

Wasserstoff-Sensoren

Mit dem Ziel der Dekarbonisierung unserer von fossilen Brennstoffen abhängigen Gesellschaft durch den Einsatz von Wasserstoff müssen technische Herausforderungen bewältigt werden. Eines der Hauptprobleme bei der weit verbreiteten Einführung und Umstellung auf Wasserstoffsysteme sind Sicherheitsbedenken, wie z. B. die Explosivität und das breite Spektrum der Entflammbarkeit. Um einen sicheren Betrieb dieser Verfahren zu gewährleisten, sollten bei allen Prozessen, die mit Wasserstoff zu tun haben, Wasserstoffdetektion und -überwachung eingeführt werden. In letzter Zeit hat man sich auf die Erforschung von Wasserstoffsensortechnologien und deren Wirksamkeit konzentriert, da Wasserstoffsensoren gut erforscht sind und in Form von marktfähigen, kommerziellen Produkten hergestellt werden, die gekauft werden können. Wasserstoffsensoren sind Geräte, die eine chemische oder physikalische Wechselwirkung von Wasserstoffgas in ein messbares Signal umwandeln. Normalerweise funktionieren sie durch Adsorption von Wasserstoff an ein festes Sensormaterial, das eine entsprechende Eigenschaftsänderung erfährt und die Gaskonzentration effektiv in einen Messwert umwandelt. Dies wird in Abbildung 1, dem nachstehenden Betriebsablaufdiagramm, das die Funktionen eines Wasserstoffsensors umreißt, näher erläutert.

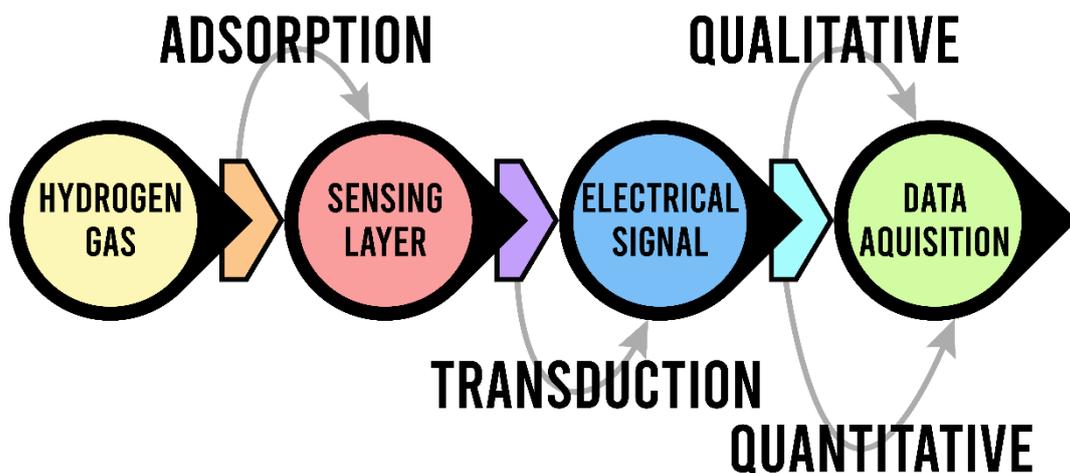


Abbildung 1: Funktionsschema eines Wasserstoffsensors.

Anforderungen und Spezifikationen für Wasserstoffsensoren

Wie von Hübert et al. skizziert, lassen sich die Anforderungen an Wasserstoffsensoren wie folgt zusammenfassen (Hübert et al., 2011):

- Geringe Kosten (<100€ pro System)
- Geringer Stromverbrauch
- Kleine Größe
- Einfache Systemintegration und Schnittstelle
- Einfache Bedienung und Wartung mit langen Wartungsintervallen
- Sichere Leistung, z. B. explosionsgeschütztes Sensordesign und schützendes Chassis/Gehäuse
- Zuverlässige Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit und Empfindlichkeit (Unsicherheit <5-10% des Signals)
- Schnelle Wiederherstellung und Reaktionszeit (<1s)
- Lange Lebensdauer (>5 Jahre)
- Geringe Querempfindlichkeit (z. B. Kohlenwasserstoffe, Schwefelwasserstoff, Kohlenmonoxid)
- Stabiles Signal mit geringem Rauschen
- Anzeige von Wasserstoff im Konzentrationsbereich von 0,01-10% (Sicherheit) oder 1-100% (Brennstoffzellen)
- Robustheit einschließlich geringer Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsparametern wie: Temperatur (1-30-80°C [Sicherheit], 70-150°C [Brennstoffzellen]), Druck (80-110 kPa), relative Luftfeuchtigkeit (10-98%) und Gasdurchflussrate.

Tabelle 1: Zielspezifikationen für Wasserstoffsensoren. Angepasst aus (Manjavacas und Nieto, 2016).

Parameter	Wert
Messbereich	0.1-10%
Betriebstemperatur	-30 bis 80°C
Reaktionszeit	< 1s
Genauigkeit	5% des Skalenendwertes
Gas Umwelt	Umgebungsluft, 10-98 Relative Luftfeuchtigkeit %.
Lebenslang	10 Jahre
Störung	Widerstand

Arten von Sensoren

In diesem Abschnitt werden wir fünf der wichtigsten Typen von Wasserstoffsensoren betrachten, die auf dem Markt erhältlich sind. Obwohl hier fünf aufgeführt sind, gibt es Berichte über andere Sensortypen, die entweder bereits auf dem Markt sind oder gerade auf den Markt kommen. Hubert et al. zum Beispiel hat die verschiedenen Arten von Wasserstoffsensoren in 8 Hauptkategorien unterteilt:

1. Akustisch.
2. Optisch.
3. Mechanisch.
4. Widerstandsfähig.
5. Wärmeleitfähigkeit.
6. Katalytisch.
7. Elektrochemisch.
8. Arbeitsfunktion basiert.

Autoren wie Pham und Brown hingegen haben die Sensortypen in solche unterteilt, die 2D-Materialien verwenden.

