

Informationssammlung

Einsatzszenarien von Wasserstoff in sauerstoffarmen Atmosphären

Autorin: Dr. Julia Rothe



ISV INSTITUT FÜR
SICHERHEITSTECHNIK
SCHIFFSSICHERHEIT e.V.

Institut für Sicherheitstechnik / Schiffssicherheit e.V.

Friedrich-Barnewitz-Str. 4c

18119 Rostock-Warnemünde

+49 (0)381 77876 140

institut@schiffssicherheit.de

www.schiffssicherheit.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Prozessüberwachung vs. Sicherheitsüberwachung.....	4
3	Industriell etablierte Anwendungen	5
3.1	Formiergas (S/P)	5
3.2	Metallurgie (S)	6
3.2.1	Wärmebehandlung von Metallen	6
3.2.2	Metallpulverbehandlung.....	9
3.3	Chemical Vapor Deposition (S).....	10
3.4	Leckageortung (S).....	11
4	Chemische Industrie (P)	12
4.1	Herstellung von fossilem Wasserstoff.....	12
4.2	Herstellung von Methanol	13
4.3	Herstellung von Ammoniak.....	14
4.4	Hydrodesulfurierung und Hydrodenitrogenierung (P)	15
5	Wartungs-, Anfahr- und Abschaltungsprozesse (S)	16
6	Energieanwendungen (P).....	18
6.1	Cracken von Ammoniak	18
6.2	Brennstoffzellen (P/S)	19
6.3	Power-to-X-Verfahren (P)	20
6.4	Wasserstoff als maritimer Kraftstoff (S)	21
7	Wasserstoffspeicherung und -transport.....	22
7.1	Wasserstoffverflüssigung (S)	22
7.2	Kavernenspeicher (S).....	22
7.3	Wasserstoffbeimischung zum Erdgasnetz (P/S).....	23
8	Gasentstehung bei radioaktiven Abfällen (S)	25
9	Literatur	26

1 Einleitung

Wasserstoff tritt in zahlreichen industriellen Anwendungen nicht als Reinstoff, sondern als Bestandteil von Gasgemischen auf, häufig in sauerstoffarmen oder vollständig sauerstofffreien Atmosphären. Solche Umgebungen entstehen gezielt durch Inertisierung, als Folge geschlossener Prozessführungen oder als integraler Bestandteil chemischer und thermischer Verfahren. Solche Anwendungen sind keineswegs Randfälle, sondern charakteristisch für zahlreiche etablierte und zunehmend auch zukünftige industrielle Prozesse.

Warum Wasserstoff in sauerstoffarmen Atmosphären relevant bleibt

Ein verbreitetes Missverständnis besteht darin, Wasserstoffanwendungen ausschließlich unter dem Gesichtspunkt des Explosionsschutzes zu betrachten. Tatsächlich reduziert die Abwesenheit von Sauerstoff zwar das unmittelbare Zünd- und Explosionsrisiko, sie eliminiert jedoch weder die physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff noch dessen prozessuale Bedeutung.

Wasserstoff ist auch ohne Sauerstoff:

- ein Gas mit hohem Diffusionsvermögen und niedrigem Siedepunkt,
- in vielen Prozessen ein aktiver Reaktionspartner oder Produkt,
- ein Indikator für Leckagen, Fehlfunktionen oder unerwünschte Nebenreaktionen,
- potenziell gefährlich bei lokaler Sauerstoffzutrittsmöglichkeit oder beim Übergang in andere Atmosphärenbereiche.

Damit ergibt sich die Notwendigkeit, Wasserstoffkonzentrationen auch in O₂-armen Umgebungen zu kennen – entweder zur gezielten Prozessführung oder zur frühzeitigen Erkennung sicherheitsrelevanter Zustände.

Die große Vielfalt der im Folgenden beschriebenen Anwendungsfelder verdeutlicht, dass Wasserstoff in sauerstoffarmen Atmosphären kein Sonderfall, sondern ein industrieller Normalzustand ist. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, warum das Verhalten von Wasserstoffsensoren unter O₂-armen Bedingungen von zentralem Interesse ist. Ein fundiertes Verständnis dieser Sensorreaktionen ist Voraussetzung, um Messergebnisse korrekt zu interpretieren, Einsatzgrenzen zu bewerten und die Eignung von Sensoren für unterschiedliche Anwendungen beurteilen zu können. Die vorliegende Arbeit sowie die begleitenden experimentellen Untersuchungen im Forschungsprojekt HyMeAS tragen dazu bei, diese Wissenslücke systematisch zu adressieren.

2 Prozessüberwachung vs. Sicherheitsüberwachung

Wasserstoff tritt in sauerstoffarmen und sauerstofffreien Atmosphären in unterschiedlichen technischen Zusammenhängen auf, in denen seine Erfassung aus verschiedenen Gründen erforderlich ist. Grundsätzlich lassen sich diese Anwendungen zwei übergeordneten Zielsetzungen zuordnen: der Prozessüberwachung und der Sicherheitsüberwachung.

Aus Sicht der Sensorik ist entscheidend, wozu ein Wasserstoffsensor eingesetzt wird. Die gleiche physikalische Größe – die H₂-Konzentration – kann je nach Anwendung völlig unterschiedliche Messaufgaben erfüllen.

Aspekt	Prozessüberwachung	Sicherheitsüberwachung
Ziel	Steuerung und Optimierung des Prozesses	Schutz von Mensch, Anlage und Umwelt
Messcharakter	kontinuierlich, quantitativ	ereignis- bzw. schwellenbasiert
Genauigkeit	hoch bis sehr hoch erforderlich	begrenzt ausreichend
Reaktionszeit	prozessabhängig, oft moderat	möglichst schnell
Messbereich	oft im Volumen-%-Bereich	meist untere % oder ppm-Bereiche
Interpretation	Bestandteil der Regelung	Alarm/Abschaltung

Neben Anwendungen, die eindeutig der Prozessüberwachung oder der Sicherheitsüberwachung zuzuordnen sind, existieren zahlreiche Einsatzfälle, in denen beide Zielsetzungen gleichzeitig relevant sind. In solchen Anwendungen ist Wasserstoff sowohl eine prozessbestimmende Größe als auch ein sicherheitsrelevanter Stoff, sodass Anforderungen an Prozessführung und Arbeitssicherheit ineinandergreifen.

Vor diesem Hintergrund betrachtet das vorliegende Dokument sowohl etablierte Anwendungen gemäß dem Stand der Technik als auch mögliche zukünftige Einsatzszenarien. Die jeweiligen Anwendungsfelder werden dabei entsprechend ihrer primären Zielsetzung mit (P) für Prozessüberwachung, (S) für Sicherheitsüberwachung oder (S/P) für kombinierte Anforderungen gekennzeichnet.

3 Industriell etablierte Anwendungen

3.1 Formiergas (S/P)

Ein wichtiger Hinweis auf die technische Bedeutung von Wasserstoff-Inertgas-Mischungen ist das umfangreiche Angebot an Formiergasen.

Formiergas ist ein technisches Gasgemisch aus Wasserstoff und Inertgas, in der Regel Stickstoff, seltener auch Argon und andere Inertgase. Es wird vor Allem als reduzierendes Schutzgas in der Metallverarbeitung und Wärmebehandlung eingesetzt. Der Wasserstoffanteil liegt dabei in der Regel zwischen 5 und 20 %. Durch die Kombination der reduzierenden und inertisierenden Eigenschaften bietet Formiergas eine kontrollierte, sichere und kosteneffiziente Prozessatmosphäre, die in vielen Anwendungen eine praxisnahe Alternative zu reinem Wasserstoff darstellt.¹

Formiergas wird in einer Vielzahl industrieller Prozesse eingesetzt:

- Rohrleitungs- und Apparatebau: Schutz der Nahtunterseiten beim Formieren und Dichtheitsprüfungen mit Lecksuchgeräten (z. B. 95/5 N₂/H₂)
- Wärmebehandlungs- und Lötprozesse:² Reduzierende Atmosphäre verhindert Oxidation
- Schweißen von nichtrostenden Stählen: Wurzelschutz zur Verhinderung von Anlauffarben³

Die Vielfalt der verfügbaren Mischungen ist groß und reicht von Linde-Formiergasen (z. B. 95/5, 90/10, 85/15, 80/20) über die ARCAL™-Produktlinie von Air Liquide, die für verschiedene Schweißverfahren (WIG, MIG, MAG) und Werkstoffe entwickelt wurde, bis hin zu NOXAL- und NOXALIC-Produkten, die teilweise auch Helium oder CO₂ enthalten. Beispiele sind:

- ARCAL F10: 10 % H₂/90 % N₂⁴
- NOXAL 4: 10 % H₂/90 % Argon
- NOXALIC 51: 2 % H₂, 30 % He, 0,12 % CO₂, Rest Argon

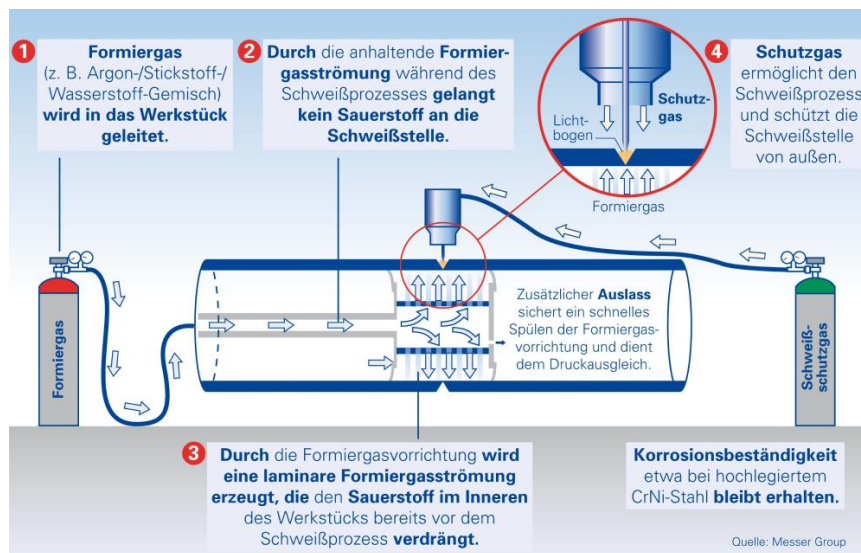


Abbildung 1. Beispielanwendung für Formiergas: Formieren von Rohren.⁵

3.2 Metallurgie (P)

3.2.1 Wärmebehandlung von Metallen

Wasserstoffglühen

Wasserstoffglühen ist ein spezielles Wärmebehandlungsverfahren, bei dem Werkstoffe in einer kontrollierten Wasserstoffatmosphäre erwärmt werden, um Oberflächen zu reinigen, innere Spannungen abzubauen und Oxidation zu verhindern. Geeignet ist es vor allem für Materialien wie Stahl, Hartlegierungen, keramische Werkstoffe und (hochschmelzende) Refraktärmetalle. Wasserstoff ist – besonders bei hohen Temperaturen – in der Lage, Oxide und andere reduzierbare Verunreinigungen von der Metalloberfläche zu entfernen. Dadurch verbessern sich die mechanischen Eigenschaften der Bauteile sowie deren Oberflächenqualität und Haltbarkeit.⁶

Typischerweise erfolgt die Behandlung bei Temperaturen zwischen **200 und 300 °C** über mehrere Stunden. In Anwesenheit von Sauerstoff besteht Explosionsgefahr,⁷ so dass der Prozess entweder unter 100%-iger Wasserstoffatmosphäre stattfindet oder – aus Kostengründen – unter Wasserstoff-Stickstoff-Atmosphären (mit mehr als 5 % Wasserstoff).



