





Konformitätsleitfaden für stationäre Anlagen der Wasserstofftechnologie

 Leitfaden

 Konformitätsleitfaden für stationäre Anlagen der Wasserstofftechnologie

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Gängige stationäre Wasserstofftechnologien	8
2.1 Produktion: Herstellung von Wasserstoff in Elektrolyseanlagen	9
2.1.1 Allgemeines und Begriffsdefinition	9
2.1.2 Alkali-Elektrolyse (AEL) – elektrochemische Zelle	10
2.1.3 Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM) – elektrochemische Zelle	12
2.1.4 Kernelektrolyse	14
2.1.5 Elektrolyseanlage	15
2.2 LKW-Trailer	17
2.3 Betriebliche Gashochdruckspeicher (bis zu 700 bar)	18
2.3.1 Wasserstoff-Hochdruckspeicher Typ 1	19
2.3.2 Wasserstoff-Hochdruckspeicher Typ 2	19
2.3.3 Wasserstoff-Hochdruckspeicher Typ 3	19
2.3.4 Wasserstoff-Hochdruckspeicher Typ 4	19
2.3.5 Ausblick neue Hochdruckspeicher	20
2.4 Flüssigwasserstoffspeicher	20
2.5 CGH ₂ -Tankstellen	22
2.6 Stationäre Brennstoffzellen	23
3. Konformitätserklärungen	26
3.1 Vorgehensweise zur Erstellung einer Konformitätserklärung	26
3.2 Relevante Verordnungen und Richtlinien je Technologie	29
3.3 Integrierendes Schutzkonzept der Richtlinien und Verordnungen	32
3.4 Stand der Technik und Normenarten	32
3.5 Harmonisierte Normen	33
3.6 Produktnormen	37
3.6.1 Auswahl von Produktnormen am Beispiel von Elektrolyseanlagen	37
3.6.2 Produktnormen für Be-/Entladestellen (LKW-Trailer)	37
3.6.3 Produktnormen für betriebliche Gashochdruckspeicher	38
3.6.4 Produktnormen für Flüssigwasserstoffspeicher	38

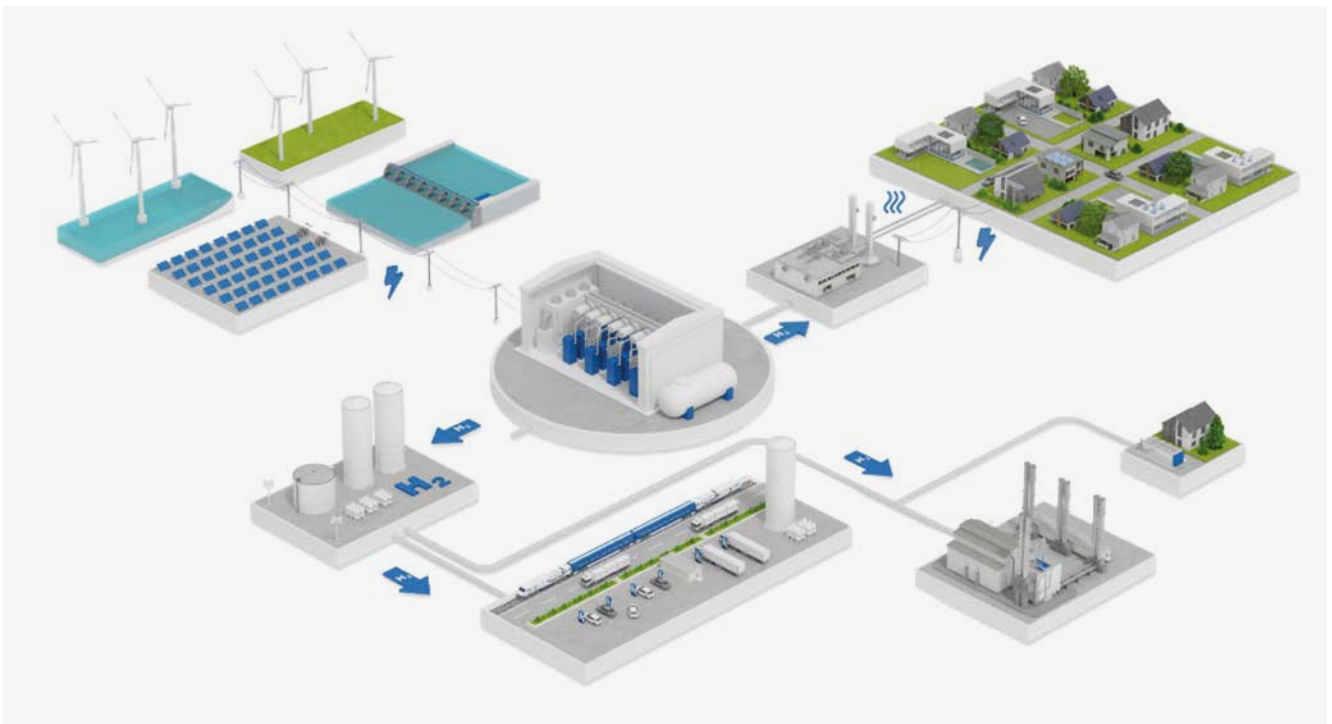
3.6.5	Produktnormen für Wasserstoff-Füllanlagen	39
3.6.6	Produktnormen für Verdichter	40
3.6.7	Produktnormen für stationäre Brennstoffzellen	40
3.6.8	Schlussfolgerung aus Richtlinien, Verordnungen und harmonisierten Normen	41
3.7	Besonderheiten für Inverkehrbringung im Geltungsbereich des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG)	42
3.8	Anstehende und erwartbare Änderungen zu den Inhalten des 3. Kapitels	43
4.	Aussprache der Konformität	45
5.	Gesamtkonformität	46
6.	Kriterien für den Betrieb einer Anlage	48
6.1	Betriebliche Nutzung von H ₂ -Anlagen	48
6.2	Private Nutzung von Wasserstoffanlagen	50
7.	Zusammenfassung	52
 Literaturverzeichnis		 54
Anhang		56
Abbildungsverzeichnis		60
Tabellenverzeichnis		60
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis		61
Impressum		62

1. Einleitung

Die Erzeugung und Anwendung von grünem Wasserstoff (H_2) zur Reduktion von Kohlenstoffdioxid(CO_2)-Emissionen und zur Erreichung von Klimaschutzziele gewinnt sowohl weltweit als auch in Deutschland zunehmend an Bedeutung. Die Bundesregierung hat im Jahr 2020 eine nationale Wasserstoffstrategie erarbeitet und veröffentlicht, um einen nationalen Markt für die Produktion und Nutzung von Wasserstoff bis 2030 zu entwickeln. Damit soll der Transfer von grauem Wasserstoff (aus Erdgas mittels Dampfreformierung) hin zu grünem Wasserstoff (mittels Wasserelektrolyse und Grünstrom) realisiert werden. Bis zum Jahre 2030 soll sich der Wasserstoffverbrauch in Deutschland verdoppeln, was sowohl den Neubau von Elektrolyseanlagen als auch die Weiterentwicklung von Wasserstofftechnologien voraussetzt.