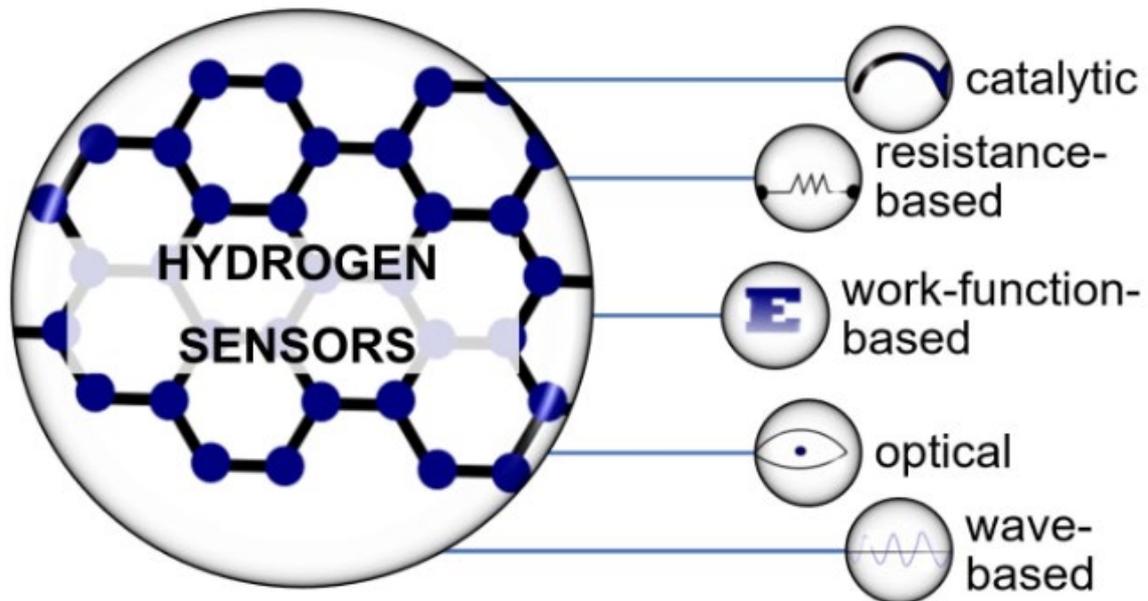


Abbildung 2: Verschiedene Arten von Sensoren, die 2D-Materialien verwenden. Angepasst von (Pham und Brown, 2020).

Elektrochemische Sensoren

Elektrochemische Sensoren funktionieren, indem ein elektrischer Strom durch eine Sensorelektrode fließt, die durch eine elektrochemische Reaktion erzeugt wird. Diese Reaktion findet an der Oberfläche der Sensorelektrode statt, die mit einer Art Katalysator, z. B. Platin, beschichtet ist. Ein elektrochemischer Sensor besteht theoretisch aus einer metallischen Anode und einer metallischen Kathode, die in eine elektrolytische Lösung getaucht sind, um den Ionentransport zwischen den beiden Elektroden zu ermöglichen. Normalerweise haben elektrochemische Sensoren zwei oder drei verschiedene Elektrodenkonfigurationen mit einer Membran für den Gastransport, wobei der elektrische Strom proportional zur Wasserstoffkonzentration ist und dieser Strom zur Bestimmung der Gaskonzentration gemessen werden kann. Manchmal ist der Elektrolyt ein festes Polymer, wodurch die Möglichkeit des Auslaufens entfällt, die bei der Verwendung von flüssigen Elektrolyten auftreten kann. Potentiometrische und amperometrische Sensoren sind die beiden Hauptkonfigurationen elektrochemischer Sensoren.

Amperometrisch - arbeitet mit einer konstanten Spannung und das Sensorsignal ist ein Strom.

Pententiometrisch - Betrieb bei Nullstrom, und das Sensorsignal ist die Potenzialdifferenz zwischen der Messelektrode und einer Referenzelektrode.

Ein Vorteil elektrochemischer Sensoren ist, dass sie kommerziell gut etabliert sind, eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Wasserstoff aufweisen und sehr wenig Strom verbrauchen. Außerdem sind sie recht kostengünstig und haben eine sehr gute Präzision. Ein wesentlicher Nachteil elektrochemischer Sensoren besteht darin, dass ihre hohe Empfindlichkeit gegenüber Wasserstoff im Laufe der Zeit durch den Abbau des elektrochemischen Katalysators abnimmt und sie leicht durch Prozessgase verunreinigt werden. Außerdem haben sie eine mäßige Selektivität und arbeiten in einem begrenzten Temperaturbereich.