Abbildung 2. Anlage zum Wasserstoffglühen.⁸

Sintern

Sintern ist ein industrielles Verfahren zur Herstellung dichter, hochfester Bauteile aus Pulverwerkstoffen, bei dem diese unterhalb ihres Schmelzpunktes – typischerweise bei 70 bis 90 % des Schmelzpunktes (ca. **1000 – 1400 °C bei Stählen**) – unter kontrollierten Atmosphären und meist bei Normaldruck oder leichtem Überdruck durch Diffusion zu einem festen Gefüge zusammenwachsen.⁹ Der Wasserstoff entfernt dabei Oberflächenoxide und Verunreinigungen wie Siliziumdioxid und schafft so eine

kontrollierte Atmosphäre, die Oxidation minimiert und die Materialqualität verbessert. Das Ergebnis sind Bauteile mit hoher Dichte, Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit, vergleichbar mit geschmiedeten Werkstoffen. Je nach Prozess kann Wasserstoff rein, als Wasserstoff-Stickstoff-Gemisch oder in gebundener Form als Ammoniakgas eingesetzt werden. Die Beimischung von Inertgasen – in der Regel Stickstoff – dient vor allem der Kostensenkung und der Anpassung an spezifische Prozessanforderungen.



Abbildung 3. Anlage für das Sintern mit Wasserstoff.¹⁰

Härten

Härten ist ein thermisches Verfahren, bei dem metallische Werkstoffe auf hohe Temperaturen (typisch **800–950 °C**) erhitzt und anschließend schnell abgeschreckt werden, um ein hartes, martensitisches Gefüge zu erzeugen und die Festigkeit sowie Verschleißbeständigkeit zu erhöhen.¹¹ Wasserstoff wird dabei als Schutz- und Reaktionsgas eingesetzt: Er verhindert Oxidation, sorgt für saubere Oberflächen und unterstützt beim Einsatzhärten oder Carbonitrieren die Einbringung von Kohlenstoff und Stickstoff in die Randschicht. Die Prozessatmosphäre muss sauerstofffrei und reduzierend sein, so dass reiner Wasserstoff verwendet werden kann, in der Praxis aber aus Kostengründen vor allem Wasserstoff-Stickstoff-Gemische zum Einsatz kommen.

Merkmal	Glühen	Sintern	Härten
Ziel	Spannungsabbau, Zähigkeit erhöhen, Gefüge homogenisieren, Oberflächen reinigen	Verdichtung und Zusammenwachsen von Pulverwerkstoffen zu festen Bauteilen	Erhöhung von Härte, Festigkeit und Verschleißbeständigkeit
Temperaturbereich	200–750 °C, je nach Verfahren	Unterhalb des Schmelzpunktes des Werkstoffs ($0,7-0,9 \cdot T_m$)	typischerweise 800–950 °C
Abkühlung	Langsam im Ofen	Langsam, kontrolliert	Schnell (Abschrecken in Wasser, Öl, Gas)
Gefügeänderung	Rekristallisation, Spannungsabbau, Kornwachstum	Diffusionsverfestigung, Poren schließen sich, Kristalle verbinden sich	Martensitbildung, sehr hart und spröde
Wasserstoff-Einsatz	Reduktionsgas zur Entfernung von Oxiden, saubere Oberflächen	Reduktionsgas zur Entfernung von Oxiden, verbessert Dichte und Oberflächenqualität	Schutz- und Reaktionsgas, verhindert Oxidation, unterstützt Kohlenstoff-/ Stickstoffaufnahme

Löten

Löten ist ein Fügeverfahren, bei dem zwei Metallteile mit Hilfe eines niedrig schmelzenden Lotes verbunden werden, ohne die Grundwerkstoffe selbst zu schmelzen. Je nach Temperatur unterscheidet man Weichlöten (unter ca. 450 °C) und Hartlöten (oberhalb ca. 450 °C). In beiden Verfahren kann Wasserstoff in sauerstofffreien Schutzgasatmosphären eingesetzt werden, um die Bildung von Oxidschichten an den Metalloberflächen zu verhindern.^{12,13} Oxide erschweren die Benetzung durch das Lot und können zu fehlerhaften Verbindungen führen. In einer wasserstoffhaltigen Atmosphäre reagiert der Wasserstoff mit vorhandenen Oxiden und reduziert sie, sodass saubere, gut benetzbare Metallflächen entstehen.

Hauptanwendungsgebiete sind das Löten von Leistungshalbleiterchips (Löten ohne gasförmige Einschlüsse), das hermetische Verschließen mittels Löten und das flussmittelfreie Kontaktieren.

3.2.2 Metallpulverbehandlung¹⁴

Metallische Pulver sind zentrale Ausgangsmaterialien für zahlreiche industrielle Fertigungsverfahren wie das Fügen, die additive Fertigung oder Beschichtungsprozesse. Sie kommen unter anderem in der Pulvermetallurgie, im 3D-Druck, bei der Herstellung von Batterien und zur elektromagnetischen Abschirmung zum Einsatz. Besonders hochreine Pulver, wie etwa Kupfer, sind aufgrund ihrer hervorragenden elektrischen und thermischen Eigenschaften für Anwendungen in der Elektronik, im Wärmemanagement sowie in der Luft- und Raumfahrt von großer Bedeutung.

Ein zentrales Problem bei der Herstellung, Lagerung und Verarbeitung solcher Pulver ist die Bildung von Oxidschichten auf der Partikeloberfläche, die selbst in Inertgasatmosphären durch Sauerstoffspuren entstehen können. Diese Oxidschichten beeinträchtigen mechanische Eigenschaften wie Kohäsion und Adhäsion sowie die Qualität der Endprodukte und müssen daher vor der Weiterverarbeitung entfernt werden.

Zur Desoxidation haben sich Gasphasenverfahren aufgrund ihrer hohen Produktivität und einfachen Integration in bestehende Prozesse besonders bewährt. Üblicherweise erfolgt die Aktivierung reduzierender Gase wie Wasserstoff oder Kohlenmonoxid durch Erhitzen.

Die Temperatur hängt dabei stark vom Metall und der Prozessart ab:

Metall/Prozess	Typischer Temperaturbereich	Bemerkung
Eisen (Fe)	600–900 °C	Reduktion von FeO, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ ; höhere Temperaturen fördern Reaktionskinetik.
Molybdän (Mo)	700–1100 °C	MoO ₃ → Mo; höhere Temperaturen nötig wegen thermischer Stabilität der Oxide
Wolfram (W)	800–1200 °C	Reduktion von WO ₃ erfolgt meist zweistufig (WO ₃ → WO ₂ → W).
Kupfer (Cu)	300–600 °C	Reduktion von CuO/Cu ₂ O gut bei niedrigeren Temperaturen möglich.
Gasphasenbehandlung mit kaltem Plasma (DBD)	30–200 °C	Aktivierter Wasserstoff erlaubt Reduktion bei stark reduzierten Temperaturen

Die Zusammensetzung des verwendeten Gasgemisches hängt vom Prozessziel und der Reaktivität des Werkstoffs ab, liegt aber meist in folgenden Bereichen:

- **5–10 % H₂/Rest N₂ oder Ar** – häufigste Mischung
- **10–20 % H₂/Rest N₂ oder Ar**– bei höherem Reduktionsbedarf oder schwer reduzierbaren Oxiden.
- **> 20 % H₂/Rest Ar/N₂**– in Spezialfällen oder bei sehr hohen Anforderungen an die Oxidfreiheit (z. B. bei hochreinem Wolfram oder Molybdän)

Stickstoff wird in der Regel aufgrund der deutlich geringeren Kosten bevorzugt. Wenn Materialien mit Stickstoff reagieren können und/oder wenn eine absolute Sauerstofffreiheit erforderlich ist, wird Argon eingesetzt.

3.3 Chemical Vapor Deposition (P)

In der Chemical Vapor Deposition (CVD) werden gasförmige Vorläuferstoffe genutzt, um auf einem Substrat dünne Schichten abzuscheiden. Erste Studien haben gezeigt, dass die Anwendung von Formiergasen zur Herstellung kontrollierter Prozessatmosphäre, zu deutlich höheren Abscheidungsrate führt, was höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, dass Wasserstoff die thermische Zersetzung dieser Verbindungen verstärkt.¹⁵