Die Wertschöpfungskette des Wasserstoffs deckt dabei die Erzeugung, die Speicherung und den Transport sowie die unterschiedlichen Anwendungs- beziehungsweise Verbrauchsgebiete ab, wie in Abbildung 1 dargestellt. Dabei existiert für die unterschiedlichen Segmente eine große Bandbreite an verschiedenen Technologien.

Die unterschiedlichen Wasserstofftechnologien werden bereits seit Jahrzehnten entwickelt und betrieben. Allerdings fristete die Technologie bisher ein Nischendasein und die Anlagen dienten überwiegend als technische Demonstrationsprojekte. Deshalb ist aktuell bei keiner der eingesetzten Technologien ein hoher technologischer Reifegrad vorhanden und es fehlt vielen der an Bau und Betrieb beteiligten Parteien an Erfahrung.



Quelle: TÜV SÜD

Abbildung 1: Überblick der Wasserstoff-Wertschöpfungskette von der Herstellung bis zum Verbrauch

Genehmigungsbehörden sind während der Phasen von Planung, Bau und Inbetriebnahme beteiligt. Aufgrund der geringen Anzahl in Betrieb befindlicher Anlagen existieren bisher aber keine Erfahrungswerte, auf die zurückgegriffen werden kann. Ein Teil von Genehmigungsverfahren ist die Bewertung der CE-Konformitätserklärung(en) der Anlage durch die Genehmigungsbehörde.

Ziel dieses Leitfadens ist es, für Genehmigungsbehörden eine Hilfestellung bei der Bewertung von vorliegenden CE-Konformitätserklärungen bezüglich Vollständigkeit, Inhalt und Umfang zu bieten. Dabei sollen alle gängigen stationären Wasserstofftechnologien abgedeckt werden.

Dieser Leitfaden gliedert sich daher wie folgt.

- Kapitel 2: In diesem Kapitel wird ein Überblick über die gängigen stationären Wasserstofftechnologien, ihren Aufbau sowie wichtige Komponenten und sicherheitsrelevante Eigenschaften gegeben.
- Kapitel 3: In diesem Kapitel wird der Inhalt der jeweiligen Konformitätserklärungen beschrieben, inklusive einer Identifikation relevanter Verordnungen, Richtlinien und Produktnormen.
- Kapitel 4: Dieses Kapitel beschreibt, welche Partei für die Erstellung einer Konformitätserklärung verantwortlich ist.
- Kapitel 5: In diesem Kapitel wird die Thematik der Gesamtkonformität behandelt.
- Kapitel 6: Aus den Vorgaben zum sicheren Betrieb einer Anlage ergeben sich auch Anforderungen an das Design einer Anlage. Der Einfluss auf die Konformitätsbewertung wird in diesem Kapitel beschrieben.

2. Gängige stationäre Wasserstofftechnologien

Im Folgenden werden die gängigen stationären Wasserstofftechnologien aufgelistet und beschrieben. Als „gängig“ werden dabei Technologien angesehen, die:

- einen hohen Anteil an Anlagen im Betrieb oder in der Planung aufweisen
- und bei denen davon auszugehen ist, dass sie zukünftig den größten Anteil bei Genehmigungsverfahren ausmachen werden.

Dabei wird entlang der Wertschöpfungskette zwischen der Produktion von Wasserstoff mittels des Prinzips der Elektrolyse, dem Transport und der Lagerung, beispielsweise in LKW-Trailern oder Tanks, der Verteilung sowie der Bereitstellung in Wasserstofftankstellen und dem Verbrauch in stationären Brennstoffzellen unterschieden. Folgende Technologien werden behandelt.

Wertschöpfungskette	Technologie
Produktion	Alkali- und PEM-Elektrolyseure
Transport und Lagerung	LKW-Trailer (Be-/Entladestelle)
	Betriebliche Gashochdruckspeicher
	Flüssigwasserstoffspeicher (LH ₂)
Verteilung und Verbrauch	Tankstellen für komprimierten gasförmigen Wasserstoff (CGH ₂), 350 und 700 bar
	Stationäre Brennstoffzellen

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 1: Auswahl behandelter Wasserstofftechnologien

2.1 Produktion: Herstellung von Wasserstoff in Elektrolyseanlagen

2.1.1 Allgemeines und Begriffsdefinition

Begrifflichkeiten wie „Elektrolyse“, „Elektrolyseur“, „Elektrolyseanlage“ und weitere werden in diesem Leitfaden zur Beschreibung unterschiedlicher Anlagenumfänge herangezogen und nachfolgend erläutert.

Hinweis: Elektrolyseanlagen können für den Bereich zwischen atmosphärischem Druck und 50 bar ausgelegt werden. Interne elektrische Spannungen reichen bis zu 1.500 V. Die Schwellenwerte sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Zur Einordnung in den europäischen Rechtsrahmen mit den jeweils geltenden Richtlinien wird auf Tabelle 3 verwiesen.

