

Modul Wasserstoffsicherheit, Risiken, Normen und Vorschriften

Eine akzeptable Leistung in diesem Modul ist die zufriedenstellende Erreichung der in diesem Teil der Modulspezifikation festgelegten Standards. Alle Abschnitte der Erklärung der Standards sind obligatorisch und können nicht geändert werden.

Inhalt

Modul	Wasserstoffsicherheit, Risiken, Normen und Regulierung	1
ERGEBNIS 1	Nennen Sie die geltenden Gesundheits- und Sicherheitsvorschriften für Arbeitgeber und Arbeitnehmer.	3
	Allgemeine Grundsätze zu Gesundheit und Sicherheit	3
	Verfahren für Gesundheit und Sicherheit.....	3
	Risikobewertungen	4
	Leitfaden für sichere Arbeitsverfahren.....	4
	Sicherheits- und Warnschilder	5
	Kennzeichnung von gefährlichen Gütern für die Beförderung.....	Error! Bookmark not defined.
	Sicherheitsdatenblatt (SDS)	Error! Bookmark not defined.
	Verantwortlichkeiten des Arbeitgebers.....	8
	Häufige Ursachen von Wasserstoffunfällen und Entzündungen.	13
	Notfallverfahren und Anforderungen und Verfahren für das Management von Zwischenfällen..	8
	Terminologie der Reaktion	10
	Gefahren von Wasserstoff	10
	Arten von Unfällen und ihre Folgen.....	16
	Terminologie der Verbrennung	18
	Wasserstoffverträglichkeit.....	19
	Wasserstoffversprödung (HE).....	21
	Verfahren und Zweck der sicheren Lagerung	22
ERGEBNIS 2	Vorbereitung auf den Umgang mit Wasserstoffgas	27
	PERSONALAUSBILDUNG.....	27
	NUTZUNG DER INHÄRENTEN SICHERHEITSMERKMALE	27
	<i>Beseitigung von Gefahren</i>	Error! Bookmark not defined.
	FREISTELLUNGSBESTIMMUNGEN	Error! Bookmark not defined.
	Sicheres Arbeiten mit Strom.....	Error! Bookmark not defined.
	Factsheet.....	Error! Bookmark not defined.



Sicheres Arbeiten mit Gasen und Kältemitteln.....	29
Arbeiten mit brennbaren Kältemitteln	31
Sicherheit des Elektrolysesystems	32
Wasserstoffgas-Detektionstechnologie.....	35
ZIEL 3 Durchführung einer Risikobewertung in einer bestimmten Wasserstoffumgebung.....	37
Was ist eine Risikobewertung?	37
5-stufiger Ansatz zur Gefahrenerkennung und Risikobewertung	38



ERGEBNIS 1 Nennen Sie die geltenden Gesundheits- und Sicherheitsvorschriften für Arbeitgeber und Arbeitnehmer.

Der Inhalt dieses Moduls soll die Lernenden in die Lage versetzen, in einer Wasserstoffumgebung/an einem Arbeitsplatz sicher zu arbeiten. Dies wird dadurch untermauert, dass die Lernenden Kenntnisse über die einschlägigen Rechtsvorschriften, Rollen/Verantwortlichkeiten und Anforderungen des Common Law bei der Auslegung der geltenden Rechtsvorschriften erwerben. Die Lernenden müssen auch eine Risikobewertung durchführen und Proforma-Dokumente ausfüllen. Das Studium der Gesetzgebung sollte ein Bewusstsein für den Zweck und die Anwendung der Vorschriften zum Management von Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz von 1999 (EU) sowie spezifische Vorschriften, Industrienormen, gesetzliche Anforderungen, Verfahrensregeln, Herstellerempfehlungen und -spezifikationen sowie Umwelanforderungen beinhalten.

Allgemeine Grundsätze zu Gesundheit und Sicherheit

Es gibt viele allgemeine Gefahren, die während des Prüfungs- und Probenahmeverfahrens auftreten können. Außerdem gibt es spezifische Gefahren, die für bestimmte Waren relevant sind. Sie müssen proaktiv vorgehen, um Ihre eigene Sicherheit und die anderer Personen, die mit Ihnen arbeiten oder für die Sie verantwortlich sind, zu schützen. Darüber hinaus müssen Sie darauf achten, dass Sie andere nicht durch eine Kontamination der Waren oder durch Ihr eigenes Handeln einem größeren Risiko aussetzen, indem Sie die Waren in einem gefährlichen Zustand belassen.

Verfahren für Gesundheit und Sicherheit

Gute Gesundheits- und Sicherheitspraktiken liegen in der Verantwortung jedes Einzelnen. Die nationale Gesetzgebung bestimmt, wie Ihre Gesundheits- und Sicherheitspolitik umgesetzt wird. Als Richtschnur sollte jedoch jedes System Folgendes umfassen:

eine erklärte Politik zur individuellen und unternehmerischen Verantwortung für die Sicherheit.

- eine Reihe von Risikobewertungen für die Standorte und die auszuführenden Arbeiten, in denen die Gefahren und Gegenmaßnahmen ermittelt werden.
- Leitfäden für eine sichere Arbeitspraxis mit spezifischen Empfehlungen für sichere Verfahren zur Durchführung der Arbeiten.
- ein Verfahren zur Meldung von Unfällen, das es ermöglicht, Lehren daraus zu ziehen und diese in die Risikobewertungen und die Leitfäden für sichere Arbeitsverfahren einfließen zu lassen.



- regelmäßige Überprüfungen, um sicherzustellen, dass die Risikobewertungen und die Leitfäden für sichere Arbeitspraktiken auf dem neuesten Stand sind (mindestens jährlich - oder nach jeder Änderung, die sich auf Gesundheit und Sicherheit auswirkt).

Bei der Arbeit in gefährlichen Umgebungen ist es sinnvoll, in Teams von mindestens zwei Personen zu arbeiten. Sie können auch ein "Buddy"-System anwenden, bei dem zwei Beamte für die Sicherheit des jeweils anderen verantwortlich sind. Eine Erste-Hilfe-Grundausbildung für alle Mitarbeiter versetzt sie in die Lage, einem Kollegen in Schwierigkeiten schnell zu helfen.

Risikobewertungen

Risikobewertungen können sich entweder auf einen Ort oder ein Verfahren beziehen. Sie sollten alle möglichen Gefährdungen und Gegenmaßnahmen abdecken. Sie sollten für jeden Ort, an dem eine Probenahme stattfindet, eine Risikobewertung durchführen. Eine Gefährdungsbeurteilung ist ein Verfahren zur Verwaltung und Kontrolle von Gesundheit und Sicherheit:

- Identifizierung der Gefahr.
- die Bewertung des Risikos.
- Einführung von Präventiv- und Schutzmaßnahmen zur Verringerung oder Beseitigung des Risikos.
- Überprüfung der Kontrollmaßnahmen, um sicherzustellen, dass sie noch angemessen sind.

Kopien der Risikobewertungen sollten allen Personen, die den Bereich betreten oder dort arbeiten, zur Verfügung stehen und jährlich oder bei jeder Änderung, die sich auf den Standort oder das Verfahren auswirkt, überprüft werden.

Allgemeine Risikobewertungen können als Grundlage für lokale Risikobewertungen verwendet werden. Weitere Informationen über eine Risikobewertung finden Sie in Ergebnis 3. Ihre nationale Verwaltung kann jedoch andere Formulare oder Verfahren verwenden, das Prinzip bleibt jedoch dasselbe.

Leitfäden für sichere Arbeitsverfahren

Sie sollten mit Vorgesetzten und/oder Arbeitsschutzexperten Standardarbeitsverfahren für bestimmte Standorte und Verfahren vereinbaren, z. B. für Arbeiten in oder an Gebäuden:

- Gefrierschränke
- oben auf Tankwagen oder anderen Schüttgutbehältern
- Umschlag von Schüttgut
- Geschäftsräume von Händlern (d. h. unbekannte Orte)

- Bereiche, in denen Kräne und Gabelstapler eingesetzt werden
- Containerterminals
- Roll-on/Roll-off-Terminals
- Bahnterminals

Sichere Arbeitspraktiken können unter anderem folgende Aspekte umfassen:

- zu verwendende persönliche Schutzausrüstung
- Benachrichtigung des Betreibers
- Sicherstellen, dass immer ein Kollege oder Bediener anwesend ist, um Ihre Sicherheit zu gewährleisten
- Verfahren für den Zugang zum Standort
- Probenahmegeräte
- Probenahmeverfahren

Sicherheits- und Warnschilder

Die Schilder und Etiketten dienen dem Schutz Ihrer Gesundheit und Sicherheit sowie der Sicherheit der Personen, die mit Ihnen und in Ihrer Umgebung arbeiten. Sie müssen die Schilder jederzeit beachten und die erforderlichen Vorsichtsmaßnahmen treffen. Europäische Richtlinien wurden verabschiedet, um die Sicherheits- und Warnschilder zu standardisieren. Es kann jedoch sein, dass vorhandene Schilder nicht mit den neuen Entwürfen übereinstimmen. Wenn Sie sich über die Bedeutung eines Schildes nicht im Klaren sind, sollten Sie sich an die Person wenden, die an Ihrem Standort für Gesundheit und Sicherheit zuständig ist, sei es in einem Hafen, an einem Kai, in einem Lagerhaus oder an Bord eines Schiffes oder Flugzeugs.

Die Vereinten Nationen haben internationale Warnzeichen für den Güterverkehr eingeführt, die überall auf der Welt verwendet werden. Dieser Abschnitt gibt daher einen Überblick über die Arten der verwendeten Zeichen und ihre allgemeine Bedeutung.

Verbotszeichen

Ein Verbotsschilder bedeutet, dass die angegebene Handlung oder Tätigkeit verboten ist. Diese Schilder müssen Sie immer beachten. Einige zeigen nur ein Symbol, andere haben einen erklärenden Text darunter.



Kein Zugang für Fußgänger



Kein Trinkwasser



Nicht rauchen

Wenn Sie diese Schilder nicht beachten, können Sie sich und andere in Gefahr bringen, verletzt oder getötet zu werden.

Warnhinweise

Warnschilder sollen Sie auf mögliche Gefahren hinweisen. Die Gefahr kann vorübergehend oder dauerhaft sein. Das Schild soll Sie an die mögliche Gefahr erinnern. Sie müssen die Gefahr bedenken und die notwendigen Vorsichtsmaßnahmen treffen. Das erste Zeichen oben gibt eine allgemeine Warnung - es kann Text hinzugefügt werden, um eine Gefahr zu beschreiben, die nicht durch die anerkannten Symbole abgedeckt ist, oder es kann vor einer Reihe von Gefahren warnen.

Obligatorische Zeichen

Vorgeschriebene Schilder weisen auf eine bestimmte Sicherheitsmaßnahme hin, die Sie ergreifen müssen, bevor Sie den gekennzeichneten Bereich betreten oder mit Ihren Aufgaben fortfahren. Bei Nichtbeachtung dieser Schilder besteht die Gefahr von unmittelbaren Verletzungen und/oder langfristigen gesundheitlichen Problemen. Wenn die richtige Ausrüstung nicht vorhanden ist, dürfen Sie nicht weiterarbeiten.

			
<p>Augenschutz</p>	<p>Kopfschutz</p>	<p>Gehörschutz</p>	<p>Kleidung mit hoher Sichtbarkeit</p>

Sicherheitszeichen

Neben den Verbots-, Warn- und Gebotsschildern wird es auch eine Reihe von Sicherheitschildern geben, darunter Schilder für Notausgänge im Brandfall, Erste-Hilfe-Schilder und Schilder für Feuerlöschgeräte.

