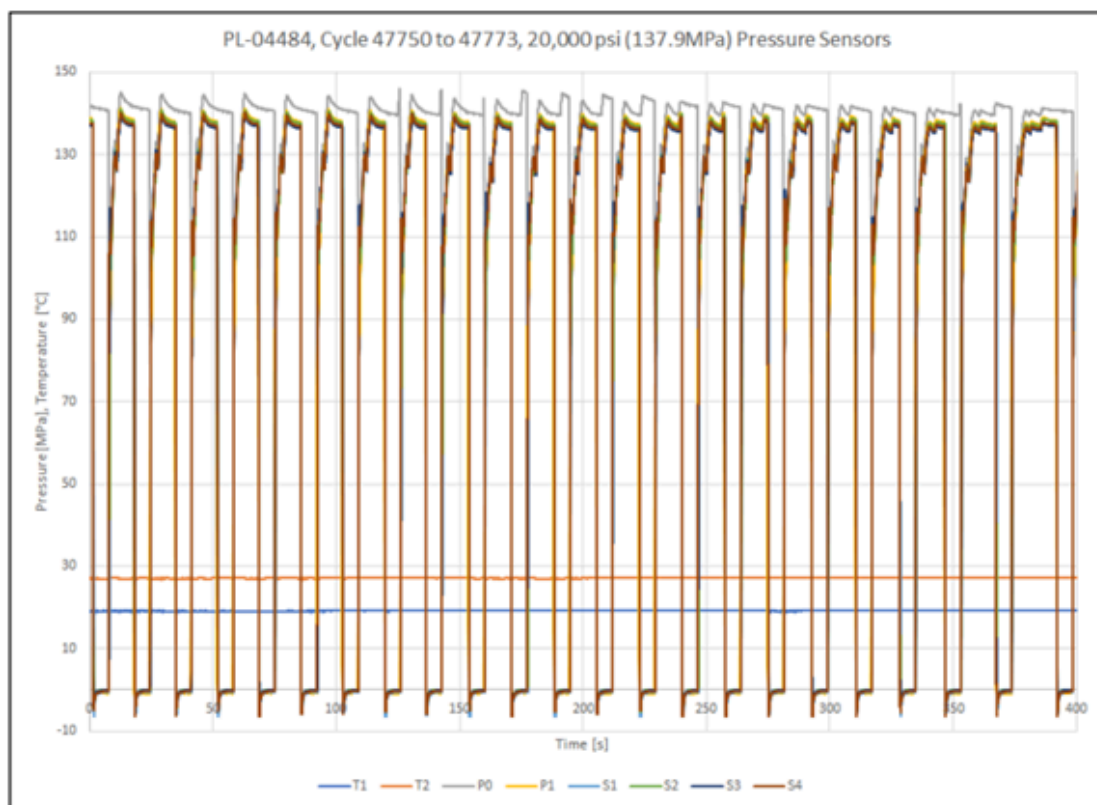
bei dem,

- T1 ist die Kammertemperatur • T2 ist eine Oberflächentemperatur an einer Probe
- P1 ist der Probendruck • P0 ist der Eingangsdruck

## Test 2A Bedingungen (Dauertest):

Vier Sensoren (S1, S2, S3, S4) wurden mit Wasserstoffgas von 0 MPa bis 137,9 MPa (0 bis 20000 psi) unter Druck gesetzt. Die ersten 10.000 Zyklen wurden eine Minute lang bei einem maximalen Druck von 20000 psi gehalten, dann wurde der Druck für eine Sekunde auf 0 psi gesenkt, bevor der Druck wieder auf 20000 psi erhöht wurde. Die restlichen 90.000 Zyklen wurden 5 Sekunden lang bei 20000 psi gehalten, dann wurde der Druck 5 Sekunden lang auf 0 psi gesenkt, bevor er wieder auf 20000 psi erhöht wurde. Alle Zyklen wurden bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C durchgeführt.