Die in der nachfolgenden Aufzählung sowie Erläuterung verwendeten Termini werden in den folgenden Detaillierungsebenen innerhalb des Berichts aufgegriffen und stetig weiterverfolgt. Im Wesentlichen wird der Aufbau einer Elektrolyseanlage in vier Abschnitte unterschieden:

- die Wasseraufbereitung
- die Kernelektrolyse
- die Wasserstoffaufbereitung
- die Leistungselektronik

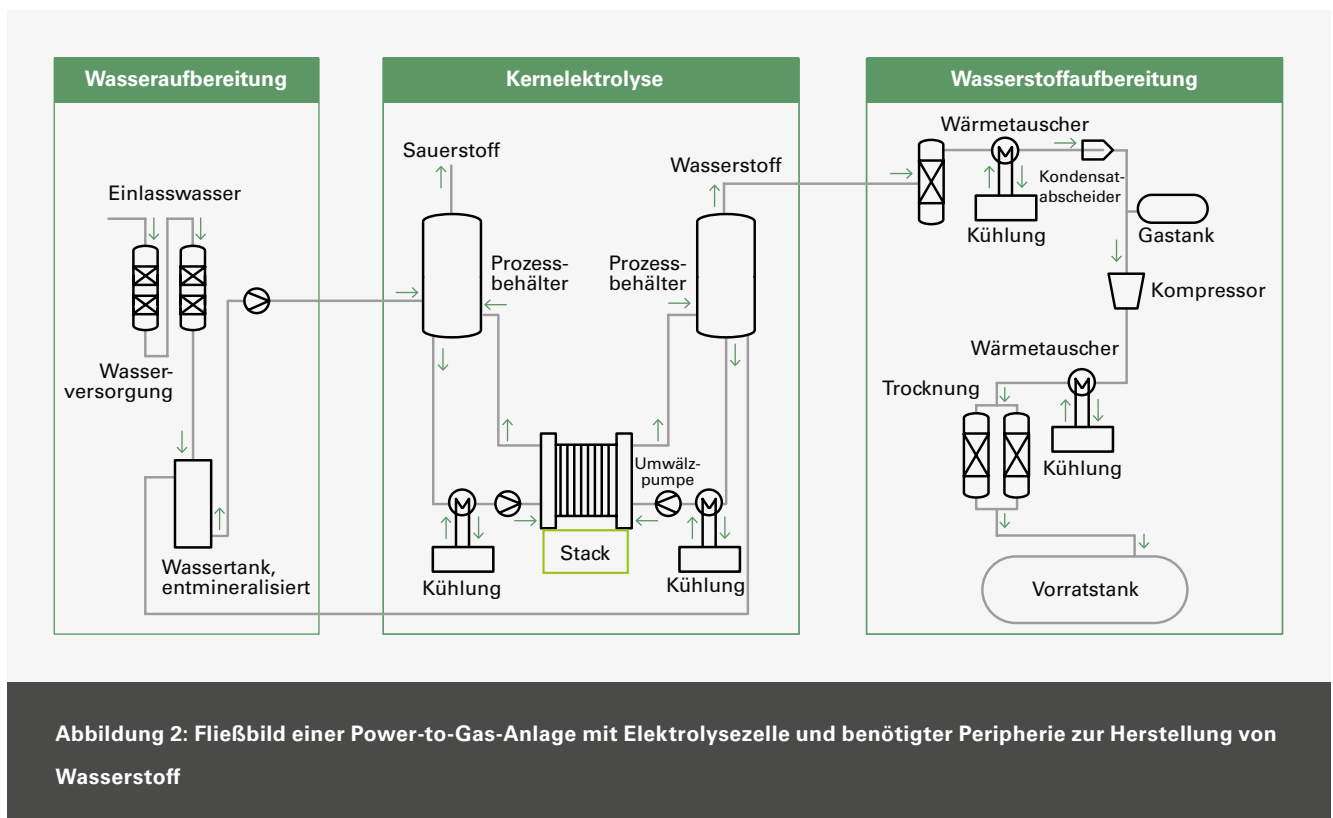


Abbildung 2: Fließbild einer Power-to-Gas-Anlage mit Elektrolysezelle und benötigter Peripherie zur Herstellung von Wasserstoff

Statt der prozessbeschreibenden Formulierung „Elektrolyse“ wird zur besseren Abgrenzung von den anderen Begrifflichkeiten für das elektrochemische Herz der Anlage der Begriff der „Kernelektrolyse“ festgelegt. Die Kernelektrolyse enthält den „Stack“, der die verfahrenstechnische Integration von mehreren, zuweilen Hunderten elektrochemisch zusammenwirkenden (Einzel-)Zellen darstellt.

Das Grundprinzip der verschiedenen Elektrolyseprozesse ist stets identisch: In einer elektrochemischen Zelle wird aufbereitetes Wasser (-> Wasseraufbereitung) unter Aufbringung eines elektrischen Potentials an Katalysatoren gespalten. Ionen wandern über einen selektiven Elektrolyten und rekombinieren auf der anderen Seite der ionenleitenden Trennschicht. Auf der Kathodenseite entsteht molekularer Wasserstoff, auf der Anodenseite molekularer Sauerstoff, zunächst prozessbedingt als „Wasserstoff-Rohgas“.

Die Aufbereitung des Rohgases erfolgt im Sektor „Wasserstoffaufbereitung“, die individuell und gemäß den spezifischen Anforderungen der Applikation beziehungsweise Übergabestelle erfolgen muss. Die marktüblichsten Technologien zur Wasserstoff-Rohgaserzeugung sind die „Alkali-Elektrolyse“ (AEL) und die „Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse“ (PEM), die nachfolgend – beginnend mit der Prozessbeschreibung auf Zellebene und bis hin zur Integrationsebene in „Elektrolyseanlagen“ – detailliert beschrieben werden. Auf die vertiefte Beschreibung weiterer Technologien wie „Hochtemperatur-Elektrolyse“ (SOEL) und „Alkalische Membran-Elektrolyse“ (AEM) wird im Rahmen dieses Berichts verzichtet und stattdessen auf die einschlägige Literatur verwiesen, unter anderem in entstehenden Blättern der VDI-Reihe PtX (VDI 4635) [1–2].