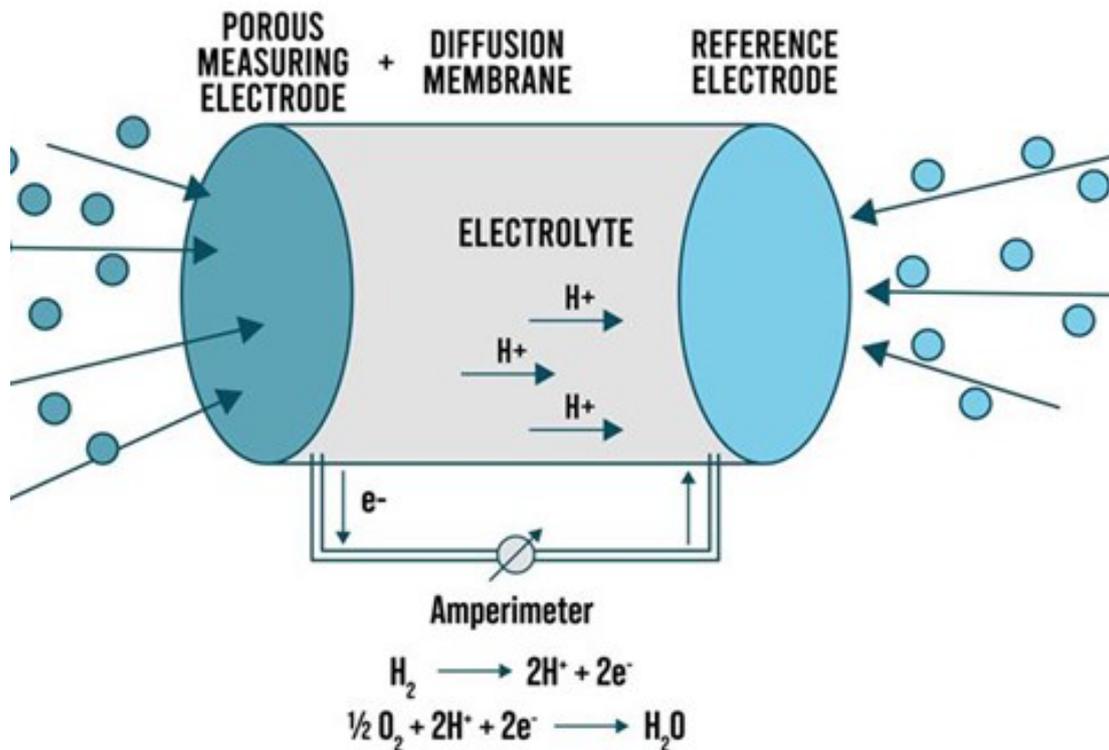


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Messprinzips eines elektrochemischen Wasserstoffsensors.

Sensoren für die Wärmeleitfähigkeit

Wärmeleitfähigkeitssensoren arbeiten nach dem Prinzip der temperaturbedingten Veränderung eines elektrisch beheizten Sensorelements. Die Wärmeleitfähigkeit ist eine Eigenschaft für jedes Gas. Die Messwerte sind für Wasserstoff positiv, wobei Luft als Referenzgas verwendet wird. Der Grund dafür

ist, dass der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient für Wasserstoff bei normalen Bedingungen (273 K und 101325 Pa) der größte aller bekannten Gase ist. Wie in Abbildung 5 unten dargestellt, misst ein Wärmeleitfähigkeitssensor die Konzentration eines Gases in einem binären Gemisch durch Messung der Wärmeleitfähigkeit zum Referenzgas. Das Sensorelement besteht aus Thermistoren, von denen einer mit dem Messgas und der andere mit dem Referenzgas in Kontakt steht. Die Temperatur des Sensorelements, die den elektrischen Widerstand bestimmt, wird durch den Wärmeverlust durch das umgebende Gas bestimmt, wobei das Sensorsignal eine Änderung des Widerstands ist. Diese Änderung ist proportional zur Wasserstoffkonzentration im Gasgemisch.

Ein Vorteil von Wärmeleitfähigkeitssensoren ist, dass sie sehr stabil sind, da es keine chemische Wechselwirkung gibt. Dies bedeutet letztlich, dass sie viel weniger anfällig für Verunreinigungen sind. Darüber hinaus sind sie hochpräzise, zuverlässig, haben eine lange Lebensdauer (>5 Jahre) und verfügen über einen großen Wasserstoffnachweisbereich (<1-100% H₂).

Die Verwendung dieses Sensortyps hat jedoch auch einige Nachteile. So haben Wärmeleitfähigkeitssensoren Schwierigkeiten, niedrige Konzentrationen von Wasserstoffgas zu erkennen. Aus diesem Grund werden sie in der Regel mit anderen Arten von Wasserstoffsensoren gekoppelt. Da sie auch eine geringe Gasselektivität haben, ist dies ein Problem bei Prozessanwendungen, nicht aber, wenn nur ein brennbares Gas vorhanden ist.

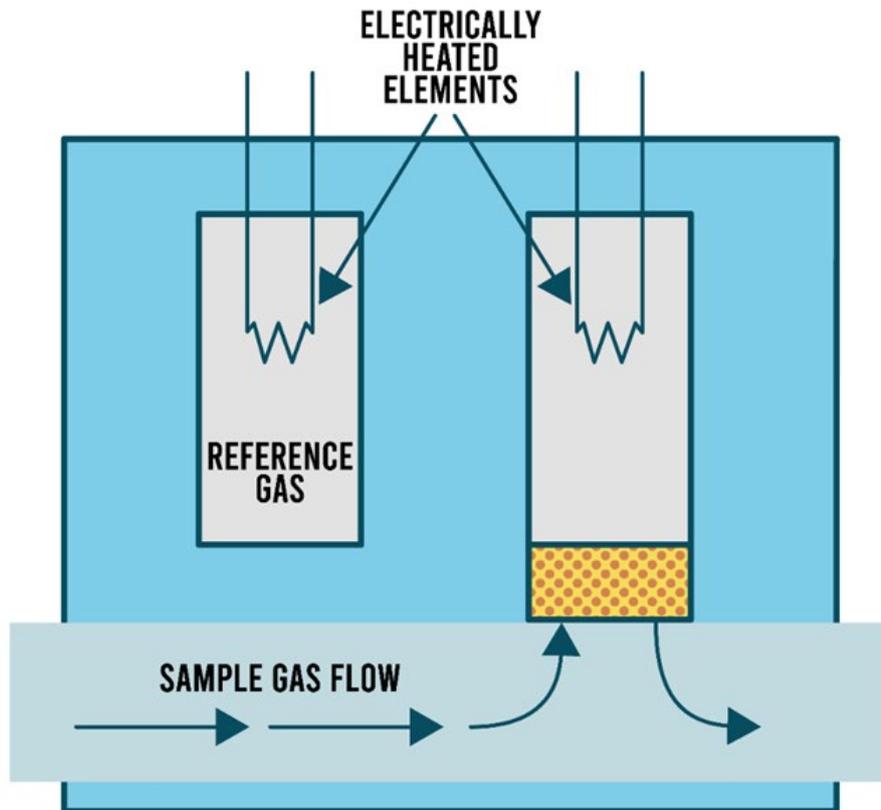


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Wärmeleitfähigkeitssensors.