## Test 2A Ergebnisse (Dauertest):



*Proben, die einem Druckzyklustest bei 20 Grad Celsius unterzogen werden.*

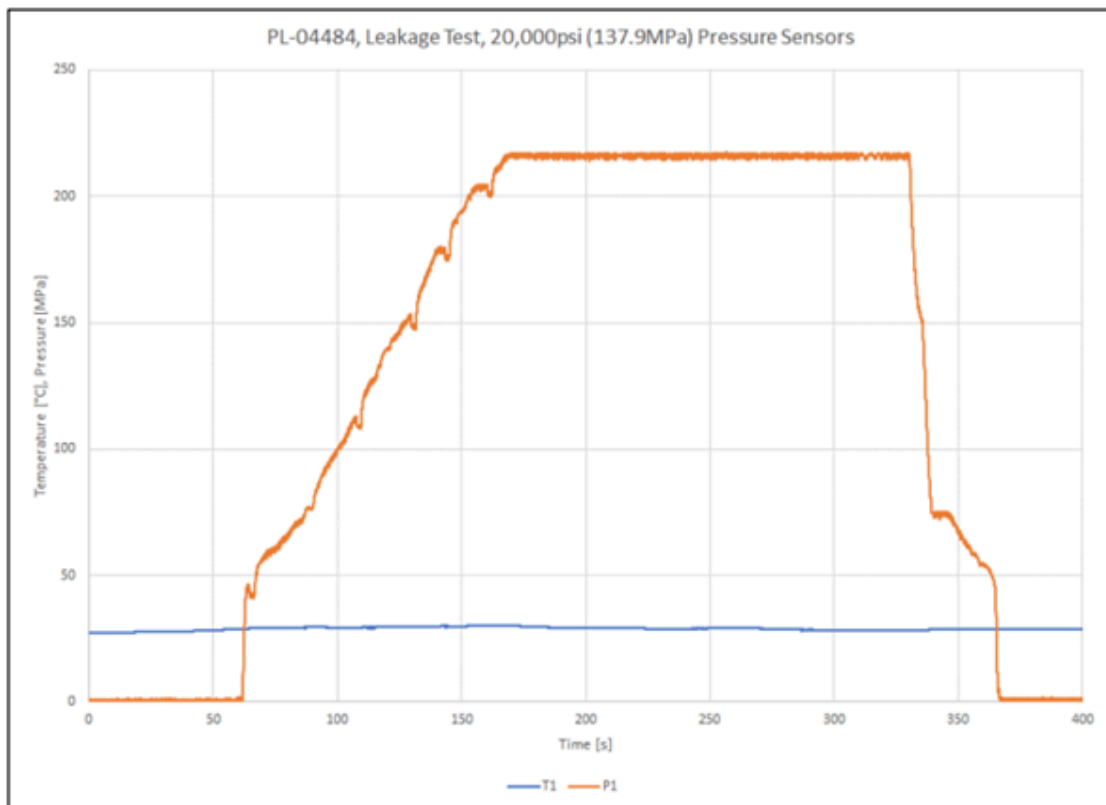
Die Proben zeigten über 100.000 Zyklen hinweg keine Leistungsminderung und bestanden somit den Test nach UL-Kriterien.

## TEST 2 ERGEBNISSE

### Test 2B Bedingungen (Leakage Test):

Nach Abschluss der Prüfung wurden die Muster einer externen Dichtheitsprüfung mit Wasser bei 214,1MPa (31.080psig) unterzogen, wie es die UL-Prüfvorschrift von  $1,3P_{max} + 35\text{MPa}$  vorsieht. Vor der Prüfung wurde der Prüfdrucksensor (P1) auf den atmosphärischen Druck des jeweiligen Tages abgeglichen. Die Prüfung wurde bei einer Umgebungstemperatur von 20°C durchgeführt.