2.1.2 Alkali-Elektrolyse (AEL) – elektrochemische Zelle

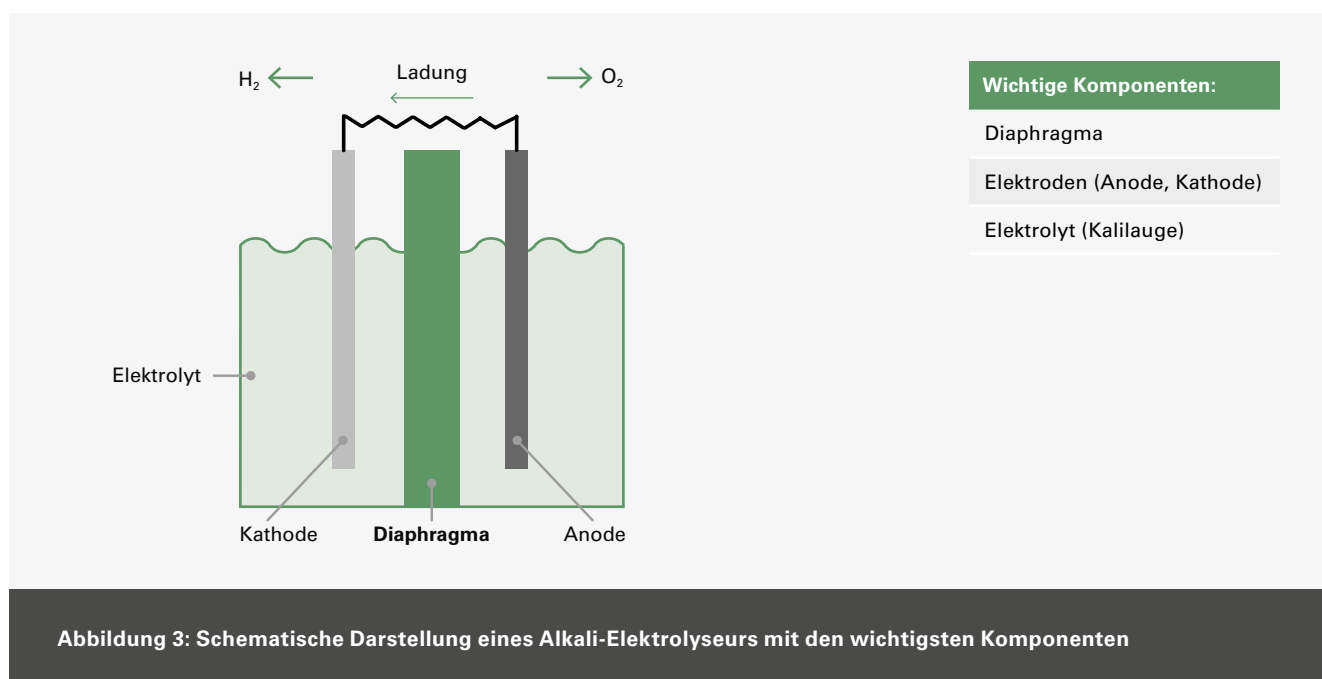
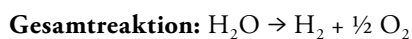
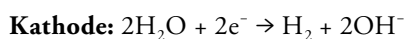
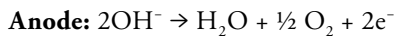


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Alkali-Elektrolyseurs mit den wichtigsten Komponenten

Die Alkali-Elektrolyse stellt eines der klassischen Elektrolyseverfahren dar und wird bei Temperaturen von etwa 40 °C bis 90 °C und Drücken zwischen 1 bar und 30 bar betrieben. Sie ist ein gut erforschtes und etabliertes Verfahren zur industriellen Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff. Als Elektrolyt kommt eine 20- bis 40-prozentige Kaliumhydroxidlösung (Kalilauge – KOH) zum Einsatz, die die zur Elektrolyse notwendigen leitfähigen OH-Ionen zur Verfügung stellt. Die stark basische Umgebung induziert besondere Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit der eingesetzten Werkstoffe. Als Elektroden kommen meist nickelbasierte Metalle zum Einsatz, die durch ein Diaphragma (trennendes, aber elektrolytisch leitendes Element) getrennt sind. Das Diaphragma ist für die OH-Ionen durchlässig, sodass diese für den Ladungsaustausch zur Anode wandern können. Gleichzeitig besteht die Anforderung, gegenüber den Gasphasen H₂ auf der Kathodenseite und Sauerstoff (O₂) auf der Anodenseite möglichst undurchlässig zu sein. Aufgrund der Löslichkeit der Gase in Wasser kann ein Crossover jedoch nicht unterbunden, sondern nur auf ein verträgliches Maß reduziert werden. Die Konzentration muss in jedem Fall verlässlich unterhalb der jeweiligen Zündgrenzen von 4 Vol.-% H₂ in O₂ und 6 Vol.-% O₂ in H₂ liegen, wobei die Vermischung von Wasserstoff und Sauerstoff auch aufgrund der Verschlechterung der Produktqualitäten unerwünscht ist.

In der Elektrolyse entstehen an der Kathode durch die Aufspaltung des Wassers durch Elektronenaufnahme molekularer Wasserstoff und OH-Ionen, die schließlich zur Anode wandern. Dort reagieren sie unter Elektronenabgabe zu Sauerstoff und Wasser. Ein anteiliges Wandern von Wassermolekülen sowie des Kaliumbestandteils kann dabei nicht vollständig unterbunden werden [3].



Vorteile

Die spezifischen Investitionskosten sind gering und der technologische Reifegrad ist im Vergleich zu anderen Elektrolysetechnologien fortgeschritten. Ebenso können mehrere Zellen parallelgeschaltet werden, um die Leistung modular anzupassen. Somit ist die AEL derzeit die weltweit am meisten angewandte Technologie innerhalb der Wasserelektrolyse. Sie weist eine hohe Langzeitstabilität auf und benötigt keine seltenen Erden, das heißt in ihrer Verfügbarkeit und Kostenstruktur kritische Rohstoffe. Die Anforderungen an die Wasserreinheit für einen spezifikationsgemäßen Betrieb liegen für die elektrische Leitfähigkeit σ üblicherweise im Bereich 1 bis 10 $\mu\text{S}/\text{m}$, die Anforderungen sind somit tendenziell geringer als bei konkurrierenden Verfahren der Wasserelektrolyse.

Nachteile

Zur Vermeidung von Differenzdrücken über das Diaphragma werden hohe Designanforderungen an dieses gestellt. Ohne weitere Maßnahmen würde dies die strukturelle Integrität infrage stellen und durch das erhöhte Druckpotenzial die unkontrollierte Mischung von Wasserstoff und Sauerstoff ermöglichen. Es muss sichergestellt werden, dass kein CO₂ in den Elektrolyseur gelangt, da dieses ansonsten mit Kalilauge zu Kaliumcarbonat (K₂CO₃) reagiert und ausfällt.