Katalytische Sensoren

Katalytische Wasserstoffsensoren basieren auf der Gasoxidation an der Oberfläche eines elektrisch beheizten katalytischen Elements. Diese Oxidation nutzt den Sauerstoff der Luft und bewirkt einen Temperaturanstieg auf dem Sensorelement, der von der Gaskonzentration abhängt. Der gebräuchlichste Detektortyp ist der Pellistor, der aus zwei Keramikugeln mit eingebetteten Platindrähten besteht, von denen eine mit einem Katalysatormaterial beschichtet ist, in dem sich Wasserstoff oxidiert. Die Oxidation des Gases führt zu einem Temperaturanstieg an der Katalysatorkugel, der eine Änderung des elektrischen Widerstands des Platindrahtes bewirkt, der auch als Hezelement fungiert und ein Maß für die Gaskonzentration ist.

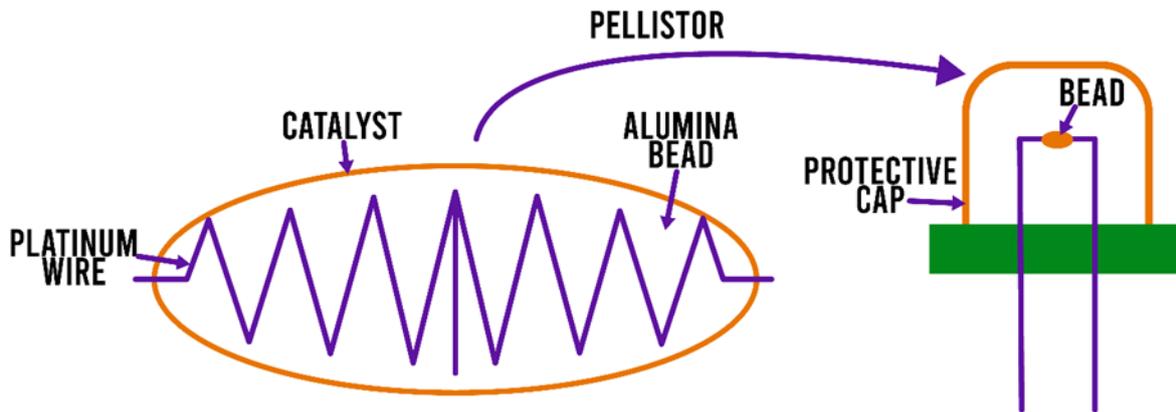


Abbildung 5: Schema eines Pellistors.

Der beheizte Draht befindet sich in einem ex-zertifiziertem Gehäuse, in das ein poröses Sintermetall eingesetzt ist, durch das das Gas eindringen kann. Um diese Veränderungen zu messen, werden die beiden Pellistoren in einer so genannten Wheatstone-Brücke miteinander verbunden, wie in Abbildung 7 unten dargestellt. Eine andere Art von Katalysatorsensor, der thermoelektrische Sensor, basiert auf demselben Prinzip der Erzeugung eines elektrischen Signals durch eine katalysierte exotherme Oxidationsreaktion von Wasserstoff, nutzt aber in diesem Fall den thermoelektrischen Effekt, der im Wesentlichen in einer direkten Umwandlung der Temperaturdifferenz in elektrische Spannung besteht, um das elektrische Signal zu erzeugen.

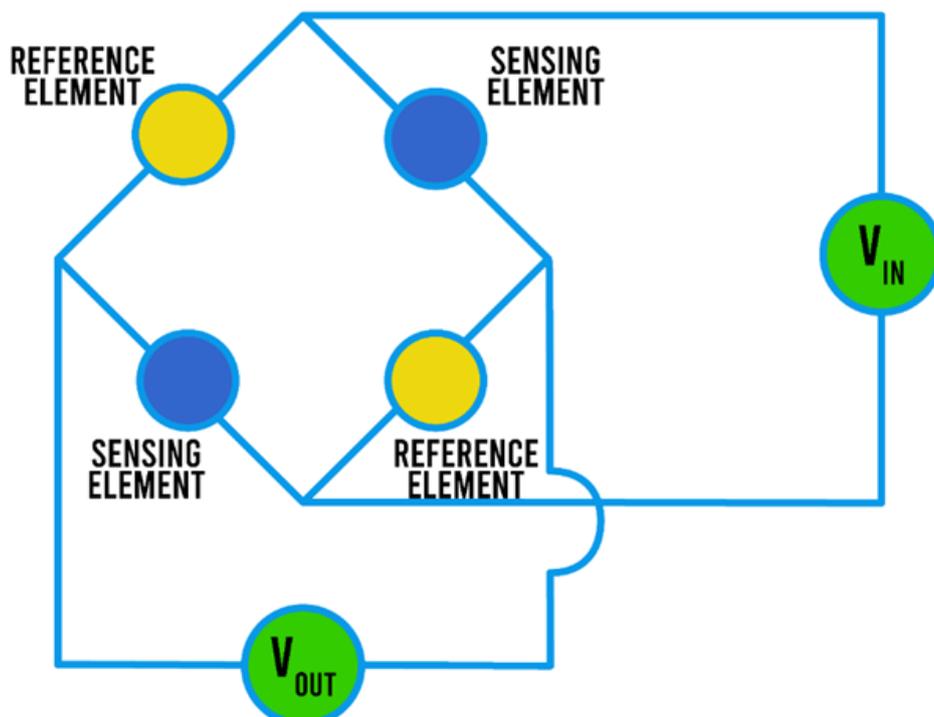


Abbildung 6: Messprinzip eines katalytischen Sensors.

Ein großer Vorteil der katalytischen Sensoren ist, dass sie über eine ausgereifte Technologie verfügen und zur Erkennung aller brennbaren Gase eingesetzt werden können. Diese Detektoren sind klein und werden für die Erkennung brennbarer Gase von 0 % bis 100 % untere Explosionsgrenze (UEG) verwendet.

Es ist zu beachten, dass katalytische Sensoren nicht nur für Wasserstoff geeignet sind. Das bedeutet, dass sie oft nicht zwischen brennbaren Gasen unterscheiden können. Für ihren Betrieb ist das Vorhandensein von Sauerstoff erforderlich, und oberhalb der unteren Explosionsgrenze wird dies nicht empfohlen. Außerdem können sie in gasreichen Atmosphären, z. B. oberhalb der oberen Explosionsgrenze (UEL), falsche Messwerte liefern. Der Katalysator kann auch durch Spurengase wie Schwefelwasserstoff und Silikone vergiftet werden und muss dann regelmäßig kalibriert und ausgetauscht werden.