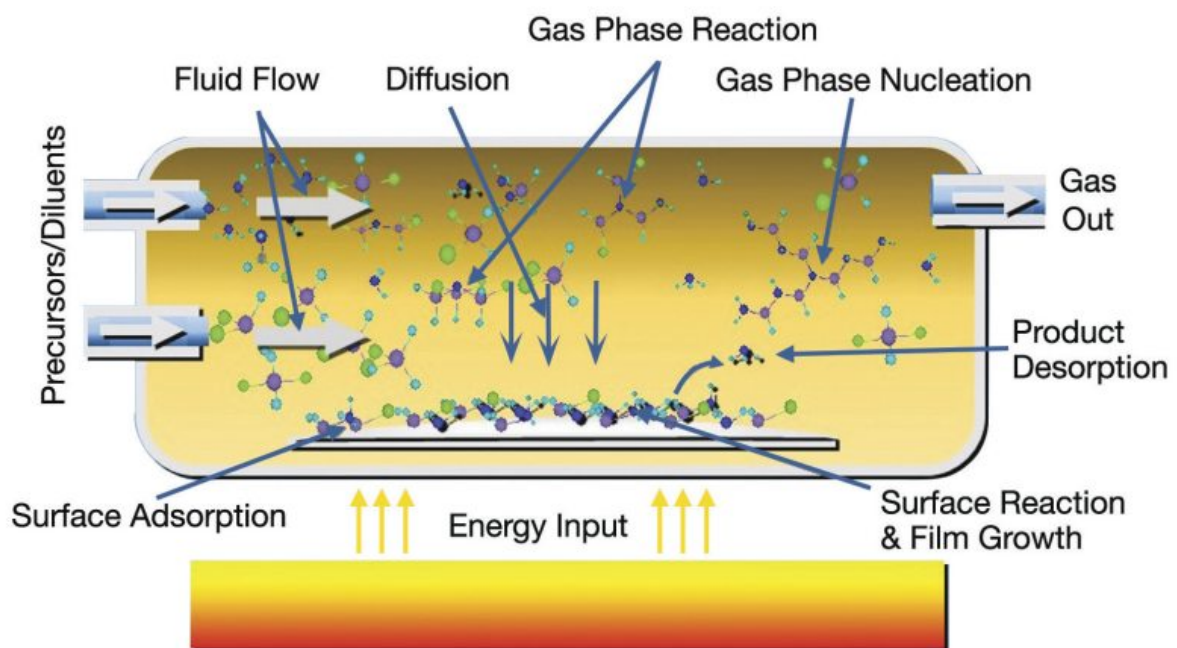


Abbildung 4. Mechanismus der Beschichtung mittels Gasphasenabscheidung.¹⁶

3.4 Leckageortung (S)

Formiergas hat sich als effektives Prüfmedium zur Leckageortung etabliert. Die Formiergasprüfung wird eingesetzt, wenn die Genauigkeit einer pneumatischen Prüfung nicht ausreicht und der hohe Aufwand einer Helium-Dichtheitsprüfung nicht notwendig ist. In der Praxis wird überwiegend ein technisches Gasgemisch aus 95 % Stickstoff und 5 % Wasserstoff eingesetzt, da es in dieser Zusammensetzung nicht brennbar und somit sicher im Umgang ist.¹⁷

Bei der Dichtheitsprüfung wird Formiergas in die zu untersuchende Anlage oder Leitung eingeleitet. Der enthaltene Wasserstoff dient dabei als Spurengas, das mit hochsensiblen Detektoren – in der Regel Halbleitersensoren – nachgewiesen werden kann.¹⁸ Aufgrund seiner sehr geringen Molekülgröße und Dichte verteilt sich der Wasserstoff schnell und gleichmäßig im System und bewegt sich selbst durch feinste Leckstellen. So kann er auch durch Erdröche an die Oberfläche gelangen, wo er zuverlässig detektiert wird.¹⁹

Dieses Verfahren ist schneller und präziser als herkömmliche Prüfmethode mit Druckluft und wesentlich günstiger als Lecktests mit Helium. Zudem sind die Sensoren zur Bestimmung der Wasserstoffkonzentration in Luft wenig anfällig für Störgase.

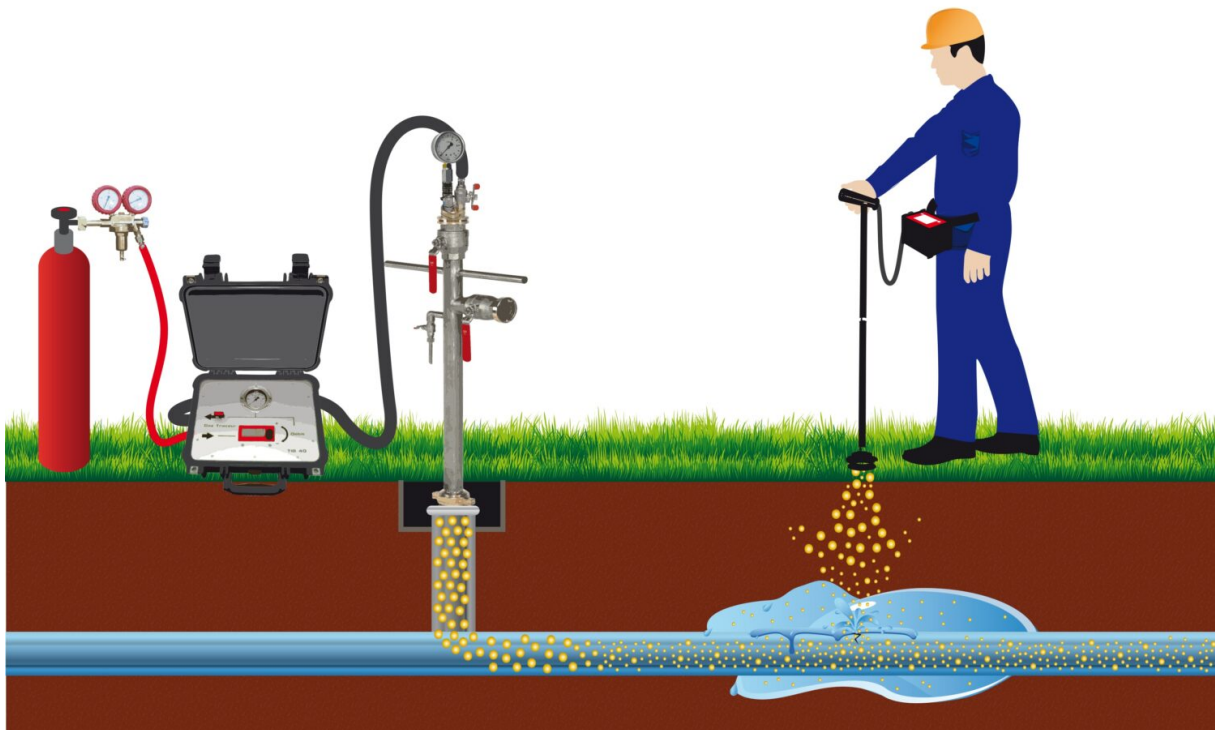


Abbildung 5. Leckageortung an Wasserleitungen mit Formiergas.²⁰

4 Chemische Industrie (P)

4.1 Herstellung von fossilem Wasserstoff

Die großtechnische Erzeugung von Wasserstoff basiert überwiegend auf thermochemischen Prozessen, bei denen kohlenwasserstoffhaltige Rohstoffe in sauerstofffreien Gasatmosphären in Wasserstoff umgewandelt werden.

Die **Dampfreformierung** ist aktuell das bedeutendste Verfahren zur industriellen Wasserstoffproduktion. Dabei werden Kohlenwasserstoffe (häufig Methan) mit Wasserdampf bei hohen Temperaturen (ca. 700–1000 °C) über Katalysatoren umgesetzt, um ein Synthesegas aus CO und H₂ zu erzeugen. Die Reaktion erfolgt in einer sauerstofffreien Reformierungskammer.²¹

Ein typischer Zwischenschritt in diesem Prozess ist die **Wassergas-Shift-Reaktion**. Hier reagieren Kohlenmonoxid und Wasserdampf zu Kohlendioxid und zusätzlichem Wasserstoff ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$). Die WGS findet in sauerstoffarmer Synthesegasatmosphäre statt und dient dazu, den Wasserstoffanteil im Gasgemisch weiter zu erhöhen. Der CO-Gehalt lässt sich so je nach Fahrweise des Reaktors auf 0,13 bis 1,5 Vol.-% absenken.²²

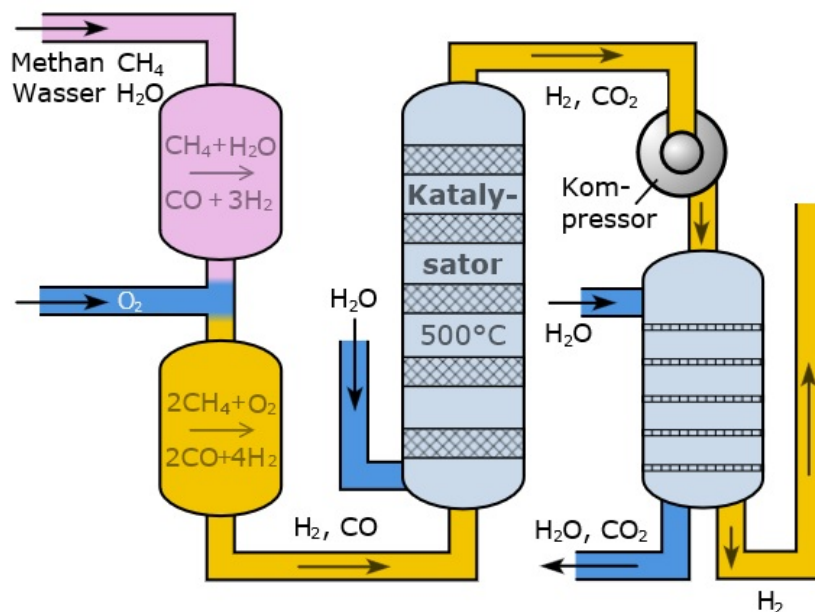


Abbildung 6. Schematischer Aufbau einer Dampfreformierungsanlage.²³

Nach der Reformierung und Shift-Reaktion wird das Gasgemisch meist einer **Druckwechseladsorption** unterzogen, um Wasserstoff von CO₂, CO und anderen Begleitgasen zu trennen. Diese Anlagen arbeiten mit wechselnden Druckphasen, wobei Adsorptionsmittel selektiv andere Gaskomponenten zurückhalten.

Zusammengefasst bilden diese Schritte ein integriertes Prozesssystem zur Erzeugung hochreinen Wasserstoffs unter kontrollierten, sauerstoffarmen Bedingungen. Diese sauerstoffarmen Gasgemische sind charakteristisch für jeden Produktionsschritt und stellen typische industrielle Einsatzumgebungen dar, in denen das Verhalten von

Sensorik unter solchen Atmosphären relevant ist. Allerdings wird Sensorik vor allem eingesetzt, um den Wasserstoff auf Begleitgase und Verunreinigungen, wie Restfeuchte, Sauerstoff oder CO/CO₂ zu untersuchen.²⁴

4.2 Herstellung von Methanol

Ein industriell bedeutendes Einsatzfeld wasserstoffhaltiger, sauerstofffreier Gasgemische findet sich in der großtechnischen Produktion von Methanol aus Synthesegas. Synthesegas, ein Gemisch aus CO und Wasserstoff sowie geringen Mengen CO₂, wird industriell durch Verfahren wie Dampfreformierung, partielle Oxidation oder Vergasung kohlenstoffhaltiger Rohstoffe hergestellt.²⁵

In heterogen-katalytischen Reaktionen wird das Synthesegas unter hohen Drücken und moderaten Temperaturen zu Methanol umgesetzt. Methanol dient als Grundchemikalie für vielfältige Produkte und kann auch als Energieträger oder Ausgangsstoff für synthetische Kraftstoffe genutzt werden.