Der von AEL-Elektrolysezellen produzierte Wasserstoff ist mit Kaliumrückständen verunreinigt. Es bedarf üblicherweise einer Nachreinigung des produzierten Wasserstoffs, ebenso einer Nachführung von KOH in das Prozesswasser. Prozessbedingt ist der in der Zelle produzierte Wasserstoff mit Wasser gesättigt, aufgrund der häufig niedrigen Prozessdrücke ist der absolute Wasseranteil folglich recht hoch – somit ist ergänzend eine Trocknung zum Erreichen der erforderlichen Produktreinheiten erforderlich.

Dieser Nachteil der AEL weitet sich in Kombination mit fluktuierenden Betriebsführungen, zum Beispiel bedingt durch die Fluktuation erneuerbarer Energien und insbesondere im Teillastbetrieb, aus. Neben der Verlässlichkeit der Produktqualität ist auch das Sicherheitskonzept von solchen Rahmenbedingungen tangiert. Der Transport der KOH-Lösung in den erforderlichen Konzentrationen unterliegt dem Gefahrgutrecht, der Umgang damit im Betrieb erfordert geeignete Arbeitsschutzkonzepte.

Anders als bei Membranelektrolyseverfahren, zum Beispiel PEM, ist ein relevanter Differenzdruckbetrieb über das Diaphragma strukturell nicht sicher. Zur Verhinderung mechanischer Überlast bedarf es einer parallelisierten Druckführung auf Kathoden- und Anodenseite. Insbesondere im Rahmen von Abfahrprozessen werden mitunter aufgrund unterschiedlicher Diffusionsgeschwindigkeiten der Prozessgase Differenzdrücke ausgeprägt, die neben der Verhinderung der Aufkonzentrierung der jeweiligen Reaktionspartner auf der Gegenseite eine weitere prozesskontrolltechnische Aufgabenstellung darstellen.

2.1.3 Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM) – elektrochemische Zelle

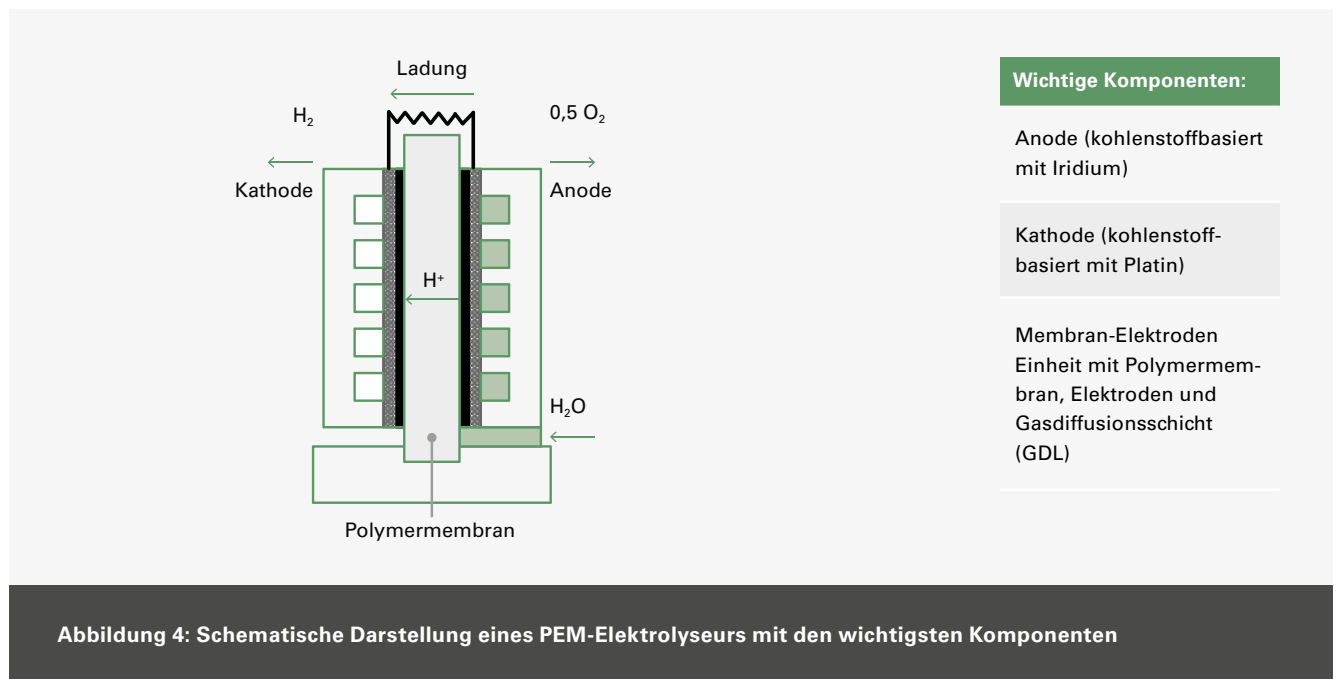
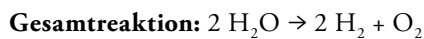
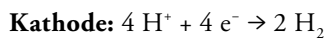
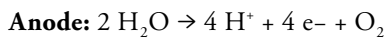


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines PEM-Elektrolyseurs mit den wichtigsten Komponenten

Die PEM-Elektrolyse hat sich auf dem Markt erst später als die AEL etabliert, wird heute jedoch ebenfalls im industriellen Maßstab in Größenordnungen im zweistelligen MW-Bereich eingesetzt. Parallelisiert sind auch bis mehrere Hundert MW möglich. Sie wird bei Temperaturen von 20°C bis 100 °C und Drücken bis zu 35 bar betrieben. Abhängig von der Auslegung sind hierbei sowohl Gleichdruck- als auch Differenzdruckkonzepte¹ möglich. Kernstück der PEM-Elektrolyse ist die Polymerelektrolyse-Membran, auf die Elektroden aufgebracht sind (Membran-Elektroden-Einheit – MEA). Die Elektroden sind kohlenstoffbasiert und tragen die Katalysatoren aus Platin-Gruppen-Metallen (PGM) (Kathode mit Platin, Anode mit Iridium). Die Polymerelektrolyse-Membran ist ebenfalls wie das Diaphragma bei der AEL durchlässig für ausgewählte Ionen, hier H⁺-Protonen. Im Vergleich zu anderen Polymeren besteht die Membran aus einem ionomerischen Thermoplast, in dem Ionenbindungen wirksam werden. Ebenso verhindert die Membran weitestgehend den Transfer und somit die Vermischung von H₂ und O₂. Das Design der Membran zielt auf die Leitfähigkeit gegenüber H⁺-Ionen. Obwohl die Reaktionsgleichung



aufgrund der Protonenleitung keinen unmittelbaren Wassertransfer auf die Kathodenseite induziert, so findet doch ein Transfer von Wassermolekülen von der Anodenseite auf die Kathodenseite, das heißt über die Membran statt. Anodenseitig sind technologieabhängig sowohl wässrige als auch trockene Verfahren möglich.