Halbleitende Metall-Oxid-Sensoren

Das Funktionsprinzip der Metalloxidsensoren (MOX) besteht darin, dass eine Oberflächenwechselwirkung zwischen einem reduzierenden Gas und einem gassensitiven Halbleiter die Leitfähigkeit des letzteren verändert. Grundsätzlich wird ein Metalloxidfilm auf einem Substratmaterial zwischen zwei Elektroden aufgebracht, das gegenüber Wasserstoffgas empfindlich ist (wie in Abbildung 8 unten dargestellt). Die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit des Halbleiters ist ein Maß für die Konzentration des Wasserstoffgases.

Ein Vorteil der Verwendung eines MOX-Detektors ist, dass er eine schnelle Reaktionszeit und eine akzeptable Lebensdauer haben kann. Darüber hinaus handelt es sich um einen kostengünstigen, kleinen Sensortyp mit erträglichem Stromverbrauch.

Ein erheblicher Nachteil ist, dass MOX-Sensoren sehr empfindlich auf Wasserdampf und viele andere Gase reagieren, die zu falschen Messwerten führen können, und dass sie nicht als selektive Geräte gelten. Außerdem haben sie eine lange und nichtlineare Ansprechzeit und sind auch anfällig für Verunreinigungen.

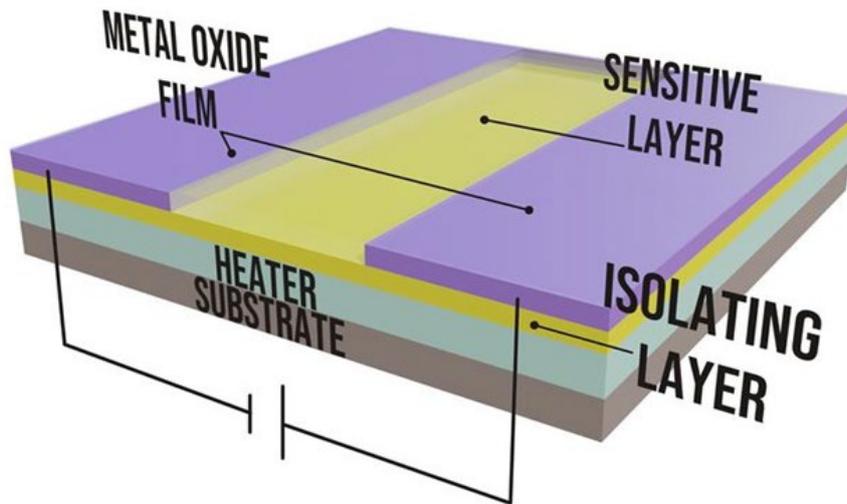


Abbildung 7: Schematische Darstellung eines Metalloxid-Wasserstoffsensors.

Optische Wasserstoffsensoren

Optische Sensoren basieren auf einem optisch aktiven Material, das die Wasserstoffkonzentration in ein optisches Signal umwandelt. Sie sind für den Betrieb in explosionsgefährdeten Bereichen geeignet, da sie elektrisch isoliert sind. Es gibt viele Arten von optischen Sensoren, von denen die meisten auf den optischen Eigenschaften von Palladiumfilmen beruhen. Die Einwirkung von Wasserstoff führt zu einer Dimensionsänderung dieses Metalls und damit zu einer Veränderung seiner effektiven optischen Weglänge, die proportional zur Wasserstoffkonzentration ist. Daher werden verschiedene Techniken zur Messung dieser Dimensionsänderung eingesetzt, z. B. interferometrische oder Reflektivitätsmessungen.

Ein Vorteil des optischen Sensors ist, dass er das Risiko einer Zündquelle am Ort des Lecks ausschließt, da es sich um ein optisches und nicht um ein elektrisches Signal handelt, und dass er aufgrund seiner Konfiguration vor Ort einen großen Überwachungsbereich mit nur einem Gerät abdecken kann. Außerdem ist er weniger empfindlich gegenüber elektromagnetischem Rauschen als andere Sensoren und kann auch in Abwesenheit von Sauerstoff funktionieren.

Ein Nachteil ist jedoch, dass optische Sensoren empfindlich auf Störungen durch das Umgebungslicht und auf Temperaturschwankungen reagieren können.

Standort der Sensoren

Der Standort eines Wasserstoffsensors ist einer der wichtigsten Punkte, die beim Einsatz eines Sensors zu berücksichtigen sind. Der Standort des Sensors steht in direktem Zusammenhang mit der Reaktionszeit.

Die Norm ISO/TR 15916:2015 "Grundlegende Überlegungen zur Sicherheit von Wasserstoffsystemen" ("ISO - ISO/TR 15916:2015 - Grundlegende Erwägungen für die Sicherheit von Wasserstoffsystemen", n.d.) enthält einige Vorschläge für die Anbringung von Wasserstoffsensoren:

1. Orte, an denen sich Wasserstoff ansammeln könnte
2. An Wasserstoffanschlüssen, die routinemäßig getrennt sind (z. B. Wasserstofftankstellen)
3. In Gebäudeabluftkanälen, wenn Wasserstoff im Gebäude freigesetzt werden könnte
4. In Ansaugkanälen von Gebäuden, wenn Wasserstoff in das Gebäude getragen werden könnte
5. Orte, an denen Wasserstoff auslaufen oder verschüttet werden kann

Abgesehen von diesen fünf Punkten und der Tatsache, dass man das Wasserstoffsystem, in dem ein Detektionssystem installiert werden soll, genau kennen muss (Rohrverbindungen, Vorlauf-/Rücklaufrohre von Lüftungsanlagen), sind weitere Hilfsmittel erforderlich, um die Detektoren richtig zu lokalisieren.



Abbildung 8: Honeywell BW Solo Wasserstoff (H2) Einzelgasdetektor.