		
Erste-Hilfe-Kasten	Augenspülung	Feuerlöscher

Wie in den vorherigen Fällen kann das Schild Text enthalten. Sie sollten sich mit der Lage dieser Schilder vertraut machen, bevor Sie mit der Arbeit beginnen. Sichere Notausgänge und Verfahren sollten in die Risikobewertung und die Leitfäden für sichere Arbeitsverfahren aufgenommen werden.

Weitere Informationen zu diesem Thema finden Sie auf der Europa-Website unter:

<https://echa.europa.eu/-/updated-interactive-guide-on-safety-data-sheets-and-exposure-scenarios-available>.



Die Pflichten des Arbeitgebers

Nach dem Gesundheits- und Sicherheitsgesetz sind Arbeitgeber für das Management von Gesundheits- und Sicherheitsrisiken in ihren Unternehmen verantwortlich. Im Folgenden wird in groben Zügen dargestellt, wie das Gesetz für Arbeitgeber gilt. Vergessen Sie nicht, dass auch Arbeitnehmer und Selbstständige wichtige Pflichten haben

Es ist die Pflicht eines Arbeitgebers, die Gesundheit, die Sicherheit und das Wohlergehen seiner Mitarbeiter und anderer Personen zu schützen, die von ihrer Arbeitstätigkeit betroffen sein könnten. Der Arbeitgeber muss alles tun, was vernünftigerweise praktikabel ist, um dies zu erreichen. Das bedeutet, dass er dafür sorgen muss, dass Arbeitnehmer und andere Personen vor Risiken geschützt werden, die sich aus der Arbeitstätigkeit ergeben.

- Bewerten Sie die Risiken.

Die Arbeitgeber sind nach dem Arbeitsschutzgesetz verpflichtet, die Risiken am Arbeitsplatz zu bewerten. Das bedeutet, dass Arbeitstätigkeiten ermittelt werden müssen, die zu Verletzungen oder Krankheiten führen können, und dass Maßnahmen ergriffen werden müssen, um die Gefahr zu beseitigen oder, falls dies nicht möglich ist, das Risiko zu kontrollieren.

- Informationen über Risiken bereitstellen.

Der Arbeitgeber muss die Arbeitnehmer über die Risiken an ihrem Arbeitsplatz und deren Schutz informieren und sie im Umgang mit den Risiken unterweisen und schulen.

- Konsultieren Sie die Mitarbeiter.

Die Arbeitgeber müssen die Arbeitnehmer zu Fragen der Gesundheit und Sicherheit anhören. Die Anhörung muss entweder direkt oder über einen Sicherheitsvertreter erfolgen, der entweder von der Belegschaft gewählt oder von einer Gewerkschaft ernannt wird.

- Bereitstellung von Informationen zu Gesundheit und Sicherheit.

Die Arbeitgeber sind gesetzlich verpflichtet, das zugelassene Plakat an einer gut sichtbaren Stelle an jedem Arbeitsplatz auszuhängen oder jedem Arbeitnehmer ein Exemplar des zugelassenen Merkblatts auszuhändigen.

- Arbeitnehmer - Meldung eines Gesundheits- und Sicherheitsproblems

Notfallverfahren und Anforderungen und Verfahren für das Management von Zwischenfällen.

Das Personal der Einrichtung, von dem erwartet wird, dass es im Falle einer Wasserstofffreisetzung offensive Maßnahmen ergreift, muss so geschult werden, dass es angemessen reagieren kann, um Menschen und Eigentum zu schützen. Die Schulung sollte sich auf das jeweilige System stützen und mit dem/den anlagenweiten Notfallplan(en) koordiniert werden.



Ein Notfallplan, in dem die Verfahren für einen Zwischenfall beschrieben sind, sollte die Grundlage für eine solche Schulung bilden. Der Notfallplan sollte Folgendes enthalten:

- Evakuierungsverfahren, Beschreibung der Fluchtwege und Festlegung von Aufenthaltsbereichen für nicht reagierendes Personal
- Es sollte ein Alarmsystem oder ein anderes Mittel zur Benachrichtigung der Mitarbeiter, wie z. B. eine Lautsprechanlage, vorgesehen werden.
- Ein Alarmsystem (bestehend aus akustischen und optischen Alarmen) mit unterschiedlichen Signalen für jede Art von Notfall ist vorzuziehen.
- In regelmäßigen Abständen sollten Übungen durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die Mitarbeiter mit den Alarmsignalen vertraut sind und instinktiv wissen, wie sie zu reagieren haben. Die Bedeutungen der verschiedenen Signale sollten in allen Betriebsbereichen ausgehängt werden.
- Verfahren für Mitarbeiter, die kritische Vorgänge während eines Zwischenfalls überwachen
- Maßnahmen, die von Mitarbeitern zu ergreifen sind, die auf Wasserstofflecks, Freisetzungen, Brände und Transportnotfälle reagieren
- Standort der Notfalleinrichtungen
- Angemessene Brandbekämpfungsmaßnahmen
- Schaffung von Sicherheit
- Verfahren zur Erfassung aller Mitarbeiter nach Abschluss der Evakuierung im Notfall
- Verfahren für Mitarbeiter, die medizinische und Rettungsmaßnahmen durchführen
- Die bevorzugten Mittel zur Meldung von Bränden und anderen Notfällen (einschließlich Notrufnummern)
- Aufbau und Pflege der Kommunikation
- Vorbereitung auf eine mögliche Medienberichterstattung
- Kontaktinformationen für Personen, die zusätzliche Informationen oder Erläuterungen zu den in diesem Plan vorgesehenen Aufgaben geben können.

Gefahrenbereiche, Gefahren im Zusammenhang mit der Arbeit in einem Gefahrenbereich, Anforderungen für die Arbeit in einem ausgewiesenen Gefahrenbereich, Arbeitsplatzsituationen, die als Gefahrenbereich eingestuft werden könnten, Gefahren im Zusammenhang mit der Arbeitsumgebung der Gasversorgung und Wasserstoffmerkmale

Terminologie der Wasserstoffreaktion

Ein Wasserstoffmolekül dissoziiert in zwei Atome ($H_2 \rightarrow 2H$), wenn eine Energie zugeführt wird, die gleich oder größer ist als die Dissoziationsenergie (d. h. die Energiemenge, die erforderlich ist, um die Bindung zu brechen, die die Atome im Molekül zusammenhält).

- Wasserstoff hat die kleinste Größe von Atomen/Molekülen und zeichnet sich durch die höchste Diffusionsfähigkeit aus.
- Permeation ist eine Bewegung von Teilchen (Atomen, Molekülen oder Ionen) durch oder in eine durchlässige Substanz.
- Eine Diffusion von Wasserstoff erfolgt "durch die Wände oder Zwischenräume eines Behälters, einer Rohrleitung oder eines Grenzflächenmaterials". Beim cGH2-System führt dies zu einer langsamen Freisetzung von Wasserstoff.
- Wasserstoff durchdringt Metalle in atomarer Form, polymere Materialien in molekularer Form.
- Die Permeation ist bei Speicherbehältern mit metallischer Auskleidung (Typ I, II und III) vernachlässigbar und kann bei Behältern mit polymerer Auskleidung (Typ IV und V) ein Sicherheitsproblem darstellen. Die Permeationsrate von Wasserstoff durch ein bestimmtes Material (J in mol/s/m²) hängt von der Art des Materials, der Temperatur (T in K), dem Lagerstättendruck (p_r in MPa) und der Wandstärke des Behälters (l in m) ab

$$J = P_0 \exp(-E_0 / RT) \frac{\sqrt{p_r}}{l}$$

Parameters dependent of the nature of the material:
 P_0 - pre-exponential factor (mol/s/m/MPa^{1/2});
 E_0 - activation energy (J/mol)

- Je höher der Speicherdruck ist, desto höher ist die Permeationsrate. Die Permeation aus der Wasserstoffspeicherung an Bord ist ein Sicherheitsproblem für geschlossene Räume (Beispiel: ein in einer Garage geparktes BZ-Fahrzeug).
- Wasserstoff kann sich mit der Zeit ansammeln und mit Luft ein entzündliches Gemisch bilden. Infolge der Permeation in geschlossenen Räumen ohne Belüftung kann die untere Entflammbarkeitsgrenze (LFL) von 4 Volumenprozent Wasserstoff in Luft innerhalb eines langen Zeitraums erreicht werden.
- Drei Hauptphänomene beeinflussen die Ausbreitung des eingedrungenen Wasserstoffs: Auftrieb, Diffusion und Ventilation.

Gefahren von Wasserstoff

Analysen von Unfällen zeigen, dass die folgenden Faktoren bei der Entstehung von Systemausfällen von größter Bedeutung sind:



- (a) Mechanisches Versagen des Sicherheitsbehälters, der Rohrleitungen oder der Hilfskomponenten (Versprödung, Wasserstoffversprödung oder Einfrieren)
- (b) Reaktion des Fluids mit einer Verunreinigung (z. B. Luft in einem Wasserstoffsystem)
- (c) Nichtfunktionieren einer Sicherheitseinrichtung
- (d) Betriebliche Fehler

Analysen von Unfällen haben gezeigt, dass die Reaktion auf ein Versagen durch Auslegung oder Betriebsverfahren so gestaltet sein sollte, dass ein einzelnes Versagen nicht zu einer Reihe von Versagen oder einer Kettenreaktion von Versagen führt, d. h., jedes Versagen muss auf ein lokales Ereignis beschränkt sein; andernfalls werden die Gefahr und das Schadenspotenzial erheblich erhöht Zündung.

Brände und Explosionen sind in verschiedenen Komponenten von Wasserstoffsystemen durch eine Vielzahl von Zündquellen ausgelöst worden. Zu den Zündquellen gehörten mechanische Funken von sich schnell schließenden Ventilen, elektrostatische Entladungen in nicht geerdeten Partikelfiltern, Funken von elektrischen Geräten, Schweiß- und Schneidarbeiten, Katalysatorpartikel und Blitzeinschläge in der Nähe des Abluftkamins. Eine potenzielle Brandgefahr besteht immer, wenn Wasserstoff vorhanden ist.

Grüner Wasserstoff (GH₂) diffundiert schnell, wobei Luftturbulenzen die Ausbreitungsgeschwindigkeit von GH₂ erhöhen. Bei einem Austritt von flüssigem Wasserstoff (LH₂) kann es schnell zu einer Verdampfung kommen, so dass sich über eine beträchtliche Entfernung ein brennbares Gemisch bildet. Auch wenn am Ort des Lecks oder der Verschüttung keine Zündquellen vorhanden sind, kann es zu einem Brand kommen, wenn das brennbare Gemisch durch die Bewegung eine Zündquelle erreicht. Beispiel: Die Beobachtung allein ist kein zuverlässiges Verfahren, um Brände von reinem Wasserstoff-Luft-Gemisch zu erkennen oder deren Schweregrad zu beurteilen. Bei einem Unfall kam es zu einem Brand, bei dem ein kleines Leck entstand. Die Anlage wurde abgeschaltet, und die Flamme schien zu erlöschen; geschmolzenes Metall, das aus der Anlage tropfte, wies jedoch darauf hin, dass ein größeres Feuer im Gange war. Wenn ein Gemisch innerhalb der Entflammbarkeitsgrenzen an einem einzigen Punkt entzündet wird, kann es zu einer Verpuffung kommen.