Vorteile

Die von der PEM-Elektrolyse sowohl im Teillast- als auch im Überlastbetrieb erreichten Gasreinheiten stellen den Benchmark unter den Elektrolyseverfahren dar, bei trockener PEM-Elektrolyse werden Gasreinheiten von bis zu 99,999% (Wasserstoff 5.0) erreicht. Es werden im Technologievergleich die höchsten spezifischen Stromdichten erzielt, die Bauweise wird somit kompakter. Aufgrund der einfachen Peripherie ist diese Technologie dynamisch und für die Kopplung mit fluktuierenden Stromquellen gut geeignet. Es sind große Laständerungsgeschwindigkeiten und geringe Anfahrzeiten möglich.

Nachteile

Die PEM-Elektrolyse findet in einem hochsauren Milieu statt (pH-Wert ~2). Dies reduziert die Auswahl an geeigneten Materialien im Allgemeinen und im Speziellen der Katalysatoren erheblich, und zwar auf Edelmetalle der PGM-Gruppe, da diese gegenüber dem Korrosionsangriff widerstandsfähig sind. Auch sind die werkstoffspezifischen Anforderungen an die Bipolarplatten, die die Einzelzellen einrahmen und deren fluidtechnische Versorgung über integrierte Strömungsprofile ermöglichen, aufgrund des sauren Milieus anspruchsvoll. Der Austausch der titanbasierten Bipolarplatten durch säureresistente Beschichtungen, zum Beispiel per Coating von Stahlwerkstoffen, befindet sich aus Kostengründen im Markthochlauf.

¹ Das in das Differenzdruckverfahren integrierte Prinzip der elektrochemischen Verdichtung über Polymerelektrolyse-Membranen ist derzeit auch Gegenstand von Forschung und Entwicklung für von der Elektrolyse unabhängige Prozesse.

Die Anode ist mit Iridium beschichtet. Iridium ist eines der seltensten Elemente der Erdkruste, was sich in den Herstellungs- und Beschaffungskosten widerspiegelt, die weltweiten Minenkapazitäten sind begrenzt. Die Beschaffung ist aufwendig und die verlässliche Sicherstellung von Marktkapazitäten und Lieferketten vor allem für Großanlagen ist mit vielfachen Risiken behaftet. Verfügbarkeitsrisiken beziehen sich zwar insbesondere auf die PGM-Materialien, jedoch ist derzeit auch die Anzahl der Hersteller mit performanten und in passender Geometrie produzierten Membranen übersichtlich. Daher wird seit Jahren an alternativen Katalysatoren für die Anode geforscht, ebenso wird weltweit, in Deutschland zum Beispiel innerhalb von H₂Giga, die Skalierung von Produktionsprozessen adressiert.

2.1.4 Kernelektrolyse

In der Kernelektrolyse (mittleres Segment in Abbildung 2) findet sich als zentrales Element die Elektrolyse-Stack-Anordnung. Die integral verfügbare Fläche der elektrochemischen Zellen bestimmt weitestgehend die Produktionskapazität einer Einheit. Da die H₂-Produktion unmittelbar proportional zu den Stromdichten ist, wird über die Kapazität auch der Strombedarf definiert – bei mit zunehmender Lebensdauer kontinuierlich zunehmenden inneren ohmschen und ionischen Widerständen. Direkt proportional hierzu nehmen die effektiv erforderlichen Zellspannungen zu. Bei gleicher Stromdichte wachsen folglich auch die thermischen Verluste. Die Auslegung des Kühlkonzepts muss sich folglich auf das Lebenszeitende beziehen – mit den dann erwartbaren größtmöglichen Verlustleistungen. Das Wärmemanagement erfolgt üblicherweise in den Rezirkulationskreisläufen.

Die Einzelelektrolysezellen werden im Stack fluidtechnisch und elektrisch parallel geschaltet, Sammelleitungen führen die Medien zu und ab.

Für die Wasserzuführung (PEM: kathodenseitig; AEL: anodenseitig) ist eine Rezirkulation des zugeführten Prozesswassers erforderlich, um eine Mangelversorgung am Fluidaustritt aus den parallel geschalteten Zellen zu verhindern. Um größtmögliche Effizienz zu implementieren, jedoch auch, um Überhitzung und der Bildung von Micro-Channels vorzubeugen, besteht die Anforderung, dass die katalytisch wirksamen Oberflächen stets ausreichend mit Wasser versorgt sind.

Gemäß der Reaktionsgleichung in AEL-Zellen entstehen auf der Anodenseite neben einem Teil Sauerstoff auch zwei Teile Wasser, das heißt weit über die Sättigungsgrenze von O₂ hinaus. In der Folge existiert auch auf der Anodenseite eine Wasserrezirkulation. Auf beiden Seiten des Diaphragmas tritt somit ein Zweiphasengemisch aus Wasser und gesättigten Produktgasen H₂sat und O₂sat aus. Es erfolgt eine Gas-Flüssig-Separation, um das Rohgas der Wasserstoffaufbereitung zuführen zu können.

Die stetige Zuführung von Wasser auf die Anodenseite erfordert die kontinuierliche Ausleitung von überschüssigem Produktwasser. Die ressourcenoptimierte Prozessführung sieht die Rückführung des überschüssigen Wassers in die Wasseraufbereitung vor. Ein Kurzschluss der separierten Gasphasen über die Rückführleitung muss durch die Sicherstellung ausreichender Wasservorlagen in den Gas-Flüssig-Separatoren im Sinne des vorbeugenden, also des primären Explosionsschutzes ausgeschlossen werden. Die Löslichkeiten der Produktgase im rückgeführten Wasser müssen daher innerhalb der Sicherheitskon-

zepte berücksichtigt werden. Auch in PEM-Elektrolyse-Konfigurationen kann anodenseitig eine Wasserrezirkulation samt Phasentrennung erforderlich sein. Jedoch sind hier aufgrund der angeführten Reaktionsgleichung geringere Wasserüberträge erwartbar.