Die Zusammensetzung des Gasgemischs (insbesondere das Verhältnis von H₂ zu CO/CO₂) ist entscheidend für die Effizienz und Produktausbeute der Synthese. Dementsprechend bedeutend ist die Steuerung und Überwachung solcher Gasgemische in Industrieprozessen.

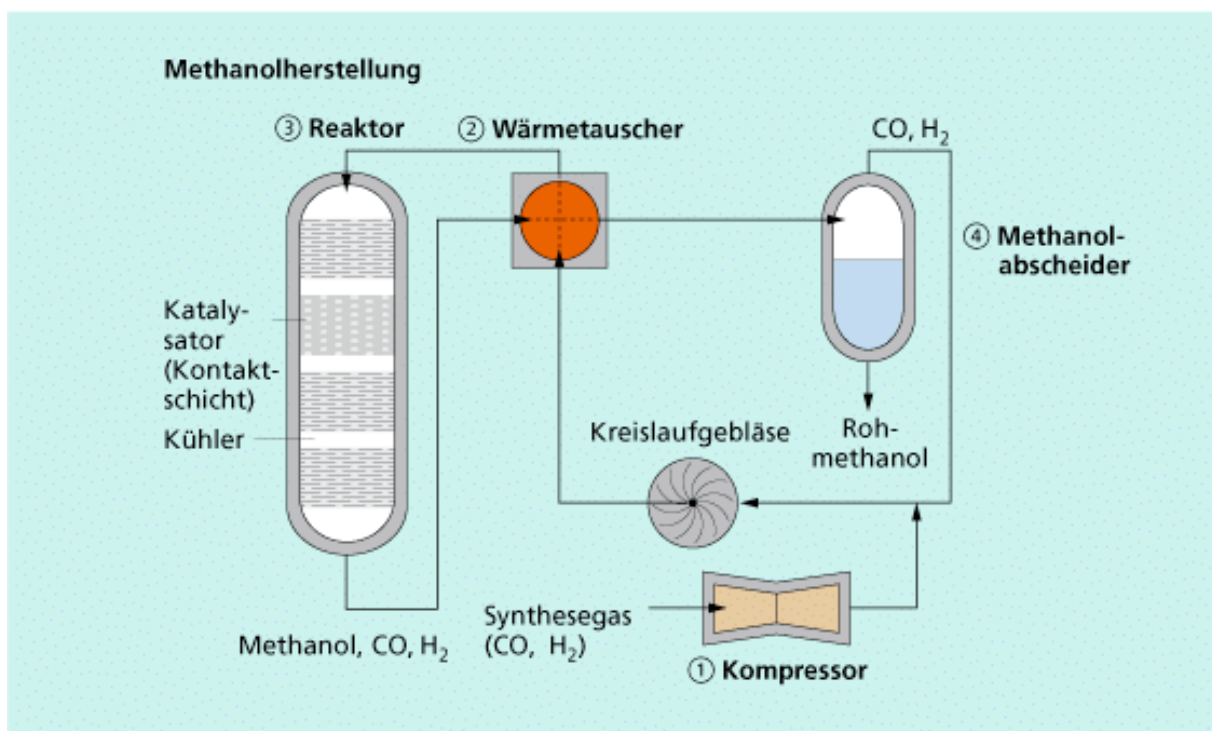
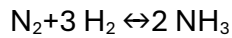


Abbildung 7. Schematischer Aufbau einer Methanolanlage.²⁶

4.3 Herstellung von Ammoniak

Ammoniak wird in der Haber-Bosch-Synthese großindustriell aus Wasserstoff und Stickstoff hergestellt:



Die Reaktion findet unter hohen Drücken von 150–300 bar, Temperaturen von 400–500 °C und in Anwesenheit eines Eisenkatalysators statt.²⁷ Im Reaktor wird also gezielt eine Mischung aus Stickstoff und Wasserstoff hergestellt, mit einem Wasserstoffanteil von 75 %.

Üblicherweise gilt Stickstoff als Inertgas, da er unter normalen Bedingungen chemisch sehr stabil ist. Im Haber-Bosch-Prozess jedoch reagiert er gezielt mit Wasserstoff, um Ammoniak zu bilden.

Die Gaszusammensetzung und die Partialdrücke müssen präzise kontrolliert werden: Überschüssiger Stickstoff wirkt verdünnend und senkt den effektiven Wasserstoffpartialdruck, wodurch die Reaktionsgeschwindigkeit und Ammoniakausbeute beeinflusst werden. Daher wird der inaktive Stickstoff regelmäßig über eine Gasentnahme („Purge“) abgeführt, um die Prozessbedingungen zu optimieren.

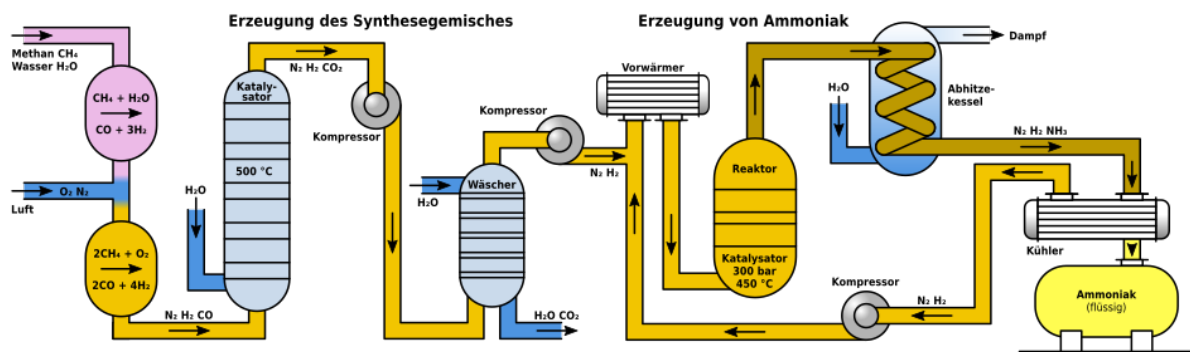


Abbildung 8. Schematischer Aufbau einer Haber-Bosch-Anlage.²⁸

4.4 Hydrodesulfurierung und Hydrodenitrogenierung

Die **Hydrodesulfurierung** ist ein zentrales Raffinerieverfahren zur Entfernung von Schwefelverbindungen aus Erdölfraktionen und petrochemischen Zwischenprodukten.²⁹ Dabei werden schwefelhaltige Kohlenwasserstoffe in einem sauerstofffreien Reaktor mit Wasserstoff in Anwesenheit eines Katalysators umgesetzt. Unter erhöhtem Druck und Temperaturen reagieren die organisch gebundenen Schwefelatome mit Wasserstoff zu Schwefelwasserstoff H_2S , während das Kohlenwasserstoffgerüst hydriert wird oder unverändert bleibt. Das entstehende H_2S wird anschließend aus dem Produktstrom abgetrennt.

Dadurch entsteht ein Gasgemisch aus Wasserstoff, Schwefelwasserstoff sowie weiteren gasförmigen Kohlenwasserstoffkomponenten. Der Wasserstoff wird dabei häufig im Kreislauf geführt, um den Gesamtverbrauch zu reduzieren, was zu zeitlich und örtlich variierenden Gaszusammensetzungen führt.

Die **Hydrodenitrogenierung** ist ein Raffinerieverfahren zur Entfernung stickstoffhaltiger Verbindungen aus Erdölfraktionen und petrochemischen Zwischenprodukten.³⁰ Dabei werden organisch gebundene Stickstoffverbindungen in einem sauerstofffreien Reaktor mit Wasserstoff in Anwesenheit eines Katalysators umgesetzt. Unter erhöhtem Druck und Temperaturen werden die Stickstoffatome aus den Kohlenwasserstoffmolekülen abgespalten und überwiegend zu NH_3 umgesetzt, während das Kohlenwasserstoffgerüst hydriert wird oder unverändert bleibt. Das entstehende Ammoniak wird anschließend aus dem Produktstrom entfernt.

Dabei entsteht ein wasserstoffhaltiges Gasgemisch aus Wasserstoff, Ammoniak sowie weiteren gasförmigen Kohlenwasserstoffkomponenten. Der Wasserstoff wird häufig im Kreislauf geführt, um den Gesamtverbrauch zu reduzieren, was – analog zur Hydrodesulfurierung – zu zeitlich und örtlich variierenden Gaszusammensetzungen in den Prozessströmen führt.

5 Wartungs-, Anfahr- und Abschaltungsprozesse (S)

Es gibt zahlreiche, industrielle Anwendungen, in denen reiner Wasserstoff als Prozessgas eingesetzt wird. Während der Reaktionen entstehen keine Gasgemische, aber aus Brand- und Explosionsschutzgründen werden diese Anlagen vor Inbetriebnahme und nach der Abschaltung gespült, typischerweise mit Stickstoff.^{31, 32} Dabei entstehen vorübergehend Stickstoff-Wasserstoff-Gemische.

Beispiele dafür sind:

Die **Hydrierung** ist ein industrieller Prozess, bei dem Wasserstoff an ungesättigte organische Verbindungen addiert wird, meist in Gegenwart von Katalysatoren wie Nickel, Palladium oder Platin.³³ Zum Beispiel werden in der Lebensmittelindustrie so flüssige Öle in feste Fette wie Margarine umgewandelt und in der Petrochemie wird die Hydrierung zur Entfernung von Schwefel aus Erdölprodukten eingesetzt.³⁴

Die **Dehydrierung** ist das Entfernen von Wasserstoff aus organischen Molekülen. Ein aktuelles Beispiel, das stark im Kontext der Wasserstoffinfrastruktur diskutiert wird, sind Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC).³⁵ Diese Trägersysteme können Wasserstoff chemisch aufnehmen (Hydrierung) und zu einem späteren Zeitpunkt durch Dehydrierung wieder freisetzen. LOHC-Systeme bieten einen sicheren Weg zur Speicherung und zum Transport von Wasserstoff, wobei die Reaktionen unter sauerstofffreien Bedingungen ablaufen, um Oxidation oder Zersetzung der Trägermoleküle zu vermeiden.