Sicherheit von Wasserstoff: Demonstration der Flammenausbreitung von Wasserstoff

Physiologische Gefährdungen

Personen, die sich bei Leckagen, Bränden oder Explosionen von Wasserstoffsystemen aufhalten, können verschiedene Arten von Verletzungen erleiden. Erstickungsgefahr besteht, wenn jemand einen Bereich betritt, in dem Wasserstoff oder ein Spülgas die Luft verdrängt hat, wodurch der Sauerstoffgehalt unter 19,5 Volumenprozent sinkt.

Druckwellen von Explosionen verursachen Verletzungen aufgrund des Überdrucks an einem bestimmten Ort oder einer Kombination aus Überdruck und Dauer an einem bestimmten Ort.

Die Strahlungswärme, die eine Person von einer GH₂-Luftflamme erreicht und absorbiert, ist direkt proportional zu einer Vielzahl von Faktoren wie Expositionszeit, Verbrennungsgeschwindigkeit, Verbrennungswärme, Größe der Verbrennungsfläche und atmosphärische Bedingungen (insbesondere Wasserdampf).

Kryogene Verbrennungen entstehen durch den Kontakt mit kalten Flüssigkeiten oder kalten Behälteroberflächen.

Die Exposition gegenüber großen LH₂-Austritten kann zu Unterkühlung führen, wenn keine entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden.

Kollisionen während des Transports. Schäden an Wasserstofftransportsystemen (Straße, Schiene, Luft und Wasser) können zu Auslaufen und Lecks führen, die Brände und Explosionen auslösen können. Die meisten Zwischenfälle während des Transports ereigneten sich außerhalb von Industrieanlagen. Einundsiebzig Prozent der Wasserstofffreisetzungen führten nicht zu einer Entzündung. Die relativ wenigen Entzündungen sind möglicherweise auf fehlende Zündquellen oder die schnelle Ausbreitung von Wasserstoff in der Atmosphäre zurückzuführen. In jedem Fall bieten die Unfalldaten einen weiteren Anreiz, Wasserstoff im Freien und außerhalb bewohnter Gebiete zu transportieren, umzuladen und zu lagern.



Häufige Ursachen von Wasserstoffunfällen und Entzündungen.

Allgemeines. Die mit der Verwendung von Wasserstoff verbundenen Gefahren lassen sich in physiologische (Erfrierungen, Atemwegserkrankungen und Erstickung), physikalische (Phasenveränderungen, Bauteilversagen und Versprödung) und chemische (Entzündung und Verbrennung) einteilen. In den meisten Fällen kommt es zu einer Kombination von Gefährdungen. Die Hauptgefahr, die mit jeder Form von Wasserstoff verbunden ist, besteht darin, versehentlich ein entflammbares oder detonierbares Gemisch zu erzeugen, das zu einem Brand oder einer Detonation



führt. Die Sicherheit wird verbessert, wenn die Konstrukteure und das Betriebspersonal sich der besonderen Gefahren bewusst sind, die mit der Handhabung und Verwendung von Wasserstoff verbunden sind.

Lecks

Lecks können innerhalb eines Systems oder in die Umgebung auftreten. Gefahren können durch Luft oder Verunreinigungen entstehen, die in ein kaltes Wasserstoffsystem eindringen. Lecks werden in der Regel durch verformte Dichtungen, falsch ausgerichtete Ventile, defekte Flansche oder Geräte verursacht. Ein Leck kann zu einem weiteren Versagen von Konstruktionsmaterialien führen. Bei LH₂-Lecks kann die Verdampfung von kaltem Wasserstoff in die Atmosphäre eine Warnung darstellen, da Feuchtigkeit kondensiert und einen Nebel bildet. Unentdeckte Wasserstofflecks können zu Bränden und Explosionen führen.

Wasserstoffdispersion

Eine Eigenschaft von Wasserstoff, die die horizontale Ausbreitung von brennbaren Gemischen bei einem Wasserstoffunfall einschränkt, ist sein Auftrieb. Obwohl gesättigter Wasserstoff bei den Temperaturen, die nach der Verdampfung eines Lecks herrschen, schwerer ist als Luft, wird er schnell leichter als Luft, wodurch die Wolke einen positiven Auftrieb erhält. Die Ausbreitung der Wolke hängt von der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung ab und kann durch atmosphärische Turbulenzen und nahe gelegene Strukturen beeinflusst werden. Obwohl kondensierende Feuchtigkeit ein Anzeichen für kalten Wasserstoff ist, gibt die Form des Nebels keine genaue Beschreibung des Standorts der Wasserstoffwolke. Die Verwendung von Deichen oder Barrikaden in der Umgebung von Wasserstoffspeichern sollte sorgfältig geprüft werden, da ausgelaufenes oder verschüttetes LH₂ oder SLH₂ so schnell wie möglich verteilt werden sollte. Deiche oder Bermen sollten im Allgemeinen nicht verwendet werden, es sei denn, ihr Zweck ist es, die Ausbreitung einer ausgelaufenen Flüssigkeit aufgrund von nahe gelegenen Gebäuden, Zündquellen usw. zu begrenzen oder einzudämmen. Eine solche Eindämmung kann jedoch die Ausbreitung einer verschütteten Flüssigkeit durch Begrenzung der Verdampfungsrates verzögern und könnte eine eventuell auftretende Verbrennung beeinträchtigen.

Versagen des Speicherbehälters

Die Freisetzung von GH₂ oder LH₂ kann zu einer Entzündung und Verbrennung führen und Brände und Explosionen verursachen. Die Schäden können sich aufgrund der Bewegung der Wasserstoffwolke über ein wesentlich größeres Gebiet als das der Lagerstätten erstrecken. Das Versagen des Behälters



kann durch Materialversagen, durch übermäßigen Druck aufgrund von Wärmelecks oder durch ein Versagen des Druckentlastungssystems ausgelöst werden.

Unfälle mit Entlüftungs- und Abgassystemen sind auf unzureichende Belüftung und das unbeabsichtigte Eindringen von Luft in die Entlüftung zurückzuführen. Der Rückfluss von Luft kann durch eine geeignete Konstruktion der Entlüftungsschächte, die Bereitstellung von Ersatzluft (oder eine angemessene Zufuhr von Inertgas, je nach Situation), Rückschlagventile oder molekulare Dichtungen verhindert werden.

Spülung

Rohre und Behälter sollten vor und nach der Verwendung von Wasserstoff in der Ausrüstung mit einem Inertgas gespült werden. Stickstoff kann verwendet werden, wenn die Temperatur des Systems über 80 K (-316 °F) liegt, während Helium verwendet werden sollte, wenn die Temperatur unter 80 K (-316 °F) liegt. Alternativ kann eine GH₂-Spülung verwendet werden, um das System auf 80 K (-316 °F) zu erwärmen und dann auf eine Stickstoffspülung umzuschalten, wenn das System unter 80 K (-316 °F) liegt; allerdings kann es zu einer gewissen Kondensation des GH₂ kommen, wenn das System LH₂ enthält. Reste von Wasserstoff oder des Spülgases verbleiben im Gehäuse, wenn die Spülrate, die Dauer oder das Ausmaß der Vermischung zu gering ist.

Beispiel: Eine gefährliche Spülpraxis, die zu einer Explosion führte, ereignete sich, als nur ein Teil eines Wasserstoffsystems isoliert wurde, um die Spülzeit und das Spülvolumen zu reduzieren. Eine vollständige Isolierung kann in der Regel nicht gewährleistet werden, da Wasserstoff dazu neigt, auszutreten.

Versagen des Verdampfungssystems

Rohrleitungsventile in Verdampfungssystemen können versagen und bei niedrigen Temperaturen Verletzungen verursachen. Es kann zur Entzündung des Wasserstoffs kommen, was zu Schäden durch Brände und Explosionen führen kann.

Kondensation von Luft

Eine unisolierte Leitung, die LH₂ oder kaltes Wasserstoffgas enthält, wie z. B. eine Entlüftungsleitung, kann ausreichend kalt sein (weniger als 90 K (-298 °F) bei 101,3 kPa (14,7 psia)), um Luft an der Außenseite des Rohrs zu kondensieren. Die kondensierte Luft, die zu etwa 50 Prozent mit Sauerstoff angereichert sein kann, darf nicht mit empfindlichen Materialien oder Geräten in Berührung kommen. Materialien, die nicht für niedrige Temperaturen geeignet sind, wie z. B. Kohlenstoffstahl, können verspröden und versagen. Bewegliche Teile und elektronische Geräte können in Mitleidenschaft

gezogen werden. Die kondensierte Luft darf nicht auf brennbare Materialien wie Teer und Asphalt tropfen (es kann ein explosives Gemisch entstehen).

Wasserstoffversprödung

Wenn die mechanischen Eigenschaften von metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen durch Wasserstoffversprödung beeinträchtigt werden, kann es zu einem Versagen der Umschließungssysteme kommen, und die daraus resultierenden Leckagen stellen eine Gefahr dar. Wasserstoffversprödung ist ein Langzeiteffekt und tritt bei fortgesetzter Nutzung eines Wasserstoffsystems auf. Vor allem Rohrleitungs- und Behälterbrüche werden durch Materialprobleme wie Wasserstoffversprödung, Spannungskorrosion und Schweißfehler verursacht. Der größte Teil der Schäden wurde durch die Entzündung des Wasserstoffs nach dem Bruch verursacht. Alle Reparaturen und Änderungen an Rohrleitungen und Geräten, die mit Wasserstoff umgehen, müssen sorgfältig geplant und getestet werden.

Arten von Unfällen und ihre Folgen

Eines der besonderen Merkmale von Unfällen mit Wasserstoff ist die Schwere der Folgen, wie die folgende Tabelle zeigt:

Consequences	On a sample comprising 213 cases with known consequences	
	Nb of cases	%
Deaths	25	12
Serious injuries	28	13
Injuries (including serious ones)	70	33
Internal material damage	183	86
External material damage	17	8
Internal operating losses	89	42
Evacuated population	8	3,8

Abbildung 1 https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/SY_hydrogen_GB_2009.pdf

25 tödliche Unfälle mit Wasserstoff, darunter 5 französische Unfälle, machen 12 % der untersuchten Stichprobe aus. Unfälle mit und ohne schwere Verletzungen machen 13 bzw. 33 % der untersuchten Stichprobe aus. Es ist jedoch festzustellen, dass die menschlichen Folgen von Unfällen mit Wasserstoff hauptsächlich die Beschäftigten an den Unfallorten betreffen. Rettungskräfte und die allgemeine Öffentlichkeit sind nur selten betroffen. Somit betreffen alle tödlichen Unfälle, deren Todesfälle

detailliert aufgeführt sind, Beschäftigte. Diese Tatsachen hängen mit der Typologie der Unfälle mit Wasserstoff sowie mit der schnellen Kinetik der zugrundeliegenden Phänomene zusammen: 84 % der untersuchten Ereignisse umfassen Brände und/oder Explosionen. Bei den restlichen 16 % handelt es sich um nicht gezündete H₂-Austritte, Durchlaufreaktionen ohne Explosion oder Korrosion, die vor dem Unfall festgestellt wurde.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Wirtschaftszweige aufgeführt, die von Unfällen mit Wasserstoff betroffen sind

Activities	On a 215 cases sample	
	Nb of cases	%
Chemical sector*	84	39
Refining / petrochemical industry*	47	22
Transport, packaging and storage	35	16
Metallurgy / metal works	17	7,9
Waste treatment / recycling	8	3,7
Nuclear industry	5	2,3

* excluding transport, packaging and storage

Abbildung 2 https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/SY_hydrogen_GB_2009.pdf

Einer der oben erwähnten Unfälle ereignete sich 1988 in Saint-Fons (69), wo Schleifarbeiten an einem Tank mit gelagerter Schwefelsäure geplant waren. Alle Arbeitsverfahren wurden ordnungsgemäß durchgeführt. Dennoch kam es bei Beginn der Arbeiten zu einer Verpuffung im Tank. Es gab einen Todesfall und zwei Schwerverletzte. Der Tank wurde teilweise zerstört. Die Explosion war auf das Vorhandensein von Wasserstoff (100 g) in einem toten Bereich zurückzuführen, in dem keine Messungen vorgenommen wurden. Der Wasserstoff entstand durch die Korrosion des Eisentanks unter Einwirkung von Schwefelsäure.