2.1.5 Elektrolyseanlage

Die Anforderungen und Spezifikationen an die jeweilige Peripherie hängen von den Randbedingungen der vorgesehenen und vorhersehbaren Applikation ab. Das als Edukt der Kernelektrolyse zugeführte Wasser muss stets und beständig die für den sicheren und dauerhaften Betrieb der Kernelektrolyse erforderliche Qualität aufweisen.

Wasseraufbereitung

Die vorgeschaltete Wasseraufbereitung muss ihrerseits auf die Bandbreite der erlaubten Qualitäten und Eigenschaften des ihr zugeführten Edukts vorbereitet sein. Diese Vorbereitung fokussiert sich im Wesentlichen auf die Qualitäten, die Zusammensetzung und thermodynamischen Eigenschaften, wie Druck und Temperatur der zur Verfügung gestellten Rohwasserversorgung. Die Wasseraufbereitung der Elektrolyseanlage stellt das linke Segment in Abbildung 2 dar.

Elektrische Versorgung

Ergänzend folgt die Qualität des Produkts „Wasserstoffgas“ ebenso wie auch die Sicherheit und Verlässlichkeit des Prozesses den Charakteristiken der elektrischen Energieversorgung. Für den Betrieb der Kernelektrolyse ist Gleichstrom erforderlich, der entweder direkt bereitgestellt werden muss oder über Gleichrichtung dem Elektrolyseprozess zur Verfügung gestellt wird. Auf Gleichstromebene sind auf dem Abstraktionsniveau der Kernelektrolyse Spannungsniveaus üblich, die den Grenzen der Niederspannungsrichtlinie genügen ($UDC \leq 1.500 \text{ V}$). Durch die Parallelisierung vieler Kernelektrolysen ist ein Anschluss der Elektrolyseanlagen an das Mittelspannungsnetz mit Wechselstromversorgungsspannungen von $\leq 220 \text{ kV}$ üblich. Für die in Aussicht gestellten Elektrolyseanlagen im Leistungsbereich von mehreren Hundert MW bis GW kann auch ein Anschluss an das Hochspannungsnetz erforderlich werden.

Durch die Charakteristik der Gleichrichter werden Störungen in das Versorgungsnetz eingetragen. Gleichzeitig ist auch die Qualität der Gleichrichtung abhängig von etwaigen Störgrößen im Versorgungsnetz. Die elektrische Versorgung muss somit einerseits den Netzanschlusskriterien eines etwaigen Versorgungsnetzbetreibers genügen. Andererseits müssen die Komponenten der Elektrolyseanlage inklusive der Kernelektrolyse auf die erlaubten Bandbreiten der Charakteristik der Versorgung mit elektrischer Energie vorbereitet sein. Dies gilt insbesondere auch für diejenigen Elektrolyseanlagen, die für den Betrieb in Inselnetzen vorgesehen sind, ohne die unmittelbare Wirkung der Netzstabilisierung im öffentlichen elektrischen Netz.

Wasserstoffaufbereitung

In Abhängigkeit von der Qualität des von der Kernelektrolyse bereitgestellten Rohgases sowie den Anforderungen an das Endprodukt bedarf es einer verfahrenstechnischen Aufbereitung des Wasserstoffgases.

Die Umsetzung von Umfang und Reihenfolge durchzuführender Aufbereitungsschritte ist folglich als typische Aufgabenstellung an den Anlagenbau zu verstehen, in dem unterschiedliche Konzepte in einem Technologie- und Kostenwettbewerb zueinander stehen. Sämtliche Prozessverfahren müssen hierbei für die wesentlichen Gefahren der Wasserstofftechnologie wie

- Druckgefahren
- Explosionsgefahren
- Gefahren durch Werkstoffeigenschaften
- gegebenenfalls elektrische Gefahren

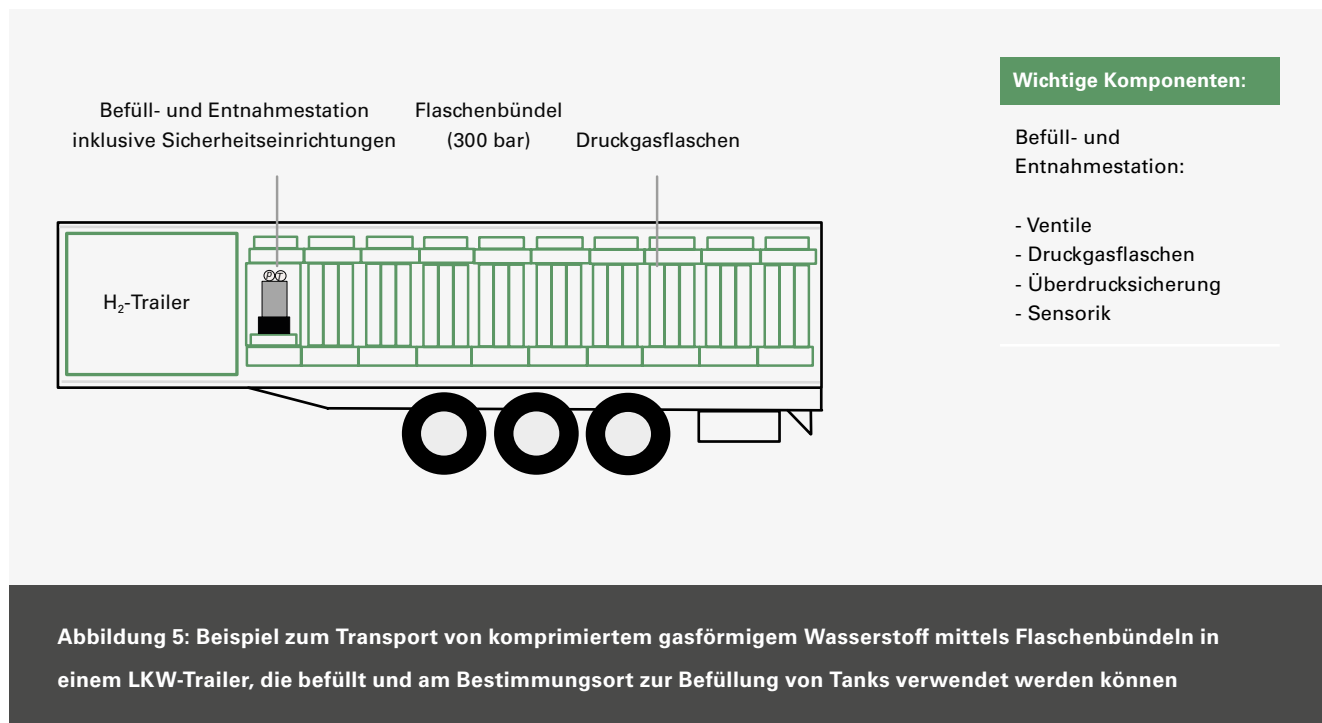
vorbereitet und mit entsprechenden Nachweisen in Verkehr gebracht sein.