Wartung von Wasserstoffsensoren

Bei Wasserstoffsensoren ist das Sensorelement das empfindliche Element, das für die Umwandlung einer physikalischen Größe wie der Wasserstoffkonzentration in ein nützliches Ausgangssignal verantwortlich ist. Ein Messwandler wiederum wandelt das Ausgangssignal in aussagekräftige Informationen um, die von der Benutzeroberfläche angezeigt werden. Die Leistung der meisten Wasserstoffdetektoren verschlechtert sich mit der Zeit, wobei die Geschwindigkeit der Verschlechterung vom Typ des Wasserstoffsensors und den Betriebsbedingungen abhängt. Die Alterung des Sensorelements kann zu einer zeitlichen Abweichung führen. Daher ist eine Wartung unerlässlich, um die Leistungsfähigkeit von Wasserstoffdetektoren aufrechtzuerhalten, und sie ist für eine sichere Verwendung erforderlich. Im Hinblick auf die genannten Informationen sollten die Detektoren:

- Kalibriert (Nullpunkt- und Empfindlichkeitseinstellung) mit einem Standardgas gemäß dem in der Bedienungsanleitung beschriebenen Verfahren.
- Regelmäßige Reinigung, insbesondere des Detektorkopfes, damit das Gas das empfindliche Element erreichen kann.
- Regelmäßig auf mögliche Fehlfunktionen, sichtbare Beschädigungen oder andere Verschlechterungen überprüft.

Wasserstoffsensor Kalibrierung

Bei Wasserstoffsensoren muss die Kalibrierung eine Funktion sein, die sich auf die Wasserstoffkonzentration und das Signal des Sensors bezieht. Außerdem sollte es möglich sein, eine Referenz zu erhalten, um die Genauigkeit des Sensors zu bestimmen. Im Idealfall wird eine lineare Reaktion erwartet, aber jede Art von Sensortechnologie hat ihre eigene, einzigartige Reaktion. Diese Tatsache wird deutlich, wenn elektrochemische, Halbleiter- und katalytische Sensoren verglichen werden (Hübert et al., 2011). Dies ist in Abbildung 10 unten zu sehen, wobei auch ein Vergleich mit der linearen und nichtlinearen Reaktion in Abbildung 9 vorgenommen wird. In Abbildung 10 zeigt der erste Sensor eine lineare Reaktion, während bei elektrochemischen und Halbleitersensoren eine nichtlineare Reaktion auftritt. Bei hohen Wasserstoffkonzentrationen führt eine nichtlineare Reaktion eines Sensors zu einer Abnahme seiner Empfindlichkeit. Diese Tatsache muss untersucht werden, wenn eine Sensortechnologie für eine bestimmte Anwendung ausgewählt werden soll.

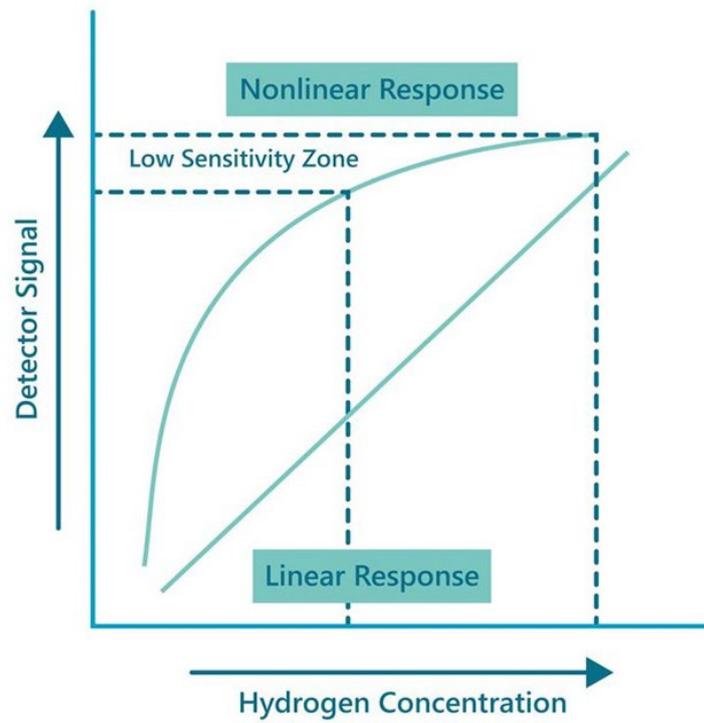


Abbildung 9: Vergleich der nichtlinearen und linearen Reaktion eines Wasserstoffsensors im Zusammenhang mit dem Kalibrierungsvorgang.

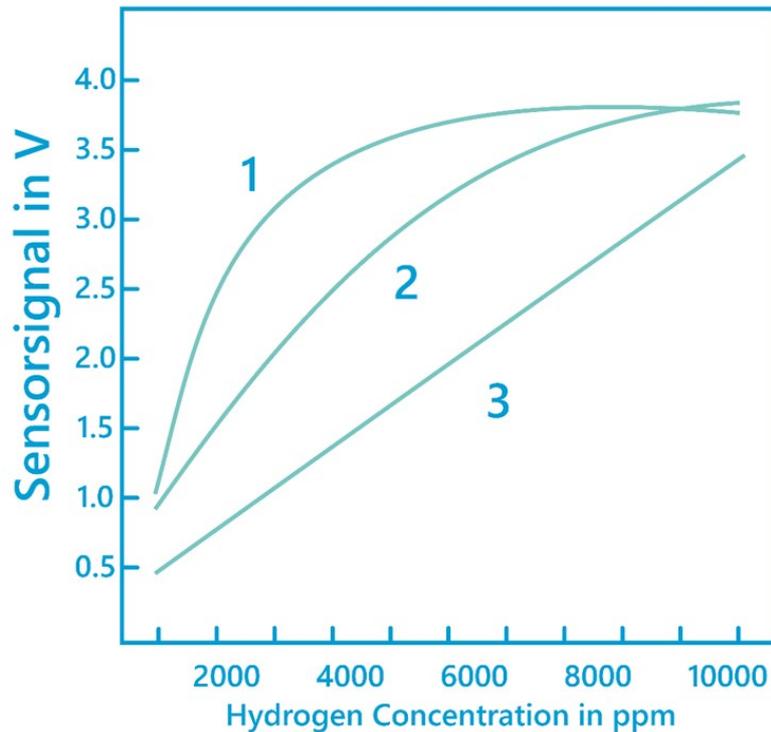


Abbildung 10: Kalibrierungskurve von drei verschiedenen Wasserstoffsensoren über den Konzentrationsbereich von 0,1-1%;
 1) Halbleitersensor, 2) elektrochemischer Sensor, 3) Sensor mit katalytischer Verbrennung.