Es lassen sich zwei Arten von Aktivitäten unterscheiden:

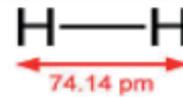
- Tätigkeiten, bei denen Wasserstoff entweder erzeugt oder verwendet wird, z. B. in der Chemie-, Raffinerie-, Verkehrs-, Verpackungs- und Atomindustrie,
- Tätigkeiten, bei denen zufällig Wasserstoff erzeugt wird, wie Metallurgie und Metallverarbeitung, Abwasserentsorgung, Abfallbehandlung und Recycling.

Dihydrogen ist bei Raumtemperatur und -druck gasförmig. Er ist für den Menschen nicht nachweisbar, da er farb- und geruchlos und ungiftig ist und in der Atmosphäre in Spuren vorkommt. Die wichtigsten physikalisch-chemischen Eigenschaften von Wasserstoff führen zu spezifischen Risiken, die weiter unten erläutert werden.

Dazu gehören:

- niedrige Molmasse und geringe Größe, was zu einer hohen Neigung zum Auslaufen führt,
- Schwerentflammbarkeit und geringe Zündenergie,
- Fähigkeit, Metalle und Legierungen durch Veränderung ihrer mechanischen Eigenschaften zu verspröden,
- heftige Reaktionen mit bestimmten Verbindungen aufgrund seiner reduzierenden Eigenschaften.

Dihydrogen



Formula	H ₂
Molar mass	2,016 g/mol
Mass per vol. of gaz (20°C/1 atm)	0,08342 kg/Nm ³
Water solubility (vol/vol at 15,6°C)	0,019
Boiling point (1 atm)	-252,8 °C
Mass per vol. of liquid at boiling point	70,96 kg/m ³

Abbildung 3 https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/SY_hydrogen_GB_2009.pdf

Terminologie der Verbrennung

Die Verbrennung ist ein chemischer Prozess, bei dem Energie aus einem Brennstoff-Luft-Gemisch freigesetzt wird. Bei der Wasserstoffverbrennung wird flüssiger oder gasförmiger Wasserstoff in einem modifizierten Gasturbinenmotor verbrannt, um Schub zu erzeugen. Dieser Prozess ist identisch mit der herkömmlichen Verbrennung, nur dass Wasserstoff den fossilen Brennstoff ersetzt.

Ein Ottomotor besteht aus einem festen Zylinder und einem oder mehreren beweglichen Kolben und funktioniert folgendermaßen:

- Beim Ansaugvorgang wird der Kraftstoff mit Luft vermischt und in den Zylinder eingeleitet.
- Der Kolben verdichtet dann das Kraftstoff-Luft-Gemisch, das durch einen Funken gezündet wird.
- Die Zündung führt zu einer Verbrennung. Die expandierenden

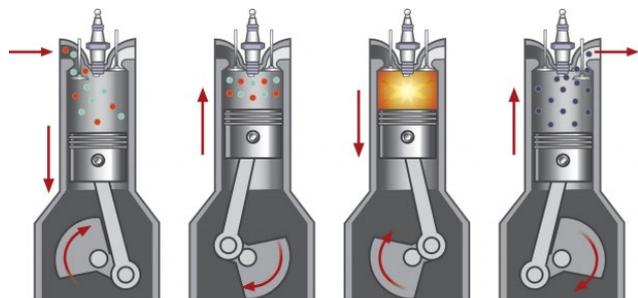


Abbildung 4 <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-11-hydrogen-combustion-explained#:~:text=Bestehend%20aus%20einem%20festen%20Zylinder,Zündung%20erfolgt%20bei%20der%20Verbrennung.>



Verbrennungsgase treiben den Kolben an, der die Kurbelwelle dreht.

- Diese Rotationsbewegung dreht die Räder, im Falle von Autos.

Wasserstoff hat viele einzigartige Eigenschaften, die ihn für die Verbrennung geeignet machen, darunter die folgenden:

- Breiter Entflammbarkeitsbereich: Wasserstoff kann in einem breiten Spektrum von Kraftstoff-Luft-Gemischen verbrannt werden. Wasserstoff kann sogar mit einem "mageren" Gemisch betrieben werden, d. h. die Kraftstoffmenge ist geringer als die für die Verbrennung mit einer bestimmten Luftmenge erforderliche Menge. Dies führt zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch und einer im Allgemeinen niedrigeren Verbrennungstemperatur, wodurch weniger Schadstoffe, wie z. B. NO_x, über den Auspuff ausgestoßen werden.
- Hohe Selbstzündungstemperatur: Die hohe Selbstentzündungstemperatur von Wasserstoff ermöglicht höhere Verdichtungsverhältnisse in einem Wasserstoffmotor im Vergleich zu einem Kohlenwasserstoffmotor.
- Ein höheres Verdichtungsverhältnis führt zu einem höheren thermischen Wirkungsgrad bzw. zu einem geringeren Energieverlust bei der Verbrennung.

Kompatibilität mit Wasserstoff

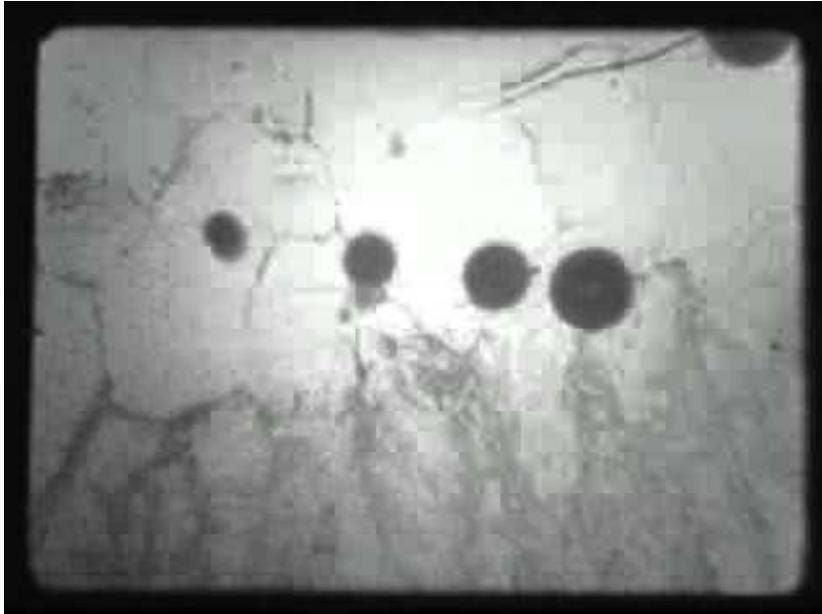
- Wasserstoff hat sehr kleine Atome und eine geringe Viskosität.
- Wasserstoff kann von verschiedenen Materialien (einschließlich der für die Wasserstoffspeicherung verwendeten) leicht absorbiert werden. Dies wiederum führt zu einer Verschlechterung ihrer mechanischen Eigenschaften, was zu unerwünschten Wasserstoffflecks und Strukturbrüchen führen kann.
- Die richtige Auswahl geeigneter Materialien für die Wasserstoffspeicherung ist eine entscheidende Sicherheitsmaßnahme.
- Betroffen sind Rohrleitungen, Wände von Lagerbehältern, Einfüllstutzen, Ventile, Armaturen usw.

Die Verträglichkeit von Wasserstoff mit metallischen Werkstoffen wird durch chemische Wechselwirkungen und physikalische Effekte beeinflusst, zu denen auch die folgenden gehören

- Korrosion (Trockenkorrosion (bei hohen Temperaturen, Wasserstoffangriff), Nasskorrosion (am häufigsten, verursacht durch Feuchtigkeit), Korrosion durch Verunreinigungen in einem Gas Wasserstoff selbst ist ein nicht korrosives Gas.



Der [Stummfilm](#) zeigt Wasserstoffblasen, die an Defekten und anderen Stellen aus Stahl austreten.



Wasserstoffversprödung (HE)

- Versprödung bei niedrigen Temperaturen ("Kaltversprödung")
- Versprödung ist ein Verlust der Duktilität eines Metalls. Durch die Aufnahme von Wasserstoff wird ein Werkstoff spröde und kann brechen.
- HE (das Eindringen von Wasserstoff in ein Material) tritt bei niedrigeren Temperaturen (fast bei Umgebungstemperatur) auf.
- HE wirkt sich negativ auf drei grundlegende Systeme aus: Produktion, Transport/Lagerung und Verwendung.
- Bei höheren Temperaturen (über 200 °C) findet ein Wasserstoffangriff statt.
- Wasserstoff kann entweder in atomarer oder in molekularer Form vorliegen.
- Kein klarer Mechanismus für HE. Es werden mehrere Mechanismen vorgeschlagen:
 - i. Bildung einer Wasserstofflösung in einem Metallgitter
 - ii. Wasserstoffadsorption an der Oberfläche und an der Unterseite eines Metalls
 - iii. Wasserstoffanreicherung in Gefügefehlern (Korngrenzen, Leerstellen, Versetzungen) Wasserstoff kann Verbindungen innerhalb eines Metallgitters bilden (Metallhydride oder Methan).

Hochfeste Stähle sind für HE am empfindlichsten. Wasserstoff kann über mehrere Wege in ein Material eindringen:

- Fertigungsverfahren (Schweißen, Galvanisieren, Beizen usw.).
- Als Nebenprodukt der Nasskorrosion eines Metalls.
- Oberflächenbehandlung (z. B. Kathodenschutz eines Metalls gegen Korrosion).
- Adsorption an einer Metalloberfläche.

HE tritt auf, wenn das Material einer Wasserstoffatmosphäre ausgesetzt ist, z. B. in Lagertanks:

- Interne reversible HE - tritt auf, wenn Wasserstoff während der Verarbeitung in das Metall eindringt; kann zum strukturellen Versagen eines Materials führen, das noch nie Wasserstoff ausgesetzt war.
- Wasserstoffreaktionsversprödung - tritt bei höheren Temperaturen auf, wenn Wasserstoff chemisch mit einem Bestandteil des Metalls reagiert und dabei ein neues Gefügeelement oder eine neue Phase wie z. B. ein Hydrid bildet oder Gasblasen erzeugt, die auch als Blasenbildung bezeichnet werden.

Ein Werkstoff sollte nur dann verwendet werden, wenn Daten vorliegen, die belegen, dass er für die geplanten Einsatzbedingungen geeignet ist. Im Zweifelsfall kann das Material einer HE-Anfälligkeitstestprüfung unterzogen werden (z. B. ISO 11114-4).