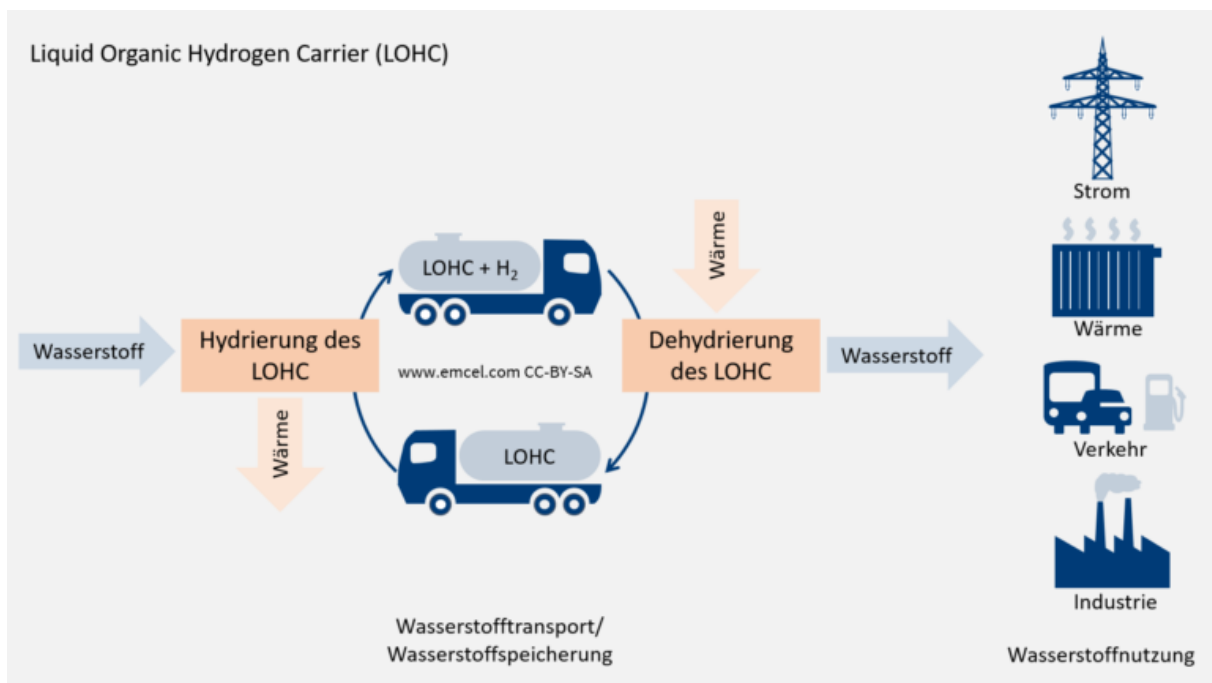


Abbildung 9. Funktionsweise von LOHC-Wasserstoffspeichern.

Hydrocracking ist ein zentrales Verfahren der Erdölraffination, bei dem schwere Kohlenwasserstoffe in leichtere Produkte umgewandelt werden. Dabei reagieren die Kohlenwasserstoffe unter hohem Wasserstoffdruck (bis 200 bar) und bei Temperaturen von 350–450 °C in Anwesenheit eines Katalysators.³⁶

Grüner Stahl: Da die Stahlindustrie für etwa 7 % der industriellen CO₂-Emissionen weltweit verantwortlich ist,³⁷ hat deren Dekarbonisierung Priorität. Statt der traditionellen Verwendung von Koks ist eine Umstellung auf grünen Wasserstoff möglich. Dabei wird Eisenoxid (Fe₂O₃) mit Wasserstoff zu Eisen und Wasser reduziert.

Ein Beispiel für eine solche Technologie ist der HYBRIT-Prozess, bei dem 100 % grüner Wasserstoff verwendet wird.³⁸ Innerhalb dieses Projekts gelang es im Juli 2021 in Schweden, erstmals Stahl vollständig mit fossilfreiem Wasserstoff herzustellen. Im Gegensatz dazu wird beim Circored-Verfahren derzeit Wasserstoff aus der Dampfreformierung von Erdgas zur Reduktion von Eisenerz eingesetzt, was als Stand der Technik für diese Technologie gilt.³⁹

In der industriellen Praxis wird in der Regel 100 % Wasserstoff für die Direktreduktion eingesetzt. Inertgas-Wasserstoff-Mischungen, wie H₂/N₂-Gemische und H₂/Ar-Gemische, kommen hauptsächlich in Labor- und Pilotanlagen zum Einsatz, um die Reaktionskinetik zu untersuchen oder explosionsfähige Atmosphären zu vermeiden.⁴⁰

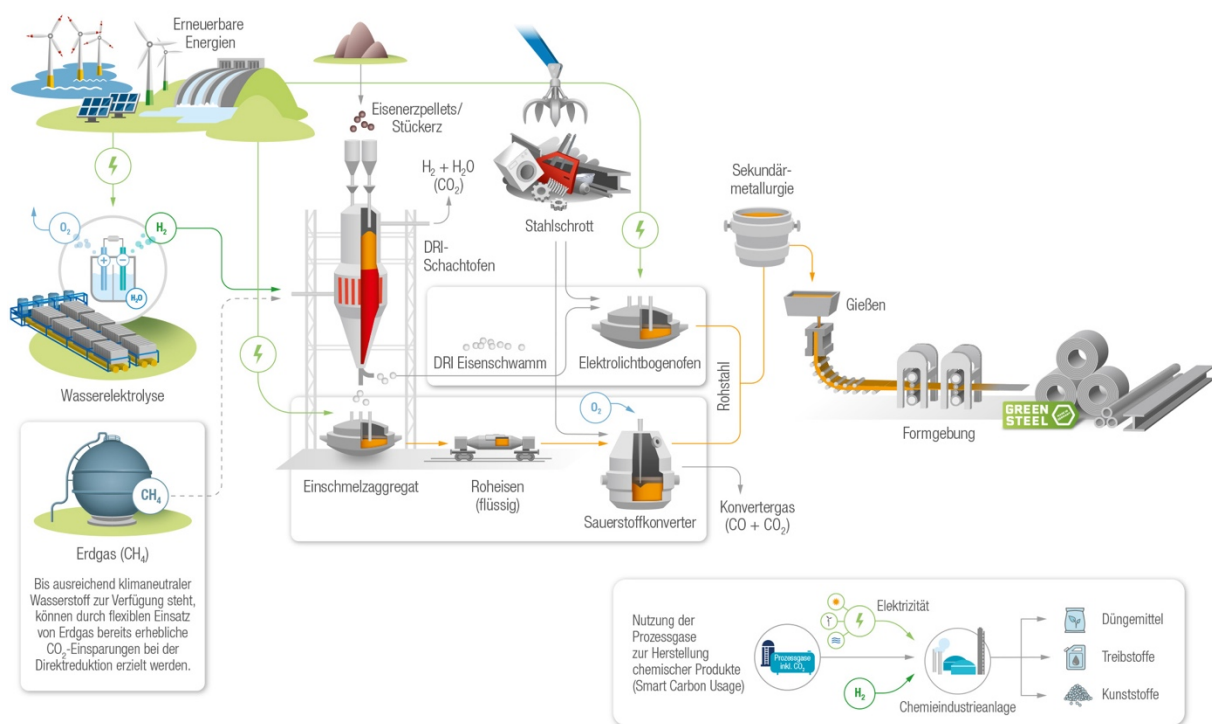


Abbildung 10. Wege zu grünem Stahl.⁴¹

6 Energieanwendungen

6.1 Cracken von Ammoniak (P)

Durch Temperaturerhöhung lässt sich Ammoniak in Wasserstoff und Stickstoff zerlegen. Die Reaktion folgt der Gleichung $2 \text{NH}_3 \rightarrow 3 \text{H}_2 + \text{N}_2$ und wird typischerweise bei erhöhten Temperaturen, unter Verwendung von Katalysatoren und in sauerstofffreien Reaktoren durchgeführt.⁴²

Das Verfahren wird unter anderem als vielversprechende Option zur dezentralen oder bedarfsgerechten Bereitstellung von Wasserstoff betrachtet. Ammoniak wird an einem Ort der Welt aus grünem Wasserstoff, Stickstoff und erneuerbaren Energien hergestellt, in flüssiger Form transportiert und dann an anderer Stelle wieder in Wasserstoff und Stickstoff gespalten.

Das beim Cracken entstehende Produktgas ist ein sauerstofffreies Gasgemisch, das hauptsächlich aus Wasserstoff und Stickstoff besteht und je nach Prozessbedingungen auch noch unverbrauchtes Ammoniak enthalten kann. Dieses Gemisch muss hinsichtlich seines Wasserstoffanteils überwacht und analysiert werden, weil der Anteil an H_2 die Eignung des Gases für nachgeschaltete Anwendungen bestimmt. Beispielsweise erfordern Brennstoffzellen, Gasturbinen oder Verbrennungsmotoren mit ammoniakbasiertem Brennstoff einen definierten Wasserstoffgehalt, um eine effiziente und schadstoffarme Energieumwandlung zu gewährleisten. Zudem kann Restammoniak katalytische Systeme schädigen oder toxische Emissionen verursachen, was messtechnisch erfasst werden muss.

Auch für die Nutzung von Ammoniak als Kraftstoff ist das Ammoniak-Cracken von Bedeutung. Reines Ammoniak weist ungünstige Verbrennungseigenschaften auf, insbesondere eine geringe Flammengeschwindigkeit und eine hohe Zündenergie, sodass eine stabile Verbrennung nur eingeschränkt möglich ist.⁴³ Aus diesem Grund wird Ammoniak in motorischen Anwendungen häufig teilweise gecrackt, um ein Ammoniak-Wasserstoff-Gemisch zu erzeugen. Bereits ein begrenzter Crackgrad, beispielsweise mit einem Wasserstoffanteil von etwa 20–30 % verbessert die Zündwilligkeit und Verbrennungsstabilität deutlich und ermöglicht so den Einsatz in Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen. Die Überwachung des Wasserstoffgehalts im Produktgas ist dabei eine zentrale Voraussetzung für die Prozessüberwachung.⁴⁴

6.2 Brennstoffzellen (S/P)

In Brennstoffzellen wird die chemische Energie von Wasserstoff direkt in elektrische Energie umgewandelt – ohne klassische Verbrennung, sondern über eine elektrochemische Reaktion zwischen Wasserstoff an der Anode und Sauerstoff an der Kathode, bei der als Produkt nur Wasser und Strom entstehen.⁴⁵

Nach der elektrochemischen Reaktion verbleibt ein Teil des eingespeisten Wasserstoffs unverbraucht im Abgasstrom, der zusammen mit Stickstoff (z. B. aus Inertgasen oder Resten aus der Brennstoffzufuhr) und Wasserdampf auftritt. Dadurch besteht das sogenannte Anodenabgas oft aus einem Gemisch von H_2 , N_2 und H_2O , ohne Sauerstoff, und ist sowohl für die Prozessüberwachung als auch für Effizienzstrategien relevant.⁴⁶

Einige Brennstoffzellensysteme nutzen Reformergase, wenn der Wasserstoff in situ aus kohlenwasserstoffhaltigen Rohstoffen oder flüssigen Energieträgern erzeugt wird.⁴⁷ Diese Reformergase bestehen aus H_2 -reichen, sauerstofffreien Gasgemischen (z. B. H_2 , CO , CO_2 , H_2O), die anschließend im Brennstoffzellensystem umgesetzt werden.