Ultimativer Vergleich von Wasserstoffsensortechnologien

Bei der Entscheidung, welcher Typ von Wasserstoffsensor eingesetzt werden soll, sollte man eine Vergleichstabelle heranziehen. Die typischen Merkmale und Informationen zu den fünf Haupttypen von Wasserstoffsensoren sind in der nachstehenden Tabelle 2 zusammengefasst. Darüber hinaus enthält diese Tabelle die technischen Daten der verschiedenen Sensoren, die im Handel erhältlich sind.

Tabelle 2: Überblick über die Technologien für Wasserstoffsensoren.

	Funktionsprinzip	Sensor-Typ				
		Elektrochemisch	Wärmeleitfähigkeit	Katalytisch	MOX	Optisch
		Elektrischer Strom	Temperaturänderung	Temperaturbeständigkeit	Änderung der Leitfähigkeit	Optisch aktives Material
Leistung	Lebenszeit (Jahre) Selektivität T₉₀ (seg) Messbereich (Vol%) Einfluss der Luftfeuchtigkeit Temperaturbeeinflusst Stromverbrauch Kosten	2 Annehmbar <30 <4% Ja Ja Niedrig Gut	>5 Niedrig <15 <1-100% Ja Ja Niedrig Niedrig	>5 Niedrig <20 <4% Nein Nein Erträglich Niedrig	2-4 Niedrig <30 <2% Ja Ja Erträglich Niedrig	<2 -- <60 0.1-100% Nein Ja Erträglich Hoch
Merkmale	Vorteile	1. kommerziell gut etabliert 2. Gutes Niveau der Präzision 3. Klein in der Größe	1. Stabile Geräte 2. Klein in der Größe	1. Hochentwickelte Technologie 2. Klein in der Größe	1. Hohe Empfindlichkeit 2. Klein in der Größe	1. Breites Einsatzgebiet 2. Nicht elektromagnetisch beeinflusst 3. Keine Zündquelle
	Benachteiligungen	Leicht kontaminierbar	1. Schwierigkeit beim Nachweis sehr niedriger Wasserstoffkonzentrationen	1. Regelmäßige Kalibrierung erforderlich 2. Kann durch Spurengase vergiftet werden 3. Kann falsche Messwerte liefern	1. Nichtlineare Reaktionszeit 2. Anfällig für Verunreinigungen 3. Kann falsche Messwerte liefern	Empfindlich gegenüber Störungen durch Umgebungslicht
	Gemeinsame Anwendungen	Lecksuche + Prozessüberwachung	Prozessüberwachung	Lecksuche	Lecksuche	Lecksuche

Arten von Wasserstoffbränden/Flammen

Bei der Verbrennung von Wasserstoff entsteht nur Wasserdampf, aber kein Rauch, es sei denn, es sind auch andere brennbare Stoffe am Feuer beteiligt. Die adiabatische Flammentemperatur von Wasserstoff beträgt 2403 K. Eine offensichtliche Gefahr, die sich aus dieser Eigenschaft ergibt, sind schwere Verbrennungen bei Personen, die den Wasserstoffflammen direkt ausgesetzt sind. Im Vergleich zur Verbrennung von Kohlenwasserstoffen strahlt die Wasserstoffflamme deutlich weniger Wärme ab. Daher spürt der Mensch diese Hitze erst bei direktem Kontakt mit der Flamme. Ein Wasserstoffbrand kann unentdeckt bleiben und sich trotz direkter Überwachung durch Personen in den Bereichen ausbreiten, in denen Wasserstoff auslaufen, verschüttet werden oder sich ansammeln und potenziell brennbare Gemische bilden kann. Die mit der Wärmestrahlung verbundenen Gefahren sind im Vergleich zu Brennstoffen auf Kohlenwasserstoffbasis geringer. Die Gefahr, die zu schweren Verbrennungen führen kann, liegt in der schlechten Sichtbarkeit von Wasserstoffflammen bei Tageslicht, wenn Wasserstoffflammen durch direkten Kontakt erkennbar sind.

Wasserstoff-Flammen-Detektion

Ein Brandmeldesystem ist in der Regel so konfiguriert, dass es einen optischen oder akustischen Alarm auslöst und ein Brandbekämpfungssystem aktiviert. Es gibt zahlreiche Methoden zur Erkennung eines Feuers, die auf den folgenden Punkten basieren:

Wärmeerkennung	Schmelzbare Glühbirnen
Frequenzkompensierte Wärmemelder	Schmelzsicherungsstopfen
Lineare Wärmedetektion (durch brandgefährdete Bereiche verlegte Kabel)	Ionisationsraucherkennung
Optische Rauchdetektion (Sichtlinie/Unschärfe)	Raucherkennung mit hoher Geschwindigkeit und hoher Empfindlichkeit
Optische Flammendetektion (IR und UV und kombinierte IR-UV)	Erkennung gasförmiger Verbrennungsprodukte, z. B. flüchtige organische Verbindungen (VOC), Kohlenmonoxid

CCTV-basierte Systeme	
-----------------------	--

Da Wasserstoffflammen im Vergleich zu Wasserstoffflammen bei der Verbrennung deutlich weniger Wärme abstrahlen, nimmt der Mensch diese Wärme erst bei direktem Kontakt mit der Flamme wahr. Daher können Wasserstoffbrände unentdeckt bleiben und sich trotz direkter Überwachung durch den Menschen in den Bereichen ausbreiten, in denen Wasserstoff auslaufen, verschüttet werden oder sich ansammeln und potenziell brennbare Gemische bilden kann. Wasserstoffbranddetektoren können in solchen Situationen helfen, sofortige Maßnahmen zu ergreifen. Wasserstoff-Brandmelder können entweder fest installiert sein, um eine kontinuierliche Überwachung von entfernten Betrieben zu ermöglichen, oder tragbar sein, um vor Ort eingesetzt zu werden. Die gängigsten Typen von Wasserstoffdetektoren sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Vor- und Nachteile der H₂ Flammendetektionstechnologien