- ISO/TR 15916:2015 Grundlegende Überlegungen zur Sicherheit von Wasserstoffsystemen.
- Metalle, die ohne Vorsichtsmaßnahmen verwendet werden können: Messing und Kupferlegierungen (z. B. Beryllium-Kupfer-Würfel); Aluminium und seine Legierungen.
- Materialien, die sehr empfindlich auf HE reagieren: Nickel und hochgradige Nickellegierungen; Titan und seine Legierungen
- Viele Materialien können unter kontrollierten Bedingungen (z. B. begrenzte Belastung, keine Oberflächenfehler usw.) sicher verwendet werden.
- Das von HE betroffene Material kann bei Beanspruchung vorzeitig versagen und manchmal katastrophale Folgen haben.

[Verfahren zur sicheren Lagerung und Zweckbestimmung - Warum Wasserstofflagerung wichtig ist](#)

Die Speicherung von Wasserstoff ist wichtig, wenn er Teil des künftigen erneuerbaren Energiemixes sein soll. Angesichts der internationalen Bemühungen um eine Verringerung der Emissionen und des Einsatzes kohlenstoffbasierter Brennstoffe könnten Wasserstoff-Brennstoffzellen dazu beitragen, eine umweltfreundlichere Lösung für unseren Stromerzeugungsbedarf zu finden, die von kleinen elektronischen Geräten bis hin zu Fahrzeugen, Flugzeugen und sogar ganzen Gebäuden reicht.



Ein weiterer Vorteil von Wasserstoff als Energieträger besteht darin, dass er durch Elektrolyse aus Strom gewonnen werden kann, der aus überschüssigen erneuerbaren Energien erzeugt wird, so dass Wasserstoff gleichzeitig einen entsprechenden Energiebedarf decken kann. Alternativ kann Wasserstoff in großen Mengen für längere Zeiträume gespeichert werden. Anders als bei Batterien geht diese Energie im Laufe der Zeit nicht verloren und kann daher im industriellen Maßstab als Teil eines grünen Energiemixes produziert und gespeichert werden. Dieser gespeicherte Wasserstoff kann dann bei Bedarf als Reserveenergie abgerufen werden.

Wasserstoff kann auch als ergänzende Kraftstoffquelle neben Batterien im Verkehrssektor eingesetzt werden. Das Wasserstoffsystem liefert den größten Teil der Energiespeicherung, und eine Batterie mit geringer Kapazität dient als Puffer für regeneratives Bremsen, zur Deckung eines plötzlichen erhöhten Energiebedarfs und zur Verlängerung der Lebensdauer von Wasserstoff-Brennstoffzellen durch Reaktion auf Laständerungen. Diese ergänzende Kraftstoffmethode wird bereits bei einigen kommerziell erhältlichen Fahrzeugen eingesetzt, wie z. B. beim Wasserstoffauto Honda FCX Clarity. Natürlich werden Wasserstoff-Brennstoffzellen schon seit Jahrzehnten sicher eingesetzt, um sauberen Strom für Gabelstapler zu liefern, die in Innenräumen sauber arbeiten müssen.

Die Wasserstoffspeicherung ist wichtig, wenn sie Teil unserer künftigen sauberen Energielösungen sein soll, doch sind weitere Forschungen und Verbesserungen der Infrastruktur erforderlich, damit Wasserstoff sein volles Potenzial entfalten kann.

Wasserstoff kann auf drei verschiedene Arten gespeichert werden:

1. Als Gas unter hohem Druck
2. In flüssiger Form bei kryogenen Temperaturen
3. Auf der Oberfläche oder im Inneren von festen und flüssigen Materialien

Jede dieser Speichertechniken hat ihre eigenen Anforderungen und Herausforderungen, wie unten dargestellt:

Komprimiertes Gas

Wasserstoff kann unter hohem Druck komprimiert und gasförmig gespeichert werden. Dies erfordert Lagertanks mit einem Druck von 350-700 bar oder 5000-10.000 psi.

Lagerung kryogener Flüssigkeiten

Wasserstoff kann kryogen in flüssiger Form gelagert werden. Um zu verhindern, dass der flüssige Wasserstoff bei -252,8 °C wieder in ein Gas zurücksiecht, sind niedrige Temperaturen erforderlich. Flüssiger Wasserstoff hat eine höhere Energiedichte als gasförmiger Wasserstoff, doch kann es



kostspielig sein, ihn auf die erforderlichen Temperaturen herunterzubringen. Außerdem müssen Lagertanks und Anlagen für die kryogene Flüssigwasserstoffspeicherung isoliert sein, um Verdampfung zu verhindern, falls Wärme durch Leitung, Konvektion oder Strahlung in den flüssigen Wasserstoff übertragen wird. Trotz dieser Herausforderungen ist flüssiger Wasserstoff für Anwendungen, die einen hohen Reinheitsgrad erfordern, sehr gefragt und wird auch in der Raumfahrt verwendet.

Kombinierter kalt- und kryokomprimierter Wasserstoff

Die oben genannten Speichermethoden der Kompression und der kryogenen Kühlung können auch kombiniert werden, um eine Weiterentwicklung der Wasserstoffspeicherung zu schaffen. In diesem Fall wird der Wasserstoff gekühlt, bevor er komprimiert wird. Dies führt zu einer höheren Energiedichte als bei komprimiertem Wasserstoff, erfordert aber, wie bei der kryogenen Flüssigkeitsspeicherung, auch einen höheren Energieaufwand.

Der Energieaufwand für diese verschiedenen Arten der Wasserstoffspeicherung beträgt 9-12 % der für die Kompression (von 1 bis 350 oder 700 bar) zur Verfügung gestellten Energie und etwa 30 % für die Verflüssigung. Der Energieeinsatz variiert je nach Methode, Menge und äußeren Bedingungen; es wird jedoch daran gearbeitet, wirtschaftlichere Speichermethoden mit geringerem Energieaufwand zu finden.

Wasserstoffspeicherung auf Materialbasis

Wasserstoff kann nicht nur als Gas komprimiert oder als Flüssigkeit gespeichert werden, sondern auch mit Hilfe von Materialien. Es gibt drei Arten von Wasserstoffspeichermaterialien: solche, die Wasserstoff durch Adsorption an der Oberfläche des Materials speichern, solche, die den Wasserstoff durch Absorption im Inneren des Materials speichern, und Hydridspeicher, die eine Kombination aus festen Materialien und Flüssigkeit verwenden.

- Bei der Adsorption lagern sich Wasserstoffmoleküle oder -atome an der Oberfläche des Materials an. Bei dieser Methode lagert sich der Wasserstoff an Materialien mit großer Oberfläche an, darunter mikroporöse metallorganische Gerüstverbindungen (MOF), mikroporöse kristalline Alumosilikate (Zeolithe) oder mikroskopisch kleine Kohlenstoffnanoröhren.
- Durch die Adsorption von Wasserstoff an pulverförmigen Materialien können aufgrund der vergrößerten Oberfläche des Sorptionsmittels hohe volumetrische Speicherdichten erreicht



werden. Bei der Absorption wird Wasserstoff in Wasserstoffatome dissoziiert, die in das innere feste Gittergerüst eines Materials eingebaut werden.

- Bei der Hydridspeicherung, dem dritten dieser materiellen Speichersysteme für Wasserstoff, kann die Reaktion von wasserstoffhaltigen Materialien mit Wasser oder anderen flüssigen Verbindungen wie Alkoholen genutzt werden. Bei dieser Methode zur Speicherung von Wasserstoff, die auch als "chemische Wasserstoffspeicherung" bezeichnet wird, wird der Wasserstoff sowohl im Material als auch in der Flüssigkeit gespeichert.
- Metallhydridspeicher funktionieren, indem der Wasserstoff eine interstitielle Verbindung mit elementaren Metallen wie Palladium, Magnesium und Lanthan, intermetallischen Verbindungen, Leichtmetallen wie Aluminium oder einigen Legierungen eingeht. Diese Metallhydride adsorbieren molekularen Wasserstoff an ihrer Oberfläche und bauen ihn dann in elementarer Form unter Wärmeabgabe in das Metallgitter ein. Sie können unter Wärmeabgabe wieder freigesetzt werden, und diese Hydride können große Mengen an Gas absorbieren, wobei Palladium beispielsweise das 900-fache seines eigenen Volumens an Wasserstoff aufnehmen kann.

Wasserstoff kann auch chemisch mit einem flüssigen organischen Wasserstoffträger gebunden werden. Zu diesen chemischen Verbindungen mit hoher Wasserstoffaufnahme-fähigkeit gehören das Carbazolderivat N-Ethylcarbazol und Toluol.

Diese materialbasierten Methoden ermöglichen die Speicherung großer Wasserstoffmengen in Materialien mit geringerem Volumen, bei niedrigerem Druck und bei Temperaturen nahe der Raumtemperatur. Die materialbasierte Speicherung kann eine höhere volumetrische Speicherdichte ermöglichen als die von flüssigem Wasserstoff. Die materialbasierte Speicherung befindet sich jedoch noch in der Entwicklung, da die Kosten für das Be- und Entladen und die Verarbeitung von Wasserstoff noch als zu hoch und zu zeitaufwändig angesehen werden.

Unterirdische Wasserstoffspeicherung

Salzkavernen, erschöpfte Öl- und Gasfelder oder Aquifere können als unterirdische Wasserstoffspeicher in industriellem Maßstab dienen. Solche unterirdischen Lagerstätten werden seit Jahren für Erdgas und Erdöl genutzt, um Angebots- oder Nachfrageschwankungen auszugleichen oder um sich auf eine Krise vorzubereiten.

Die Kavernenspeicherung ist die teuerste der Optionen, aber auch die geeignetste für die Wasserstoffspeicherung. Betriebserfahrungen mit der Wasserstoffspeicherung in Kavernen sind



derzeit auf wenige Standorte in Europa und den USA beschränkt. In der Regel handelt es sich dabei um erschöpfte unterirdische Erdgasspeicher, die als Wasserstoffspeicher für überschüssige erneuerbare Energie genutzt werden.

Gasnetz Wasserstoffspeicher

Als Alternative zur unterirdischen Kavernenspeicherung kann überschüssiger Wasserstoff in das öffentliche Erdgasnetz eingespeist werden, um mit Wasserstoff angereichertes Erdgas (HENG) zu erzeugen.

Wasserstoffangereichertes Stadt- oder Koksgas mit einem Wasserstoffgehalt von über 50 % des Volumens wurde in Deutschland, den USA und Großbritannien über Gasleitungen bis ins 20. Die damals genutzte Infrastruktur existiert noch immer, obwohl sie später für den Transport von Erdgas umgebaut wurde.

Es ist zwar allgemein anerkannt, dass Gas mit einem Wasserstoffgehalt von 10 % in das bestehende Erdgasnetz eingeleitet werden könnte, ohne dass dies negative Auswirkungen auf die Endverbraucher oder die Pipeline-Infrastruktur hätte, doch wurde eine Reihe kritischer Komponenten als ungeeignet für die Verwendung bei diesen Wasserstoffkonzentrationen eingestuft.

Trotz dieses Nachteils ist man der Meinung, dass große Mengen an Wasserstoffgas auf diese Weise gespeichert werden könnten, indem man einen Großteil der bestehenden Erdgasnetze in den Industrieländern nutzt und dann über Wasserstoff-Brennstoffzellen direkt wieder in Strom umwandelt.