Ein weiterer wichtiger Strömungspfad sind Rezirkulationsströme: Ein Teil des Anodenabgases wird im System zurückgeführt, um den Wasserstoffverbrauch zu optimieren und die Brennstoffeffizienz zu erhöhen. Durch die Rezirkulation bleibt das Gasgemisch mit hohen Anteilen an Wasserstoff und Wasserdampf sauerstofffrei, und seine Zusammensetzung kann sich in Abhängigkeit von Last, Temperatur und Wasserstoffnutzung verändern.⁴⁸ Die Überwachung der Wasserstoffkonzentration im Rezirkulationsstrom kann hier auch als Sicherheitsüberwachung dienen.

Solche sauerstoffarmen, wasserstoffhaltigen Gasgemische sind charakteristisch für Brennstoffzellensysteme mit externem Reforming und internem Kreislaufmanagement. Sie sind ein technisch relevanter Aspekt sowohl für die Effizienz als auch für die Prozessüberwachung, da beispielsweise der verbleibende Wasserstoffanteil Einfluss auf den Wirkungsgrad, die Systemstabilität und die Auslegung von Abgasreinigung oder Nachnutzung hat.

Cracken von Ammoniak + Brennstoffzelle

Im Rahmen des Projekts ShipFC wurde die weltweit erste Hochtemperatur-Brennstoffzelle auf Ammoniakbasis für den maritimen Einsatz entwickelt, bei der Ammoniak als Wasserstoffträger genutzt wird.⁴⁹ In Ammoniak-basierten Brennstoffzellensystemen wird Ammoniak zunächst in einem Spaltreaktor bzw. Cracker zu Stickstoff und Wasserstoff umgesetzt. Das entstehende, sauerstofffreie Gasgemisch enthält etwa 75 % Wasserstoff sowie geringe Restanteile an Ammoniak. Auch nach der Brennstoffzelle verbleiben unverbrauchter Wasserstoff und Ammoniak im Gasstrom, sodass in verschiedenen Prozessstufen wasserstoffhaltige Gasgemische mit variabler Zusammensetzung auftreten. Die gezielte Regelung und Überwachung des Wasserstoffanteils ist daher eine wesentliche Voraussetzung für eine stabile, effiziente und emissionsfreie Prozessführung.

6.3 Power-to-X-Verfahren (P)

Unter **Power-to-X** werden Verfahren zusammengefasst, bei denen elektrische Energie – vorzugsweise aus erneuerbaren Quellen – in chemische Energieträger bzw. Kraftstoffe umgewandelt wird. Ausgangspunkt nahezu aller PtX-Routen ist Wasserstoff, der mittels Elektrolyse erzeugt wird. In den nachfolgenden Prozessschritten wird Wasserstoff in sauerstofffreien Gasgemischen – in der Regel mit CO und CO₂ – umgesetzt.

Das derzeit zentrale Anwendungsgebiet ist die Herstellung von Methan aus Synthesegas (H₂/CO/CO₂). Das synthetische Methan kann in bestehende Erdgasnetze eingespeist, als Kraftstoff genutzt oder weiter zu anderen synthetischen Kraftstoffen umgesetzt werden.⁵⁰

Langkettige Kohlenwasserstoffe können auch direkt aus Synthesegas hergestellt werden – über die Fischer-Tropsch-Synthese. Nach weiterer Aufarbeitung werden diese dann als synthetischer Diesel, Kerosin oder Naphtha eingesetzt.⁵¹ Diese E-Fuels sind mit bestehender Infrastruktur kompatibel und gelten als wichtiger Baustein zur Dekarbonisierung des Verkehrs.

All diesen Prozessen ist die Verwendung von Synthesegas gemein. Die Prozesse unterscheiden sich nur durch die Prozessbedingungen, also den Druck, die Temperatur und die Art der Katalysatoren – nicht durch die eingesetzten Ausgangsstoffe. Es treten also in großem Umfang sauerstofffreie, wasserstoffhaltige Gasgemische auf, sowohl als gezielt eingesetzte Reaktionsmedien als auch in Zwischen-, Recycling- und Abgasströmen. Diese Gemische sind prozessbestimmend für Effizienz, Produktqualität und Betriebssicherheit der jeweiligen PtX-Anwendungen.

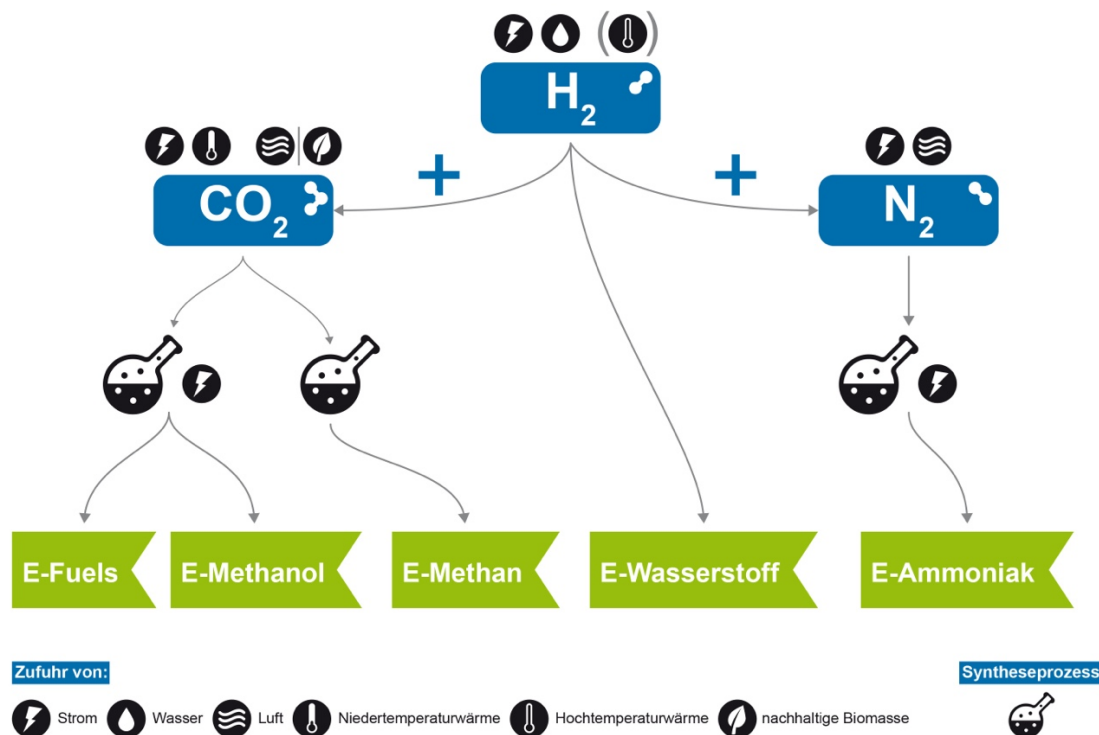


Abbildung 11. Überblick über die Ausgangsstoffe, Prozesse und PtX-Produkte.⁵²

6.4 Wasserstoff als maritimer Kraftstoff⁵³ (S)

Wasserstoff gilt aufgrund seiner emissionsfreien Verbrennung als möglicher Kraftstoff der Zukunft für die klimaneutrale Schifffahrt. Seine Nutzung birgt jedoch erhöhte Brand- und Explosionsrisiken, da die Mindestzündenergie von Wasserstoff (0,019 mJ) deutlich niedriger ist als die von Methan (0,28 mJ) – der Hauptkomponente von Erdgas.

Die European Maritime Safety Agency (EMSA) empfiehlt daher spezielle Sicherheitsvorkehrungen, die voraussichtlich in künftige Klassifikationsvorschriften einfließen werden. Eine zentrale Maßnahme ist die bauliche Doppelwandigkeit oder Umhausung wasserstoffführender Systeme, damit im Havariefall keine explosionsfähigen Atmosphären entstehen können. Zwischen Innen- und Außenrohr wird dabei häufig eine Inertgasatmosphäre (oder Vakuum) vorgesehen, die als Sicherheitsbarriere dient.

Die Wahl des Inertgases richtet sich nach dem Temperaturbereich des Systems: Für Anwendungen oberhalb der Verflüssigungstemperatur von Stickstoff (-196 °C) wird Stickstoffgas eingesetzt, während bei sehr tiefen Temperaturen, wie sie bei verflüssigtem Wasserstoff (LH_2) auftreten, Helium bevorzugt wird, da Helium auch am Siedepunkt von Wasserstoff gasförmig bleibt. Sonst könnte es zur Verflüssigung des Inertgases kommen. Da Wasserstoff bereits bei geringen Sauerstoffanteilen zündfähig ist, müssen Inertgase mit höchstens 4,4 Vol.-% O_2 eingesetzt werden.

Im Normalbetrieb hat der Wasserstoff keinen Kontakt zu den Inertgasen in den Umhausungen. Bei Havarien kann es infolge einer Leckage zur Bildung von Wasserstoff-Inertgas-Mischungen kommen, die je nach Bedingungen zwischen -253 °C und Umgebungstemperatur haben sowie einen möglichen Druck bis zu mehreren hundert bar.



Abbildung 12. Doppelwandige Schlauchleitungen.⁵⁴

Genauso wie in den industriellen Anwendungen werden beim Spülen der wasserstoffführenden Leitungen vor der Inbetriebnahme und nach der Abschaltung des Systems ebenfalls Wasserstoff-Inertgas-Mischungen entstehen – höchstwahrscheinlich mit Stickstoff als Inertgas und bei Umgebungstemperatur und leichtem Überdruck.

7 Wasserstoffspeicherung und -transport

7.1 Wasserstoffverflüssigung (S)

Die Verflüssigung von Wasserstoff gewinnt in Zukunft an Bedeutung, da sie hohe Energiedichten auf kleinem Volumen ermöglicht und damit Transport und Speicherung für langfristige Wasserstofflogistik erleichtert. Um Wasserstoff auf den Siedepunkt, also -253 °C zu kühlen, werden in den verschiedenen Prozessschritten flüssiger Stickstoff, Helium oder Neon als Kühlmittel eingesetzt, da sie die niedrigen Temperaturen zuverlässig erzeugen.⁵⁵

Zwar kommen diese Kühlmittel zum Einsatz, sie befinden sich jedoch in getrennten Kreisläufen und nicht im selben Behälter wie der Wasserstoff, sodass im Normalbetrieb keine direkten Mischungen entstehen. Im Falle von Havarien, Leckagen oder unkontrollierten Freisetzungen kann es jedoch zu vorübergehenden Wasserstoff-Kühlmittel-Gemischen kommen, weshalb in Anlagen entsprechende Sicherheits- und Überwachungsmaßnahmen erforderlich sind.