Typ	Vorteile	Benachteiligungen
UV/IR	<ul style="list-style-type: none">• Niedrige Fehlalarmrate• Mäßige Empfindlichkeit• Mäßige Geschwindigkeit• Automatischer Selbsttest• Nicht geblendet durch CO₂ Feuerschutzentladungen	<ul style="list-style-type: none">• Hochpreisige• Falsche Alarmer möglich bei Kombination von IR- und UV-Quellen• Geblendet von dichtem Rauch und Dämpfen
Dreifach-IR	<ul style="list-style-type: none">• Sehr hohe Empfindlichkeit• Sehr hohe Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none">• Hochpreisige
IR/vis-Bildgebung	<ul style="list-style-type: none">• Bilder der Flamme• Verwendet von der NASA	<ul style="list-style-type: none">• Hochpreisige

UV-Detektoren

UV-Systeme werden gegenüber IR-Systemen bevorzugt, da sie extrem empfindlich sind. Außerdem ist die Wahrscheinlichkeit, auf ein Störsignal zu stoßen, geringer, solange die UV-Detektoren vom Sonnenlicht abgeschattet werden. Nachteilig sind die Kosten und die geringere Effizienz bei Flammen mit flüssigem Wasserstoff, da dieser beschlägt und die UV-Strahlen blockiert. Falsche Alarme können durch zufällige UV-Quellen wie Blitze oder Lichtbogenschweißen ausgelöst werden. Die Fähigkeit des Detektors, zwischen sonnenlichtinduzierter UV-Strahlung und Wasserstoffflammen zu unterscheiden, um Fehlalarme zu vermeiden, ist die größte Herausforderung.

Anschließend können verschiedene Techniken angewandt werden:

- Verwendung eines Filters, der alle Wellenlängen $>0,29\mu\text{m}$ abschneidet, um Wellenlängen zu erhalten, die nur einem Wasserstoffbrandunfall zuzuschreiben sind. Nachteilig ist, dass bei dieser Lösung auch fast 66 % des UV-Bandes abgeschnitten werden, wodurch die Genauigkeit des Detektors sinkt.
- Die Verwendung von zwei gleichzeitigen Zellen, die denselben Bereich überwachen. Eine der Zellen analysiert hauptsächlich das sichtbare Spektrum, in dem das Signal des Sonnenlichts im Vergleich zum Signal der Wasserstoffflamme überwiegt, während sich die andere auf den UV-Bereich konzentriert. Das UV-Signal der UV-Zelle wird nur dann berücksichtigt, wenn es von dem Signal der anderen Zelle abweicht.
- Auch das Flackerverhalten einer Flamme kann berücksichtigt werden. In diesem Fall würde der modulierte Teil des UV-Signals betrachtet werden. Diese Technik ist möglicherweise nicht mit der erforderlichen schnellen Reaktion vereinbar.
- Wenn bekannt ist, dass die Störsignale gering sind, kann ein positives Signal angenommen werden, wenn ein bestimmter Schwellenwert erreicht wird.

IR-Detektoren

Nebel kann die UV-Übertragung auf die Sensorzelle behindern. IR-Detektoren sind jedoch unempfindlich gegenüber diesen Problemen. Außerdem emittieren Wasserstoffflammen signifikante IR-Strahlung, so dass sie für die Erkennung von Wasserstoffflammen verwendet werden können. Die größte Herausforderung besteht nach wie vor darin, die IR-Strahlen des Wasserstofffeuers von denen

der Sonne, anderer Lichtquellen oder heißer Materialien zu unterscheiden. IR-Quellen, die mit alternativen elektrischen Strömen betrieben werden, können aufgrund ihres eigenen, mit 100 Hz modulierten Signals gefiltert werden. Allerdings weisen weder heiße Körper noch Sonnenlicht ein modulierte Signal auf, das aufgefangen und gefiltert werden kann. Die Lösung besteht darin, sich auf die Wellenlänge von 1,7 μm zu konzentrieren, die einer Spitzenemission von Dampf entspricht.

Wärmedetektoren und Bildgebungssysteme

Thermische Detektoren

Thermische Detektoren, z. B. Temperatursensoren, erfassen die Wärme der Flamme. Wärmemelder arbeiten als Temperaturanstiegsgeschwindigkeits- oder Überhitzungsmessgeräte, um Strahlungs-, Konvektions- oder Leitungswärme zu erfassen. Diese zuverlässigen und geprüften Detektoren verschiedener Typen eignen sich für die Erkennung von Wasserstoffbränden, sofern sie in der Nähe des Brandherdes angebracht werden. Solche Melder müssen sehr nahe am Brandherd oder an der Brandstelle angebracht werden.

Bildgebende Systeme

Bildgebende Systeme sind hauptsächlich im thermischen IR-Bereich verfügbar und bieten keine kontinuierliche Überwachung mit Alarmfunktion. Ein geschulter Bediener ist erforderlich, um zu erkennen, ob es sich bei dem betrachteten Bild um eine Flamme handelt. UV-Bildgebungssysteme erfordern eine spezielle Optik und sind sehr teuer. Andere gängige Feuermelder, wie z. B. solche mit ionisierenden Zellen, sind für die Erkennung von Wasserstoffbränden nicht geeignet.

Referenzen

Hübert, T., Boon-Brett, L., Black, G., Banach, U., 2011. Wasserstoffsensoren - Ein Überblick. Sensors Actuators, B Chem. 157, 329-352.

ISO - ISO/TR 15916:2015 - Grundlegende Überlegungen zur Sicherheit von Wasserstoffsystemen [WWW-Dokument], n.d. URL <https://www.iso.org/standard/56546.html> (Zugriff am 30.8.22).

Manjavacas, G., Nieto, B., 2016. Hydrogen sensors and detectors, Compendium of Hydrogen Energy. Elsevier Ltd.