ERGEBNIS 2 Vorbereitung auf den Umgang mit Wasserstoffgas

PERSONALAUSBILDUNG

- Schulung zum Umgang mit Wasserstoff. Das Personal, das mit Wasserstoff umgeht oder Ausrüstungen für Wasserstoffsysteme konstruiert, muss mit den physikalischen, chemischen und spezifischen gefährlichen Eigenschaften von GH₂, LH₂ und SLH₂ vertraut sein. Die Schulung sollte detaillierte Sicherheitsprogramme umfassen, die die menschlichen Fähigkeiten und Grenzen berücksichtigen. Das Ziel des Sicherheitsprogramms ist es, Unfälle zu vermeiden und die Schwere von Unfällen zu minimieren.
- Ausbildung der Konstrukteure. Das Personal, das an der Konstruktion und Betriebsplanung von Anlagen beteiligt ist, muss so geschult werden, dass es die anerkannten Normen und Richtlinien sorgfältig beachtet und die gesetzlichen Vorschriften einhält.
- Zertifizierung des Bedienpersonals. Die Bediener müssen für den Umgang mit GH₂, LH₂ und SLH₂ sowie für die Notfallmaßnahmen bei Leckagen und Verschüttungen zertifiziert sein. Das Bedienpersonal muss über alle Änderungen der Sicherheitsverfahren und des Betriebs der Anlage informiert werden.
- Gefahrenkommunikationsprogramm - Entwicklung, Umsetzung und Aufrechterhaltung eines schriftlichen Gefahrenkommunikationsprogramms für ihren Arbeitsplatz.
- Jährliche Überprüfung. Jede Anlage überprüft jährlich alle in der Anlage durchgeführten Tätigkeiten, um sicherzustellen, dass das Sicherheitsschulungsprogramm effektiv funktioniert, und um alle potenziell gefährlichen Tätigkeiten zusätzlich zu den als obligatorisch eingestuften Tätigkeiten zu ermitteln und in das Programm aufzunehmen. Sicherheitsausschüsse der Mitarbeiter, Arbeitnehmervertreter und andere interessierte Gruppen sollten die Möglichkeit erhalten, bei der Ermittlung mitzuwirken.

Nutzung der inhärenten Sicherheitsmerkmale

Unabhängig von der Menge müssen alle Wasserstoffsysteme und -vorgänge frei von Gefahren sein, indem für eine angemessene Belüftung gesorgt wird, die Konstruktion und der Betrieb so gestaltet sind, dass Leckagen verhindert werden, und potenzielle Zündquellen ausgeschaltet werden. Darüber hinaus sollten Barrieren oder Sicherheitsvorkehrungen vorgesehen werden, um Risiken zu minimieren und Ausfälle zu kontrollieren.



Sicherheitssysteme

Sicherheitssysteme sollten installiert werden, um die möglichen Auswirkungen von Gefahren wie Behälterversagen, Lecks und Leckagen, Versprödung, Kollisionen während des Transports, Versagen des Verdampfungssystems, Entzündungen, Brände und Explosionen, Wolkenausbreitung und die Exposition von Personal gegenüber kryogenen oder Flammentemperaturen zu erkennen und ihnen entgegenzuwirken oder sie zu kontrollieren.

Sichere Schnittstelle

- Eine sichere Schnittstelle muss sowohl unter normalen als auch unter Notfallbedingungen aufrechterhalten werden, so dass mindestens zwei Ausfälle auftreten, bevor gefährliche Ereignisse zu Personenschäden, zum Verlust von Menschenleben oder zu größeren Geräte- oder Sachschäden führen können.
- Warnsysteme sollten installiert werden, um anormale Zustände zu erkennen, Fehlfunktionen zu messen und sich anbahnende Ausfälle anzuzeigen. Die Datenübertragungen des Warnsystems mit sichtbaren und hörbaren Signalen sollten ausreichend redundant sein, um zu verhindern, dass ein einzelner Fehler das System außer Betrieb setzt.
- Durchflussregelungen. Sicherheitsventile und Durchflussregelungen sollten so installiert werden, dass sie den Schutz von Personal und Ausrüstung bei der Lagerung, Handhabung und Verwendung von Wasserstoff gewährleisten.
- Sicherheitsvorkehrungen - Die Sicherheitsvorkehrungen des Systems und der Geräte sollten so installiert werden, dass die Geräte automatisch gesteuert werden, um die Gefahren zu verringern, die durch das Auslösen der Warn- und Vorwarnsysteme entstehen. Manuelle Steuerungen innerhalb der Systeme sollten durch automatische Begrenzungsvorrichtungen eingeschränkt werden, um ein Überschreiten der Grenzwerte zu verhindern.

AUSFALLSICHERE KONSTRUKTION

- Zertifizierung. Die sichere Leistung der Ausrüstung, der Energieversorgung und anderer Systemdienste im Auslegungs- und normalen Betriebsmodus ist durch eine Zertifizierung zu überprüfen.
- Ausfallsichere Konstruktion. Jede Störung, bei der potenziell gefährliche Bedingungen auftreten können, muss dazu führen, dass das System in einen Zustand zurückkehrt, der für das Personal am sichersten ist und das geringste Sachschadenpotenzial aufweist.
- Redundante Sicherheit. Redundante Sicherheitsmerkmale müssen so ausgelegt sein, dass bei Ausfall eines Bauteils ein gefährlicher Zustand vermieden wird.



Überprüfung der Sicherheit

Alle Pläne, Entwürfe und Tätigkeiten im Zusammenhang mit der Verwendung von Wasserstoff müssen einer unabhängigen Sicherheitsprüfung unterzogen werden.

- Es sollten Sicherheitsüberprüfungen zu den Auswirkungen der Flüssigkeitseigenschaften, der Ausbildung, der Flucht und Rettung, der Branderkennung und der Brandbekämpfung durchgeführt werden.
- Betriebsabläufe. Es sind Betriebsverfahren für den Normal- und Notfall festzulegen und gegebenenfalls zu überprüfen
- Gefährdungsanalyse. Gefahrenanalysen müssen durchgeführt werden, um Bedingungen zu ermitteln, die Verletzungen, Tod oder Sachschäden verursachen können.
- Meldung von Unfällen. Die Meldung, Untersuchung und Dokumentation von Vorkommnissen, Ursachen und erforderlichen Abhilfemaßnahmen bei Pannen, Zwischenfällen, Testfehlern und Missionsfehlern erfolgt nach festgelegten grundlegenden Verfahren und Richtlinien

Sicheres Arbeiten mit Gasen und Kältemitteln

Einschlägige Sicherheitsnormen und Rechtsvorschriften in der EU Eine Norm ist ein Dokument, das wichtige Anforderungen für ein bestimmtes System, Produkt oder Verfahren festlegt. Normen zielen darauf ab, Kosten zu senken, die Leistung zu erhöhen und die Sicherheit zu verbessern. Normen werden in einem Prozess des Wissensaustauschs und der Konsensbildung unter Fachleuten entwickelt. Sie sind in der Regel freiwillig. Zusätzliche Gesetze und Verordnungen können jedoch auf Normen verweisen und damit deren Einhaltung verbindlich machen.

Legislation	Year	Title	Scope	Relevant harmonised standards*
Directive 94/9/EC ⁵	1994	ATEX 'Equipment' Directive: equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres	- equipment (both electrical and mechanical) being used in potentially explosive atmospheres - defines product categories and characteristics products must meet in order to be installed in potentially explosive atmospheres - dedicated to manufacturers and distributors	EN 1127-1 EN 13463-1, -5, -6 EN 14797 EN 14986 EN 15198 EN 15233 EN 60079-0, -15, -20-1
Directive 2014/34/EU ⁶	2014	Recast to react on Regulation (EU) No. 765/2008, entering into force Apr 20, 2016		
Directive 97/23/EC ⁷	1997	Pressure Equipment Directive (PED)	- pressure equipment and assemblies with internal pressure higher than 0.5 bar - harmonisation of national law regarding design, manufacture and conformity assessment of pressure equipment - more restrictive in regard with flammable refrigerants	EN 378-2 EN ISO 4126 EN 12178 EN 12263 EN 12284 EN 13136 EN 14276-1, -2
Directive 1999/34/EC ⁸	1999	Product Liability Directive	- liability of defective products	
Directive 1999/92/EC ⁹	1999	ATEX 'Workplace' Directive: occupational health and safety in potentially explosive atmospheres	- protection for workers in potentially explosive atmospheres - classification of working areas where explosive atmospheres exist into zones - dedicated to machine owners	
Directive 2006/95/EC ¹⁰	2006	Low Voltage Directive (LVD)	- applying to any 'electrical equipment' designed for use with a voltage rating of between 50 and 1,000 V for A/C and between 75 and 1,500 V for D/C	EN 60204 EN 60335-1, -2-24, -2-34, -2-40
Directive 2006/42/EC ¹¹	2006	Machinery Safety Directive (MSD)	- machinery and similar equipment, safety components - risk reduction through integration of safety into design, production, maintenance, dismantling etc. of machines	EN 378-2 EN 1012 EN 1127-2 EN 60204-1 EN 60335-1,-2-40

Source: <http://www.newapproach.org/Directives/DirectiveList.asp>

Eine Vielzahl von Normen befasst sich mit den technischen Aspekten der Ausrüstung von regionalen Beiräten. Einige enthalten auch Umwelanforderungen (z. B. EN 378). Der zunehmende Einsatz von Technologien, die mit natürlichen Kältemitteln arbeiten, hat in den letzten Jahren kontinuierlich zur Entwicklung entsprechender Normen geführt. Die meisten Normen sind kältemittelunabhängig, doch einige legen Regeln für bestimmte Kältemittel fest.

In Bezug auf die Sicherheit können die Normen Folgendes umfassen:

- Sicherheitsklassifizierung von Kältemitteln (Entflammbarkeit, Toxizität).
- Belegungsarten, Grenzwerte für die Kältemittelfüllmenge und Raumgrößen.
- Sicheres Design und
- Prüfung von Bauteilen und Leitungen (z. B. Drücke),
- Prüfung von Baugruppen (Systemen).
- Elektrische Sicherheit, Zündquellen.



- Installationsbereiche, Positionierung, Verrohrung, mechanische Belüftung, Gaserkennung.
- Anleitungen, Handbücher, Typenschilder.
- Wartung, Instandhaltung und Umgang mit Kühlmitteln. Die wichtigsten dieser Aspekte werden in den folgenden Abschnitten ausführlich behandelt.

Arbeiten mit brennbaren Kältemitteln

Bei der Arbeit mit brennbaren Kältemitteln müssen Konstruktionsmerkmale und Betriebsverfahren festgelegt werden, um die Risiken zu minimieren. Kenntnisse über die Eigenschaften der verschiedenen Kältemittel sind erforderlich. Die Sensibilisierung für Praktiken zur sicheren Handhabung und Lagerung brennbarer Kältemittel und geeignete Systemauslegungen sind Maßnahmen, die mögliche Unfälle verhindern können. Es müssen Vorkehrungen getroffen werden, um das Auftreten von Leckagen zu verhindern und ein gefährliches Maß an freigesetztem Kältemittel zu vermeiden. Bei brennbaren Kältemitteln müssen mögliche Zündquellen beseitigt werden.



Sicherheit des Elektrolysesystems

"Wasserstoff und Sauerstoff sind beide mit besonderen Gefahren behaftet. Diese Gefahren können verstärkt werden, wenn ein Fehler die Vermischung der beiden Stoffe in einem Elektrolysesystem ermöglicht.