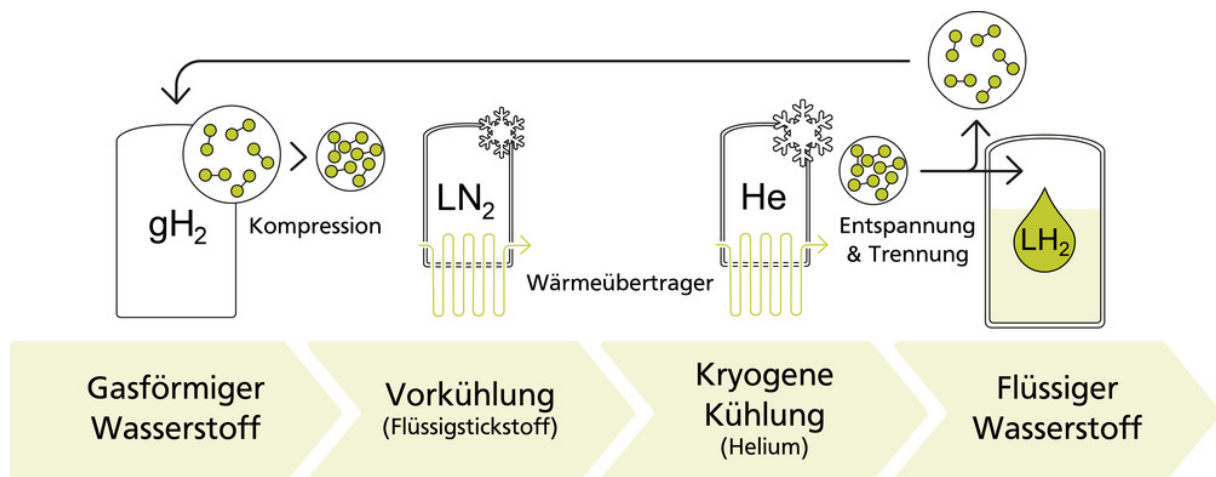


Abbildung 13. Vereinfachtes Schema eines Wasserstoff-Verflüssigers.⁵⁶

7.2 Kavernenspeicher (S)

Unterirdische Kavernenspeicher sind künstlich erzeugte Hohlräume im Untergrund, meist in Salzformationen, die durch Aussolung entstehen und zur großskaligen Speicherung von Gasen genutzt werden können. Aufgrund ihrer Gasdichtheit, hohen Ein- und Ausspeicherleistung und guten Regelbarkeit werden Salzkavernen als geeignete Speicheroption für Wasserstoff diskutiert.⁵⁷

In solchen Untergrundspeichern kann Wasserstoff als Bestandteil sauerstoffarmer Gasgemische auftreten. Ein wesentlicher Grund ist der Einsatz von Polstergas (Cushion Gas), das dauerhaft im Speicher verbleibt, um den notwendigen Betriebsdruck aufrechtzuerhalten. In der Literatur werden hierfür unter anderem Methan, Stickstoff, Kohlendioxid oder Wasserstoff selbst diskutiert, wodurch sich lokal Gasgemische einstellen können.⁵⁸

Darüber hinaus können Gasgemische entstehen, wenn bestehende Untergrundspeicher umgewidmet werden, die zuvor zur Erdgaslagerung dienten. In solchen Fällen können Restkohlenwasserstoffe, insbesondere Methan, im Speicher verbleiben und sich mit dem eingelagerten Wasserstoff vermischen.⁵⁹ Auch Misch- und Beimischkonzepte, bei denen Wasserstoff gemeinsam mit Erdgas gespeichert oder gehandhabt wird, werden als Übergangslösungen oder zur Kopplung bestehender Infrastrukturen untersucht.⁶⁰

Selbst bei dedizierten Wasserstoffspeichern ist die Gasqualität ein relevantes Thema: Abhängig von Herkunft des Wasserstoffs, Speicherhistorie und Betriebsweise können N_2 , CH_4 , CO , CO_2 oder Edelgase als Verunreinigungen auftreten.⁶¹

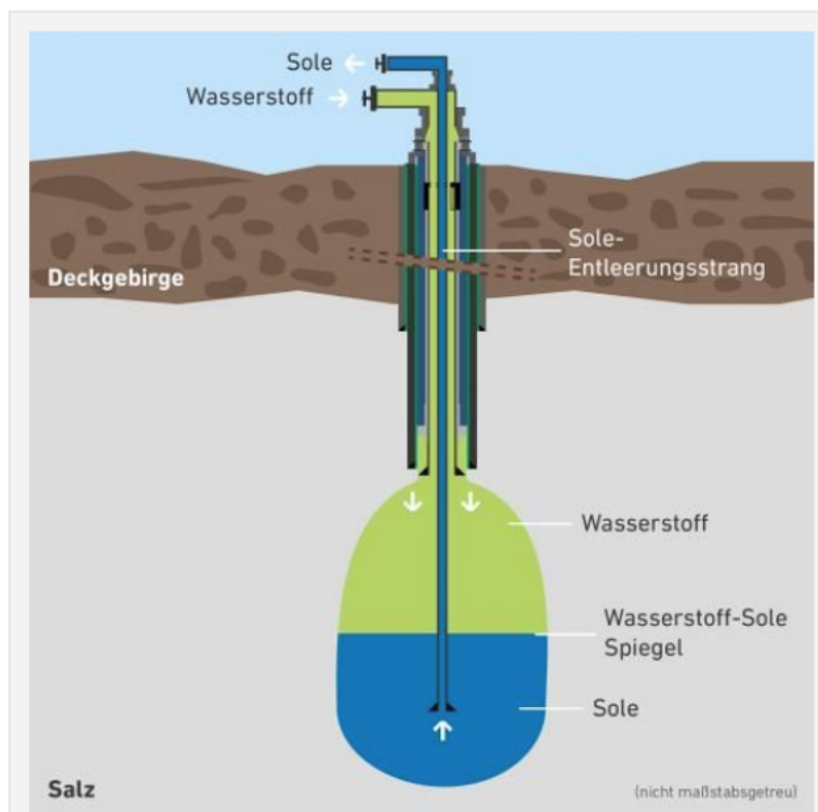


Abbildung 14. Aufbau einer Salzkaverne zur Wasserstoffspeicherung.⁶²

7.3 Wasserstoffbeimischung zum Erdgasnetz (S/P)

Die Beimischung von Wasserstoff in bestehende Erdgasnetze verfolgt das Ziel, CO_2 -Emissionen zu reduzieren und erneuerbare Energien wirkungsvoll in die Versorgung von Wärme, Industrie und Strom einzubinden. Grüner Wasserstoff kann dabei helfen, weil er bei weder bei der Herstellung noch bei der Verbrennung CO_2 erzeugt. Zudem ermöglicht eine schrittweise Beimischung die Nutzung der vorhandenen Gasinfrastruktur, ohne sie vollständig ersetzen zu müssen.⁶³

In verschiedenen Demonstrations- und Forschungsprojekten wurden systematisch Wasserstoff-Erdgas-Gemische in Verteil- und Fernleitungsnetze eingespeist. So zeigten Feldtests und Pilotvorhaben, dass Wasserstoff in definierten Anteilen über das

vorhandene Netz transportiert und ohne größere Nachteile für Verbraucher genutzt werden kann.⁶⁴

Die Studien und technischen Berichte nennen einen Beimischbereich von etwa 5–10 Vol% H₂ als technisch problemlos machbar, ohne größere Modifikationen an Netz oder Endgeräten.⁶⁵ Unter bestimmten Rahmenbedingungen werden auch bis zu 20 Vol% H₂ als praktikabel angesehen, solange Sicherheits- und Materialfragen berücksichtigt werden. Höhere Anteile erfordern üblicherweise technische Anpassungen und umfangreichere Prüfungen.

Die physikalischen Betriebsbedingungen im Erdgasnetz bleiben durch die Wasserstoffbeimischung weitgehend unverändert.⁶⁶ Drücke in Fernleitungsnetzen liegen typischerweise im Bereich von ≈ 20 –80 bar und in Verteilungsnetzen meist zwischen $\approx 0,1$ –10 bar. Die Temperaturen entsprechen in der Regel der Umgebungstemperatur (je nach Jahreszeit). Die Beimischung von Wasserstoff beeinflusst diese Betriebsparameter nicht wesentlich, kann aber das Strömungsverhalten und die Gasdichte verändern.

Die Kenntnis des Wasserstoffanteils im Erdgas-Gemisch ist aus mehreren Gründen wichtig:

- Heizwert und Verbrennungsverhalten
Wasserstoff hat zwar einen höheren Heizwert, aber auch eine niedrigere volumetrische Energiedichte als Methan, was die Verbrennungscharakteristik etwa in Heizkesseln beeinflusst.⁶³
- Materialverträglichkeit:
Höhere H₂-Anteile wirken sich auf Werkstoffe, Dichtungssysteme und Leckageraten aus; sie müssen für Wasserstoff geeignet sein.⁶⁷
- Sicherheit:
Wasserstoff-Erdgas-Mischungen haben andere Zünd- und Explosionsgrenzen als reines Erdgas, was bei Planung, Betrieb und Notfallmanagement berücksichtigt werden muss.⁶⁸
- Kompatibilität der Endgeräte:
Gasgeräte sind in der Regel für Erdgas ausgelegt; der Wasserstoffanteil kann Einfluss auf Leistung, Effizienz und Emissionsverhalten haben, weshalb die Einhaltung definierter Mischgrenzen geprüft werden muss.

Zudem gibt es Ansätze, den Wasserstoff zwar über das Erdgasnetz zu transportieren, dann aber an anderer Stelle wieder abzutrennen und in hoher Qualität (99,97 %) für Anwendungen wie die Betankung von Wasserstofffahrzeugen nutzbar zu machen.^{69,70} Auch dort kann eine prozessbedingte Überwachung des Wasserstoffs sinnvoll sein.