### Test 2B Ergebnisse (Leakage Test):



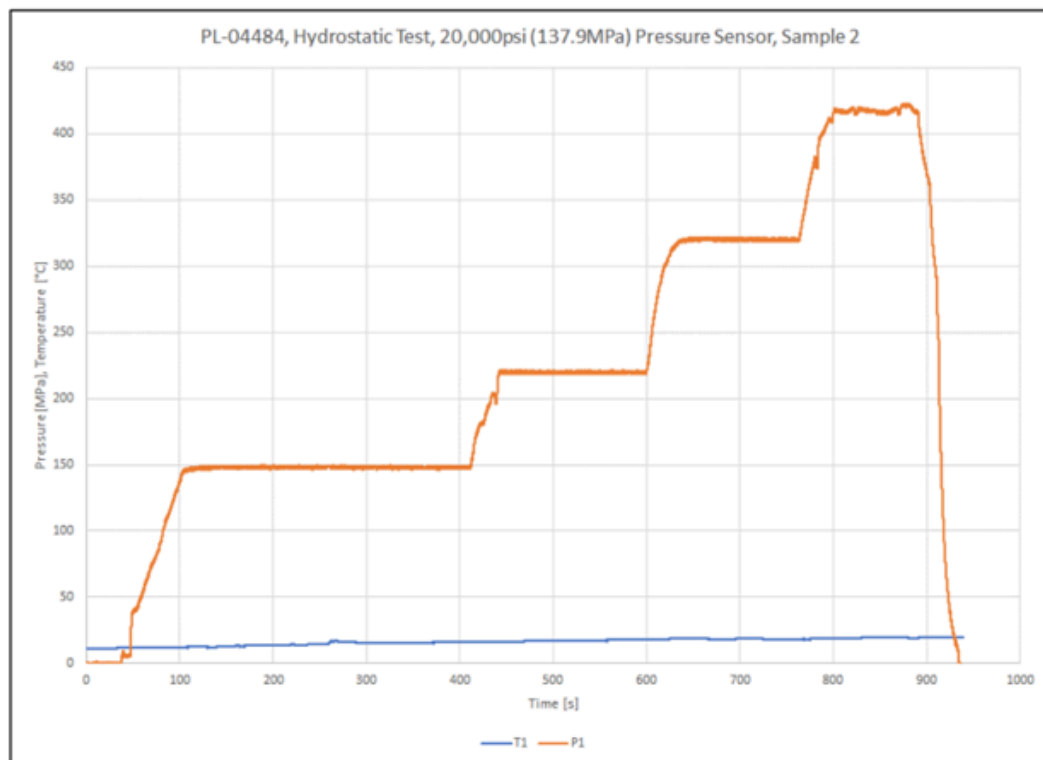
*Proben, die einem Leckagetest unterzogen werden.*

Alle Proben wiesen nach der Prüfung keine äußeren Leckagen auf und bestanden somit die Prüfung nach UL-Kriterien.

## Test 2C Bedingungen (Hydrostatischer Berst Test):

Ein Muster wurde dann einer hydrostatischen Berstprüfung bei einer Umgebungstemperatur von 20°C unterzogen. Der Berstdruck musste mehr als 317,6 MPa (46100 psig) betragen, entsprechend der UL-Prüfanforderung von  $2xP_{max} + 42MPa$ . Die Probe wurde mindestens eine Minute lang bei 320 MPa gehalten, dann wurde der Druck auf einen maximalen Druck von 423 MPa (61350 psig) erhöht.

## Test 2C Ergebnisse (Hydrostatischer Berst Test):



Proben, die einem hydrostatischen Bersttest unterzogen werden.

Alle Muster erfüllen das Kriterium, einem Berstdruck von mehr als 317,6 MPa standzuhalten, und haben somit die Prüfung gemäß den UL-Kriterien bestanden.

## Gesamtergebnisse von Test 2:

Alle getesteten monolithischen Sensorproben erfüllten die Kriterien der UL 122701 Klausel 6.2.3, 6.2.4 und 6.2.5 und haben die Tests bestanden.

Pressure	Sensor Type	Cycles	Result
20000	Monolithic	100K	Passed

Gesamte Testergebnisse bestanden



## 5 | Zusammenfassung

Die Wasserstoffindustrie steht an der Schwelle zu einer grundlegenden Veränderung der globalen Energielandschaft und bietet eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen fossilen Brennstoffen. In diesem White Paper werden die Wasserstoffindustrie und ihre Anwendungen vorgestellt und die erheblichen Vorteile von Wasserstoff, wie sein hoher Energiegehalt pro Masseneinheit und sein Potenzial zur Verringerung der Treibhausgasemissionen, ausführlich erläutert. Um diese Vorteile in großem Maßstab nutzen zu können, müssen jedoch erhebliche technische Herausforderungen wie Wasserstoffversprödung und -permeation überwunden werden, die die Integrität und Sicherheit von Wasserstoffspeicher- und -transportsystemen gefährden.