Ein tragisches Beispiel für diese erhöhten Gefahren ereignete sich in einer Forschungseinrichtung in Korea, wo ein alkalischer Wasserelektrolyseur zur Erzeugung von Wasserstoff eingesetzt wurde. Dabei drang Sauerstoff in den Wasserstoffspeicher ein, wodurch ein unter hohem Druck stehendes brennbares Gemisch entstand. Der Tank explodierte mit der Kraft von 50 kg TNT. Die Explosion forderte zwei Todesopfer, sechs Verletzte und verursachte einen Schaden von über 30 Millionen Dollar.

Kombinierte Risiken von Wasserstoff und Sauerstoff

Um die Gefahren von Elektrolysesystemen zu verstehen und zu mindern, müssen wir die inhärenten Risiken von Wasserstoff berücksichtigen. Wasserstoff ist leicht brennbar. Er hat einen der breitesten Entflammbarkeitsbereiche aller Brennstoffe und entzündet sich bei einer Konzentration zwischen 4 % und 75 % in der Luft. Es ist viel einfacher, ein brennbares Wasserstoffgemisch zu erzeugen als bei anderen Brennstoffen wie Propan, das sich erst bei einer Konzentration von 2-10 % in der Luft entzündet.

Wasserstoff hat auch eine extrem niedrige Zündenergie, d. h. es bedarf nur geringer Anstrengungen, um eine Verbrennungsreaktion auszulösen. Wasserstoff benötigt nur 0,02 mJ Energie, um sich an der Luft zu entzünden. Damit ist er 14,5 Mal leichter zu zünden als Propan, das mindestens 0,29 mJ benötigt. Elektrolyseanlagen haben viele Komponenten und Prozesse von Balance of Plant, die leicht zu Zündquellen werden können.

Wenn sich H₂ und O₂ ungewollt vermischen, kann das tödliche Folgen haben. In reinem Sauerstoff ist Wasserstoff noch leichter zu entzünden und verbrennt mit wesentlich mehr Energie. Erhöhte Sauerstoffkonzentrationen erhöhen auch die Schwere einer energetischen Explosion, die durch eine Druckwelle einen Energiestoß freisetzt.

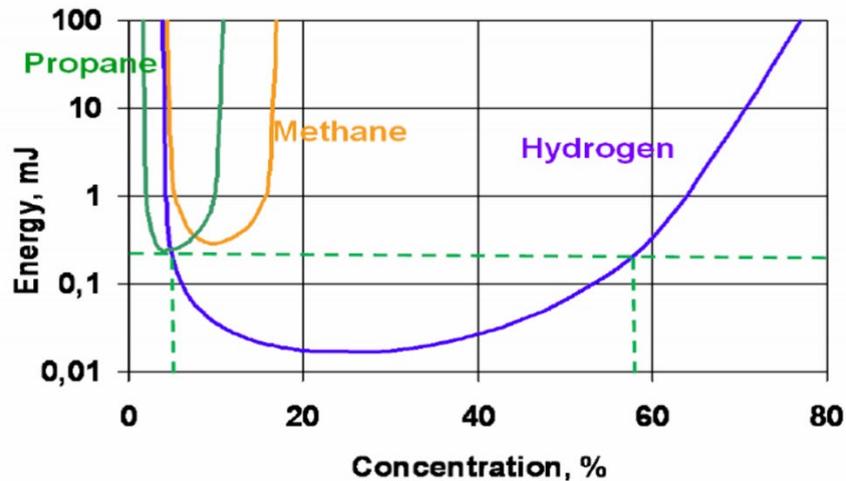


Abbildung 5 Ein Diagramm, das die große Bandbreite an brennbaren Konzentrationen und die geringe Zündenergie verdeutlicht, die für Wasserstoff im Vergleich zu Propan und Methan erforderlich ist - Bild mit freundlicher Genehmigung von Hy Response.

Die Risiken und Vorteile von Elektrolysesystemen

Elektrolyseure sind heikel, weil sich Wasserstoff in unmittelbarer Nähe zu hohen elektrischen Strombelastungen befindet. Normalerweise müssen elektrische Komponenten für den sicheren Einsatz in der Nähe von Wasserstoff "elektrisch klassifiziert" werden, wenn ein Leck möglich ist. Es ist jedoch nicht möglich, einen Elektrolyseur elektrisch zu klassifizieren. Der Schornstein ist immer eine potenzielle Zündquelle, wenn sich während des Betriebs ein brennbares Gasgemisch bildet. Glücklicherweise haben Elektrolysesysteme auch ihre Vorteile. Mehrere inhärente Konstruktionsfaktoren tragen dazu bei, das Risiko einer Verbrennung zu verringern.

Bei vielen Elektrolyseanwendungen wird das H₂ sofort eingesetzt. Das bedeutet, dass nur eine begrenzte Menge an Brennstoff zur Verfügung steht, abgesehen von der geringen Menge in den Prozessleitungen. Sobald die Stromzufuhr unterbrochen wird, kommt die Wasserstoff- und Sauerstoffproduktion schnell zum Erliegen. Da nur eine begrenzte Menge an gespeichertem H₂ vorhanden ist und die Produktion schnell gestoppt werden kann, ist das Risiko der Bildung eines brennbaren Gemischs geringer.

Außerdem geben viele Elektrolysesysteme ihren Sauerstoff bei Umgebungsdruck an die Luft ab. Umgebungsluft ist ein viel weniger gefährliches Oxidationsmittel als reiner, unter Druck stehender Sauerstoff.

Schließlich werden in den meisten Fällen kleine Wasserstofflecks durch mechanische Belüftung um den Elektrolyseurkamin und die übrigen Anlagenfunktionen beseitigt, bevor sie brennbare Gemischkonzentrationen erreichen. Diese Maßnahmen können eine Verbrennung verhindern, indem sie die Bildung eines brennbaren Gemischs erst gar nicht zulassen.

Systemintegrationen

Elektrolysegeräte bergen aufgrund der Systemintegration inhärente Risiken. Ein Elektrolysegerät mag vom Hersteller sicher konstruiert sein, aber was passiert, wenn es in verschiedenen Anwendungen installiert oder von speziellen elektrischen Geräten betrieben wird? Funktionieren die Entlüftungsöffnungen und Ausfallsicherungsmaßnahmen noch richtig?

Ein Faktor, der zu dem (oben erwähnten) Zwischenfall mit dem koreanischen Elektrolyseur beitrug, war wahrscheinlich die Verwendung des Geräts außerhalb der vom Hersteller angegebenen Grenzen. Da das alkalische Wassersystem nicht mit der richtigen Leistung betrieben wurde, konnte durch den Abbau der Zellmembran Sauerstoff auf die Wasserstoffseite des Elektrolyseurs gelangen. Selbst dieser relativ einfache Betriebsfehler hatte erhebliche Konsequenzen.

Sicherheitsstrategien für Elektrolyseursysteme

Wie können Konstrukteure und Benutzer von Elektrolyseanlagen die energetischen Folgen einer Verbrennung vermeiden? Ein gängiger Ansatz für die Sicherheit der Elektrolyse beginnt mit dem Feuerdreieck, einer einfachen Darstellung der drei für die Verbrennung notwendigen Faktoren:

- **Kraftstoff**
- **Zündquelle**, und
- **Oxidationsmittel**.



Wird nur eine Seite des Dreiecks eliminiert, kann die Verbrennung nicht stattfinden. Der Brennstoff ist Wasserstoff, und das Oxidationsmittel ist Sauerstoff - entweder in der Umgebungsluft (21 % O₂) oder reiner Sauerstoff. Das Ziel ist es, Zündquellen zu vermeiden, aber da die erforderliche Zündenergie so gering ist, können sie nicht vernünftig ausgeschlossen werden. Selbst ein kleiner statischer Funke reicht für eine Verbrennung aus.

Der erste Schutz besteht darin, den Wasserstoff vom Oxidationsmittel fernzuhalten, um eine ungewollte Vermischung zu vermeiden.

Daher werden zunächst mögliche Fehler im Elektrolysesystem betrachtet, die zu einer unbeabsichtigten Vermischung führen können. Anschließend werden Abhilfestrategien untersucht, darunter:

- **Verhinderung von Lecks:** Verhindern Sie externe Lecks, die durch die Vermischung von Wasserstoff mit der Umgebungsluft entstehen, und verhindern Sie interne Lecks von einem Teil des Systems zum anderen.
- **Belüftung:** Installieren Sie mechanische Ventilatoren, um das Gehäuse des Elektrolyseurs zu spülen und die Wasserstoffansammlung zu reduzieren.
- **Entlüftung und Entsorgung:** Bewerten Sie die Konzentrationen für alle Betriebsarten und erstellen Sie Verfahren für die Entlüftung von O₂ und H₂ beim Anfahren, Betrieb und Abschalten des Systems.
- **Spülung:** H₂-Systeme vor und nach der Verwendung mit Stickstoff oder anderen Inertgasen spülen (optional).
- **Aufspüren:** Verwenden Sie persönliche Monitore, Leckschnüffler, Bildkameras und stationäre H₂ Integrieren Sie die Erkennung in Verfahren und automatische Sicherheitskontrollen.
- **Sicherheitsplanung:** Regelmäßige Schulungen für alle Mitarbeiter, die in der Nähe von Wasserstoff- oder Elektrolysesystemen arbeiten. Entwickeln Sie klare Pläne für Wartung, Betrieb und Notfälle.

Wasserstoffgas-Detektionstechnologie

Wasserstoff ist ein geruchloses, farbloses und geschmackloses Gas. Die Industrie ist daher auf Wasserstoffgasdetektoren angewiesen, um Lecks aufzuspüren. Das IGD verfügt über zwei Technologien, die sich für den Nachweis von Wasserstoff eignen: Pellistor-Sensoren und elektrochemische Sensoren.

Pellistor

Pellistor- oder katalytische Perlensensoren beruhen auf der Verwendung eines Katalysators, der bewirkt, dass sich brennbares Gas im Sensor bei einer viel niedrigeren Temperatur als üblich entzündet. Bei der Verbrennung wird Wärme im Verhältnis zur Menge des vorhandenen brennbaren Gases erzeugt. Die Konzentration der brennbaren Gase kann dann aus dieser Messung abgeleitet und als Prozentsatz der unteren Explosionsgrenze ausgedrückt werden





Abgebildet: TOC-750 adressierbares Gaswarngerät für den sicheren Bereich

Pellistor-Sensoren werden in der Regel als allgemeine "catch-all"-Technologie für die Erkennung brennbarer Gase verwendet. Pellistoren reagieren auf jedes entflammbare Gas und messen 0-100% UEG (*untere Explosionsgrenze - das ist die definierte Mindestkonzentration von Gasen und Dämpfen in der Luft, die bei Vorhandensein einer Energiequelle eine Zündung ermöglicht*). Da eine Wasserstoffkonzentration von 4 % explosiv ist, entspricht dies einer UEG von 100 %.

Elektrochemisch

Elektrochemische Sensoren funktionieren, indem sie das Zielgas - in diesem Fall Wasserstoff - mit einem Elektrolyten reagieren lassen, der einen Strom erzeugt, der proportional zur Menge des vorhandenen Gases ist. Dies ermöglicht eine wesentlich empfindlichere Erkennung von Wasserstoffgas im Vergleich zu Pellistor-Sensoren. Zum Beispiel entsprechen 25 % UEG einer Wasserstoffkonzentration von 1 % oder 10.000 ppm. Elektrochemische IGD-Gasdetektoren bieten eine Empfindlichkeit im Bereich von 0-1000 ppm bis 0-40.000 ppm. Der Nachteil dieser extremen Empfindlichkeit ist jedoch, dass elektrochemische Sensoren zerstört werden können, wenn sie Werten ausgesetzt werden, die ihren Messbereich überschreiten, so dass sie ersetzt werden müssen. Die elektrochemischen Wasserstoffdetektoren von IGD eignen sich ideal für Anwendungen, bei denen die Erkennung von Wasserstoff in niedrigen Konzentrationen entscheidend ist.