8 Gasentstehung bei radioaktiven Abfällen (S)

In tiefen geologischen Endlagern für radioaktive Abfälle entstehen über lange Zeiträume Gase, die Anlass zur Sorge um die Sicherheit dieser Lagerung geben.⁷¹

Die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) gab Studien in Auftrag, um die Entstehungsmechanismen und die potenziellen Folgen der Gasansammlung in den tiefen geologischen Formationen von Endlagern für radioaktive Abfälle besser zu verstehen.⁷² Experimente in unterirdischen Forschungslaboren haben verschiedene Prozesse der Gasbildung, des Gasverbrauchs und des Gastransports in Gestein, in belüfteten und unbelüfteten Stollen, in Zellen und in Bohrlöchern etc. aufgezeigt. Diese Prozesse sind jedoch noch nicht vollständig verstanden.

Bereits vor dem Eintreffen radioaktiver Abfälle kommt es zur Gasbildung. Diese Gase fördern die Korrosion von Metallen und aktivieren Ketten chemischer und biochemischer Reaktionen. Die wichtigsten bisher bekannten Mechanismen sind:

- die Korrosion metallischer Werkstoffe, bei der primär Wasserstoff entsteht.
- die Radiolyse von Wasser und organischer Substanz unter Einwirkung von Strahlung, bei der u. a. Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und Methan entstehen.
- der mikrobielle und chemische Abbau organischer Substanz, der zur Bildung von Methan, Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff und Ammoniak führt.
- der Alphazerfall, durch den Helium entsteht.

Die Gasbildung gilt neben geomechanischen Aspekten als einer der kritischsten Faktoren für die Langzeitsicherheit geologischer Endlager. Da Gase im Wirtsgestein nur langsam entweichen, kann es zu einem allmählichen Druckanstieg kommen, der nach Modellrechnungen Werte im Bereich von mehreren zehn Bar erreichen kann. Eine Überwachung der Gaskonzentrationen kann ein wertvoller Hinweis auf den Zustand solcher Endlager darstellen.



Abbildung 15. Radioaktive Abfälle im Endlager Morsleben.⁷³

9 Literatur

- ¹ <https://www.anleitung-zum-schweissen.de/fachartikel-zum-thema-schweissen/fachinfos-zum-formieren/>
- ² <https://de.airliquide.com/formiergas-kaufen>
- ³ <https://www.linde-gas.de/shop/de/de-ig/formiergas-90-10-10l-200-bar-2360112>
- ⁴ <https://de.airliquide.com/formiergas-kaufen>
- ⁵ <https://www.messer.at/formiergas>
- ⁶ <https://de.kindle-tech.com/faqs/what-is-annealing-in-hydrogen-atmosphere>
- ⁷ <https://www.aalberts-st.com/de/verfahren/wasserstoff-gluehen/>
- ⁸ <https://de.kindle-tech.com/faqs/what-is-hydrogen-annealing>
- ⁹ <https://de.kindle-tech.com/faqs/why-hydrogen-is-used-in-sintering-process>
- ¹⁰ <https://de.kindle-tech.com/faqs/what-is-sintering-with-hydrogen>
- ¹¹ <https://de.airliquide.com/ihre-anwendung/warmebehandlung-metallischer-bauteile/harten-und-verguten>
- ¹² <https://de.wikipedia.org/wiki/Reflow-Löten>
- ¹³ <https://www.bodycote.com/de/was-wir-tun/metallverbindung/wasserstoffhartloten>
- ¹⁴ https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/clausthal_derivate_00002040/N.%20Aslan%20-%20Desoxidation%20von%20gasgetragenen%20Pulvern.pdf
- ¹⁵ <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2016/ra/c6ra22887a>
- ¹⁶ <https://www.mks.com/n/cvd-physics>
- ¹⁷ <https://bdg-online.de/leistungen/pruefen/fluimos/ansicht/formiergas-dichtheitspruefung.html#:~:text=Das%20System%20zur%20Formiergas%2DDichtheitsprüfung,Helium%2DDichtheitsprüfung%20nicht%20notwendig%20ist.>
- ¹⁸ <https://www.frigotechnik.de/Frigo-News/Dichtheitspruefung-Lecksuche-mit-Formiergas/>
- ¹⁹ https://www.bfs-kaelte-klima.de/aktuelles/fragen-aus-der-praxis/detail?tx_ttnews%5Btt_news%5D=1231&cHash=ca62c2e3ae10c95ca658edd66da6a432
- ²⁰ <https://www.esders.de/2023/10/lecksuche-an-wasserleitungen-mit-formiergas/>
- ²¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Steam_reforming
- ²² J. Pasel et al.: Test of a water-gas-shift reactor on a 3 kWe-scale – design points for high- and low-temperature shift reaction. In: Journal of Power Sources 152 (2005) S. 189–195.
- ²³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Dampfreformierung.jpg>
- ²⁴ <https://www.processsensing.com/de-de/blog/analyse-techniken-für-uhp-wasserstoff.htm#:~:text=Messstelle%20für%20reinen%20Wasserstoff,eine%20kostengünstigere%20Lösung%20benötigt%20wird.>
- ²⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Methanolherstellung>
- ²⁶ <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie/artikel/herstellung-von-methanol>
- ²⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Haber_process
- ²⁸ Von Sven - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3167578>
- ²⁹ <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrodesulfurization>
- ³⁰ <https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrodenitrogenierung>
- ³¹ <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/265>
- ³² https://epb.bibl.th-koeln.de/frontdoor/deliver/index/docId/1374/file/MA_Piehl_LOHC_48_20190610.pdf
- ³³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrierung>
- ³⁴ <https://www.krohne.com/de/industrien/oel-und-gas-industrie/raffination-oel-und-gas/hydrotreating-in-der-oel-und-gas-industrie>
- ³⁵ <https://emcel.com/de/lohc-wasserstoffspeicher/>
- ³⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrocracken>
- ³⁷ <https://www.joanneum.at/life/nachhaltige-stahlproduktion-forscherinnen-beleuchten-co2-bilanz-und-soziale-auswirkungen/#:~:text=Die%20Herstellung%20von%20Stahl%20verursacht%20rund%207,Graz%20und%20von%20JOANNEUM%20RESEARCH%20erstmals%20untersucht.>

-
- ³⁸ <https://group.vattenfall.com/de/nachhaltigkeit/plan-fur-den-klimawandel/dekarbonisierung-der-industrie/hybrid>
- ³⁹ <https://d-nb.info/1264728824/34>
- ⁴⁰ <https://elib.dlr.de/195544/1/1-s2.0-S0040603123001211-main.pdf>
- ⁴¹ <https://www.wvstahl.de/publikationen/wege-zum-gruenen-stahl/>
- ⁴² <https://www.topsoe.com/blog/ammonia-a-cracking-opportunity-for-hydrogen>
- ⁴³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S008207846780225X>
- ⁴⁴ https://www.researchgate.net/publication/385005479_Flame_Speed_Measurements_of_Ammonia-Hydrogen_Mixtures_for_Gas-Turbines
- ⁴⁵ <https://www.brennstoffzellen.rwth-aachen.de/Links/FCHandbook7.pdf>
- ⁴⁶ https://hzwo.eu/media/ch2ance_Factsheet_5_Anodensubsystem_ES.pdf
- ⁴⁷ <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/fuel-cell-information/processing-alternative-fuels-for-fuel-cells>
- ⁴⁸ <https://www.ch2ance.de/h2-wissen/h2-rezirkulationsgeblaese>
- ⁴⁹ <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2021/maerz-2021/weltweit-erste-hochtemperatur-brennstoffzelle-mit-ammoniak-fuer-schiffe.html>
- ⁵⁰ https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/EN/2025/2025-03-13_NWR-Information_and_White_Paper_E-SNG.pdf
- ⁵¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Fischer-Tropsch-Synthese>
- ⁵² Von Öko-Institut - <https://www.flickr.com/photos/oekoinstitut/48378513216/in/album-72157709574720357/>, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=83758493>
- ⁵³ [https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5263-mapping-safety-risks-for-hydrogen-fuelled-ships-study-investigating-the-safety-of-hydrogen-as-fuel-on-ships.html#:~:text=The%20first%20deliverable%20\(D.,insulation%20cannot%20be%20ruled%20out.](https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5263-mapping-safety-risks-for-hydrogen-fuelled-ships-study-investigating-the-safety-of-hydrogen-as-fuel-on-ships.html#:~:text=The%20first%20deliverable%20(D.,insulation%20cannot%20be%20ruled%20out.)
- ⁵⁴ <https://telle.de/fertigung-produkte/schlaeuche/doppelwandige-schlauchleitungen>
- ⁵⁵ Tongtong Zhang, Joao Uratani, Yixuan Huang, Lejin Xu, Steve Griffiths, Yulong Ding, Hydrogen liquefaction and storage: Recent progress and perspectives, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 176, 2023, 113204, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113204>.
- ⁵⁶ https://www.itep.kit.edu/fluessigwasserstoff_ein_ueberblick_zu_einem_besonderen_energetraeger.php
- ⁵⁷ <https://www.bveg.de/die-branche/speicher-in-deutschland/kavernenspeicher/>
- ⁵⁸ <https://www.mdpi.com/2673-8392/4/2/54>
- ⁵⁹ https://energy.ec.europa.eu/publications/study-hydrogen-quality-dedicated-infrastructure-and-standardisation_en
- ⁶⁰ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923034882>
- ⁶¹ <https://link.springer.com/article/10.1007/s11631-025-00843-1>
- ⁶² <https://www.power2market.com/de/news/kavernenspeicher-rolle-im-wasserstoffsektor-in-abhängigkeit-der-geologischen-gegebenheiten>
- ⁶³ <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/sicherheit-h2-beimischung-dvgw.pdf>
- ⁶⁴ <https://www.fraunhofer-zukunftsfabrik.de/projektreview-wasserstoffbeimischung-im-bestehenden-erdgasnetz-in-deutschland/>
- ⁶⁵ https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/blending-hydrogen-eu-gas-system-2022-01-19_en
- ⁶⁶ <https://www.bundestag.de/resource/blob/915112/d1a66b707de8458aa57fb107f240754d/WD-8-046-22-pdf-data.pdf>
- ⁶⁷ <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hybrid-opportunities-hydrogen-blending-natural-gas-pipelines>
- ⁶⁸ https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/en/documents/Studies-Reports/FINAL_FraunhoferIEE_ShortStudy_H2_Blending_EU_ECF_Jan22.pdf
- ⁶⁹ <https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/3269/2/Mantsch%20Martin%20-%202016%20-%20Trennung%20von%20Wasserstoff-Methan%20Mischungen%20mittels...pdf>
- ⁷⁰ <https://h2-news.de/forschung/erdgas-und-wasserstoff-mittels-kohlenstoffmembran-trennen/>
- ⁷¹ <https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/sngaseendlager.pdf>
- ⁷² https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_dans_les_centres_de_stockage_souterrains_de_déchets_radioactifs
- ⁷³ <https://www.bge.de/de/morsleben/>