Barksdale hat sich der Entwicklung kundenspezifischer Sensorlösungen verschrieben, die den Gefahren des Wasserstoffs standhalten. Vor kurzem haben wir eine neue Reihe von Wasserstoff-Drucksensoren auf den Markt gebracht, bei denen zwei verschiedene Sensortechnologien zum Einsatz kommen: die branchenüblichen goldbeschichteten piezoresistiven Sensoren und die neuen einteiligen monolithischen 316L-Sensoren. Vergoldete piezoresistive Sensoren bieten aufgrund der dichten und inerten Beschaffenheit von Gold eine hervorragende Beständigkeit gegen die Permeation von Wasserstoff, was die Haltbarkeit und Genauigkeit der Sensoren erhöht. Die einteiligen monolithischen Sensoren aus 316L bieten dank ihrer schweißfreien Konstruktion und der dicken Metallmembran eine robuste Leistung bei geringerem Risiko der Wasserstoffversprödung und vereinfachter Installation.

Anschließend führten wir eine experimentelle Analyse durch, um die Eignung der monolithischen Sensoren in einer rauen Wasserstoffumgebung auf der Grundlage der strengen Richtlinien und Normen der UL 122701 für Dauerhaltbarkeits-, Leckage- und Bersttests zu untersuchen. Die experimentelle Analyse umfasste auch einen vergleichenden Dauertest zwischen den monolithischen Sensoren und den vergoldeten Sensoren, der die Zuverlässigkeit und Effektivität beider Sensortechnologien in Wasserstoffanwendungen unterstrich, wobei die monolithischen Sensoren den entscheidenden Vorteil haben, dass sie mit Hochdruckumgebungen mit hohen Berstdruckanforderungen kompatibel sind. Dies macht die monolithischen Sensoren zu einer hervorragenden Lösung für die Druckmessauforderungen der Wasserstoffindustrie.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Zukunft der Wasserstoffsensorik in der kontinuierlichen Entwicklung und Einführung innovativer Materialien und Sensordesigns liegt. Diese Fortschritte sind entscheidend, um die sichere und effiziente Nutzung von Wasserstoff zu gewährleisten und damit seine zentrale Rolle beim Übergang zu einer nachhaltigen Energiezukunft zu unterstützen. Durch die Bewältigung der technischen Herausforderungen im Zusammenhang mit Wasserstoffumgebungen können wir das volle Potenzial von Wasserstoff als sauberem Energieträger erschließen und den Weg für eine grünere, nachhaltigere Welt ebnen.



## Design Sie mit uns

Nutzen Sie unser technisches Fachwissen, um Ihre Anforderungen zu erfüllen. Modifizieren Sie Standardprodukte für Ihr Projekt. Barksdale bietet mehr als 50 Produktfamilien und Millionen von konfigurierten Optionen zum Messen, Überwachen und Steuern von Prozessen, die für die Industrie, die Energietechnik und das Transportwesen wichtig sind.



Visit [Barksdale.de](https://www.barksdale.de) to view our complete product portfolio.

### Referenzen

[1] Hydrogen Tools. (n.d.). So You Want to Know More About Hydrogen? Retrieved from <https://h2tools.org/so-you-want-know-more-about-h2>

[2] WHA International. (n.d.). Hydrogen in Industry. Retrieved from <https://wha-international.com/hydrogen-in-industry/>

[3] UL. (2018). UL 122701: Standard for Safety of Gas Appliance Pressure Regulators. Underwriters Laboratories.

[4] United States Department of Energy. (2015). Hydrogen Storage. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>



### Barksdale Inc.

**Global Headquarters**  
3211 Fruitland Ave  
Los Angeles, CA 90058-1234  
USA  
Phone: +1 (800) 835 1060  
Fax: +1 (323) 589 3463

**Barksdale GmbH**  
Dorn-Assenheimer Strasse 27  
62301 Reichelsheim  
Germany  
Phone: +49 (0) 6035 949-0  
Fax: +49 (0) 6035 949-111

**Barksdale China**  
33F Huaihai Plaza 1045  
Central Huaihai Road Shanghai  
200031 P.R. China  
Phone: +86 (21) 6127-3000  
Fax: +86 (21) 6473-3298

**Barksdale**<sup>®</sup>  
CONTROL PRODUCTS

**Control** Every Move