Andere Detektionstechnologien

Es gibt verschiedene andere Gasdetektionstechnologien, die jedoch für die Erkennung von Wasserstoff nicht empfohlen werden.

- Infrarotsensoren können Wasserstoff nicht erkennen, da zweiatomige Moleküle wie Wasserstoff keine Infrarotstrahlung absorbieren.
- Halbleitergasdetektoren können zur Erkennung von Wasserstoff verwendet werden; diese Sensoren reagieren jedoch in der Regel auch auf eine breite Palette anderer Gase und Dämpfe. Die Wahrscheinlichkeit von Fehlalarmen bedeutet, dass Halbleitersensoren für diese Anwendungen nicht empfohlen werden.
- **Die Wärmeleitfähigkeit** ist eine weitere brauchbare Technologie, die jedoch aufgrund ihrer geringen Empfindlichkeit und Selektivität für Wasserstoffnachweisanwendungen ungeeignet ist.

Tragbare Wasserstoffgasdetektoren

Schließlich gibt es tragbare Wasserstoffmonitore für zusätzliche persönliche Sicherheit und Lecksuche. Diese können entweder als einzelne Gasmonitore mit einem Messbereich von 0-1000 ppm eingesetzt werden, um Lecks in Anlagen zu erkennen. Alternativ gibt es eine Vielzahl von Gasmonitoren für Arbeiten in engen Räumen.

ZIEL 3 Durchführung einer Risikobewertung in einer bestimmten Wasserstoffumgebung.

Was ist eine Risikobewertung?

Eine Gefährdungsbeurteilung ist einfach eine sorgfältige Untersuchung dessen, was in Ihrem Arbeitsbereich Menschen Schaden zufügen könnte, damit Sie abwägen können, ob Sie genügend Vorsichtsmaßnahmen getroffen haben oder mehr tun müssen, um Schaden zu verhindern. Ziel ist es, dafür zu sorgen, dass niemand verletzt oder krank wird, denn Unfälle und Krankheiten können Leben ruinieren und Ihr Unternehmen beeinträchtigen, wenn Produktionsausfälle entstehen, Maschinen beschädigt werden, die Versicherungskosten steigen oder Sie vor Gericht ziehen müssen.

Sie sind gesetzlich verpflichtet, die an Ihrem Arbeitsplatz vorhandenen Risiken zu bewerten. Einige Bewertungen des Verhältnisses zwischen Gefahr und Risiko sind sehr präzise und basieren auf numerischen Zuweisungen von Werten, die aus detaillierten Überlegungen der Technik und anderer Disziplinen berechnet werden.



Wichtig ist, dass Sie entscheiden, ob eine Gefahr signifikant ist und ob Sie ausreichende Vorkehrungen getroffen haben, um das Risiko zu minimieren. Dies muss bei der Risikobewertung überprüft werden. Elektrizität kann zum Beispiel tödlich sein, aber das Risiko, dass dies in einem Büro geschieht, ist unwahrscheinlich, vorausgesetzt, dass "stromführende" Komponenten isoliert und Metallgehäuse ordnungsgemäß geerdet sind.

5-stufiger Ansatz zur Gefahrenerkennung und Risikobewertung

Schritt 1: Suche nach Gefahren

Gehen Sie an Ihrem Arbeitsplatz umher und suchen Sie nach Dingen, von denen vernünftigerweise erwartet werden kann, dass sie Schaden anrichten, und konzentrieren Sie sich nicht auf die trivialen Dinge, sondern auf die wesentlichen Gefahren. Fragen Sie auch Ihre Mitarbeiter, was sie denken und ob ihnen etwas aufgefallen ist, das Ihnen nicht sofort ins Auge fällt.

Schritt 2: Entscheiden Sie, wer geschädigt werden könnte und wie

Dazu können junge Arbeitnehmer, Auszubildende, nicht sprachbegabte Personen, Reinigungskräfte, Besucher, Auftragnehmer, Wartungspersonal, Mitglieder der Öffentlichkeit oder Personen, mit denen Sie Ihren Arbeitsplatz teilen, gehören.

Schritt 3: Bewerten Sie die Risiken und entscheiden Sie, ob die derzeitigen Vorsichtsmaßnahmen angemessen sind oder verbessert werden müssen.

Bei der Prüfung, ob die derzeitigen Vorsichtsmaßnahmen angemessen sind, ist auch zu berücksichtigen, ob das verbleibende Risiko tolerierbar oder untragbar ist. Wenn es untragbar ist, müssen Sie die Vorsichtsmaßnahmen neu bewerten und verbessern, bis das Restrisiko minimiert ist. Das eigentliche Ziel besteht darin, das Risiko zu minimieren, und um dies zu erreichen, müssen Sie möglicherweise weitere Vorsichtsmaßnahmen ergreifen.

Schritt 4: Halten Sie Ihre Ergebnisse fest

Wenn Sie mehr als fünf Beschäftigte haben, müssen Sie die "wesentlichen Ergebnisse" Ihrer Beurteilung festhalten, d. h. die wesentlichen Gefahren und Schlussfolgerungen aufschreiben.

Ein Beispiel hierfür könnte sein: "Elektrische Anlagen: Isolierung und Erdung werden regelmäßig überprüft und funktionieren wie vorgesehen. Auch die Beschäftigten müssen über diese Feststellungen informiert werden.



Schritt 5: Überprüfen Sie Ihre Bewertung und überarbeiten Sie sie bei Bedarf

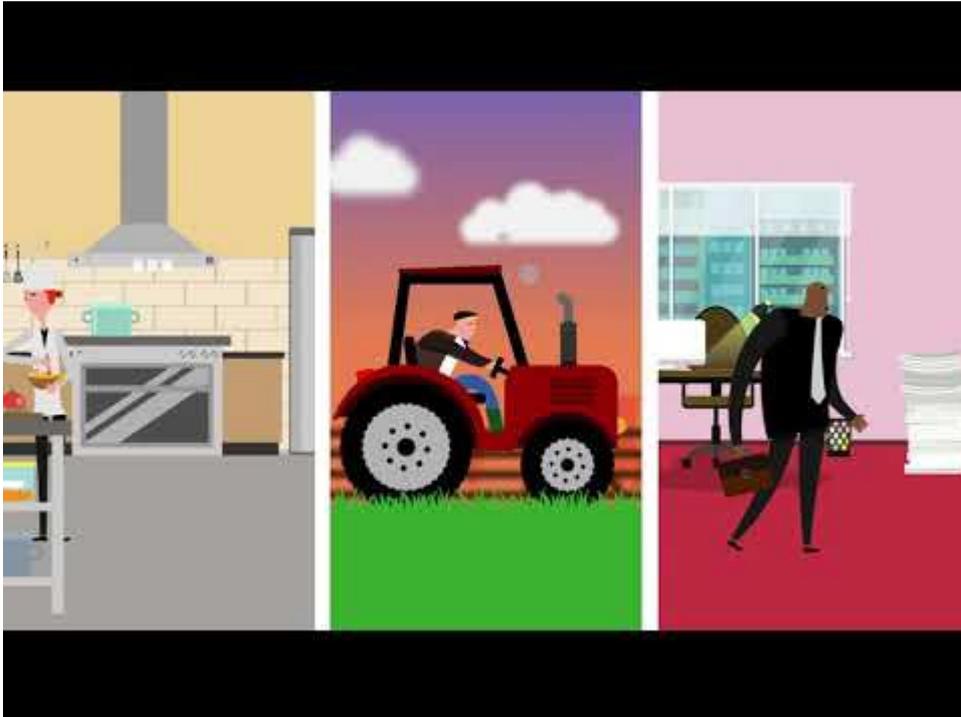
Ihr Unternehmen wird sich unweigerlich weiterentwickeln, und mit der Einführung neuer Geräte und Verfahren werden auch neue Risiken hinzukommen. Aktualisieren Sie die Gefährdungsbeurteilung, wenn eine wesentliche Änderung vorgenommen wurde. Tun Sie dies nicht bei jeder unbedeutenden Änderung.

Wenn das Wissen und das Verständnis der Risiken und der Risikokomponenten, die mit dem Einsatz einer bestimmten Technologie verbunden sind, gering sind, ist die sichere Gestaltung, Nutzung und der Betrieb von Anlagen mit vielen Unsicherheiten verbunden. Dies führt zu einer risikoreicheren Situation. Wenn die Beteiligten jedoch ein größeres Wissen und Verständnis für die Problematik erlangen, wird ein viel höheres Maß an Gewissheit für die sichere Auslegung, Nutzung und den Betrieb erreicht. Dies führt letztlich zu einer Verringerung des Risikos.

Bei entzündlichen Kältemitteln muss eine solche Bewertung Folgendes umfassen:

- Gefährliche Eigenschaften des Stoffes.
- Risiko der Exposition von Personen.
- die Fähigkeit einer explosionsfähigen Atmosphäre, zu entstehen und zu bestehen.
- Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins und der Auslösung von Zündquellen.
- Erforderliche Maßnahmen im Falle eines Brandes oder einer Explosion und das Ausmaß der zu erwartenden Auswirkungen.
- Es gibt verschiedene Methoden zur Risikobewertung sowie Normen, die direkt oder allgemein auf die zu prüfende Situation oder Ausrüstung anwendbar sein können.

Vorübergehend entflammbarer Bereich und sicherer Arbeitsbereich Bei Arbeiten an Anlagen mit entflammbaren Kältemitteln sollten bestimmte Stellen als "vorübergehend entflammbarer Bereich" gekennzeichnet werden. Diese temporäre Zone sollte sich in einem Radius von etwa einem halben Meter um die Anlage bis zu einer Entfernung erstrecken, die im Verhältnis zur maximalen Kältemittelmenge, die während des Arbeitsvorgangs freigesetzt werden könnte, angemessen ist. Der "sichere Arbeitsbereich" beginnt drei Meter von der Anlage entfernt. In einem Radius von zwei Metern sollten keine Zündquellen vorhanden sein; ein Gasetektor sollte verwendet werden, um die HC-Konzentration in der Luft vor und nach der Durchführung der Arbeiten zu ermitteln. Werkzeuge, die in vorübergehend entflammbaren Zonen verwendet werden, müssen für die Arbeit in explosionsgefährdeten Bereichen geeignet sein



https://www.youtube.com/watch?v=xyANahuhGs0&ab_channel=HealthandSafetyExecutive

HINWEISE ZU LERN- UND LEHRANSÄTZEN FÜR DIESES MODUL

Dieses Modul soll mit einer Vielzahl von Lern- und Lehransätzen vermittelt werden, wie z. B. strukturierten Unterrichtsstunden mit formativen und summativen Beurteilungen, zusätzlich zur praktischen Demonstration des sicheren Umgangs mit Wasserstoff, wo dies möglich ist. Unterstützendes Material, insbesondere die interaktiven Aktivitäten, sollten bei der Vermittlung aller HySkills-Module in vollem Umfang genutzt werden.