Typische Verfahrensschritte sind nachfolgend aufgeführt, können jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder generell einzuhaltende Mindestanforderung implizieren:

- Gasabscheidung
 - Mehrphasenseparation
 - Kondensation
 - H₂-Desoxidation
 - O₂-Dehydrogenisierung
- Trocknung
 - Druckwechseladsorption
 - Molekularsiebe
- Kondensation
 - Wasserabscheidung
 - Kühlung
- Filterung
 - Partikelfilter
 - Chemikalienfilter
 - Ionenträgerabscheidung
- Verdichtung
 - Mechanische Verdichtung
 - Elektrochemische Verdichtung
- Speicherung und Pufferung

Bei der Konzeptionierung der Anlagenkonzepte sind stets auch Rückwirkungen zu berücksichtigen, die sich aus der Sequenz etwaiger Aufbereitungsschritte ergeben. So ist beispielsweise in der mechanischen Verdichtung die Kontrolle des Wasseranteils von Bedeutung, um Wasserschlag durch auskondensierendes Wasser während der Druckerhöhung zu unterbinden.

2.2 LKW-Trailer



Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an: Schlussbericht Machbarkeitsstudie Pilotprojekt Einsatz von H₂-Triebwagen in Thüringen (thuringen.de)

LKW-Trailer finden Anwendung im Transport von Wasserstoff. Dabei kann dieser sowohl komprimiert gasförmig als auch in flüssiger Form transportiert werden [4].

Hinweis: Bezüglich der für diese Technologie geltenden Richtlinien und Verordnungen wird auf Tabelle 3 mit den dazugehörigen Schwellenwerten für ausgewählte Richtlinien und Verordnungen in Tabelle 11 verwiesen.

CGH₂-Trailer bestehen aus einem Zusammenschluss von mehreren Druckgasflaschen, die auf der Ladefläche angeordnet und mittels Hochdruckleitungen miteinander verbunden sind. Beispielsweise kann mit einem Gasflaschenbündel aus 60 aufrecht stehenden Druckgasflaschen ein Volumen von 500 m³ bei einem Druck von 200 bar transportiert und verteilt werden. Neben der Verwendung mehrerer Druckgasflaschen ist ebenfalls die Lagerung in größeren, mehrere Meter langen liegenden Hochdruckspeichern möglich. Dabei kann die Speicherkapazität auf bis zu 500 kg bei einem Druck von 300 bar erhöht werden. Die hohe Dichte der massiven Druckgasflaschen und der Hochdruckspeicher führen zu einem hohen Gesamtgewicht des CGH₂-Trailers. Die Masse des transportierten Wasserstoffs macht hierbei nur einen Bruchteil aus. Die niedrige volumetrische Energiedichte limitiert somit den Transport von CGH₂ in großen Mengen.

Ein CGH₂-Trailer wird vor dem Transport mit Wasserstoff befüllt. Wasserstoff aus einer Produktionsanlage wird in einem Niederdruckspeicher (ungefähr 30 bar) vorgehalten. Eine Füllanlage entnimmt Wasserstoff aus dem Niederdruckspeicher und komprimiert diesen in einem Kompressor (ungefähr 200 bar bis 300 bar), bevor er in den CGH₂-Trailer gefüllt wird. Nach dem Transport wird der komprimierte Wasserstoff am Bestimmungsort (Wasserstofftank bei Kunden oder Wasserstoff-tankstellen) umgefüllt. Dies wird über druckdichte Verbindungen und Leitungen realisiert, um ein unkontrolliertes Ausströmen des Wasserstoffs in die Umgebung zu vermeiden. Ist der Fülldruck des Tanks erreicht, wird der Umfüllvorgang gestoppt.

LH₂-Trailer transportieren den Wasserstoff in vakuumisolierten doppelwandigen Tanks bei tiefen Temperaturen von der Siedetemperatur von Wasserstoff oder unterhalb dieser (−253 °C bei atmosphärischem Druck). Die Erhöhung der Dichte von Gas zu Flüssigkeit ermöglicht den Transport von größeren Mengen an Wasserstoff. Ein LH₂-Trailer ist in der Lage, bis zu 50 m³ flüssigen Wasserstoff zu transportieren. Bei einem Gesamtgewicht des Trailers von 40 Tonnen kann mit bis zu 3.800 kg mehr als die sechsfache Menge an Wasserstoff transportiert werden. Trailer für flüssig-tiefkalte Gase sind technisch ausgereift und werden auch beispielsweise für den Transport von Flüssigstickstoff, Flüssighelium oder Flüssigsauerstoff verwendet. LH₂ wird zumeist bei Umgebungsdruck oder einem Überdruck von bis zu 12,5 bar gelagert und transportiert. Bei der Befüllung ist ebenfalls wie bei CGH₂ eine druckdichte Verbindung notwendig, sodass kein flüssiger Wasserstoff entweichen kann, was zu einer Abkühlung der Umgebung führen könnte. Daher müssen diese Befülleinrichtungen der Füllstation ebenfalls doppelwandig vakuumisoliert ausgeführt sein, um Vereisungen an den Bauteilen zu vermeiden und Erfrierungen von Körperteilen vorzubeugen. LH₂ wird anschließend mit dem Trailer beispielsweise zu Wasserstofftankstellen transportiert und dort in einen stationären LH₂-Tank umgefüllt. Dort gelten dieselben Sicherheitshinweise im Hinblick auf potenzielle Gefahren durch tiefkalte Flüssigkeiten.

2.3 Betriebliche Gashochdruckspeicher (bis zu 700 bar)

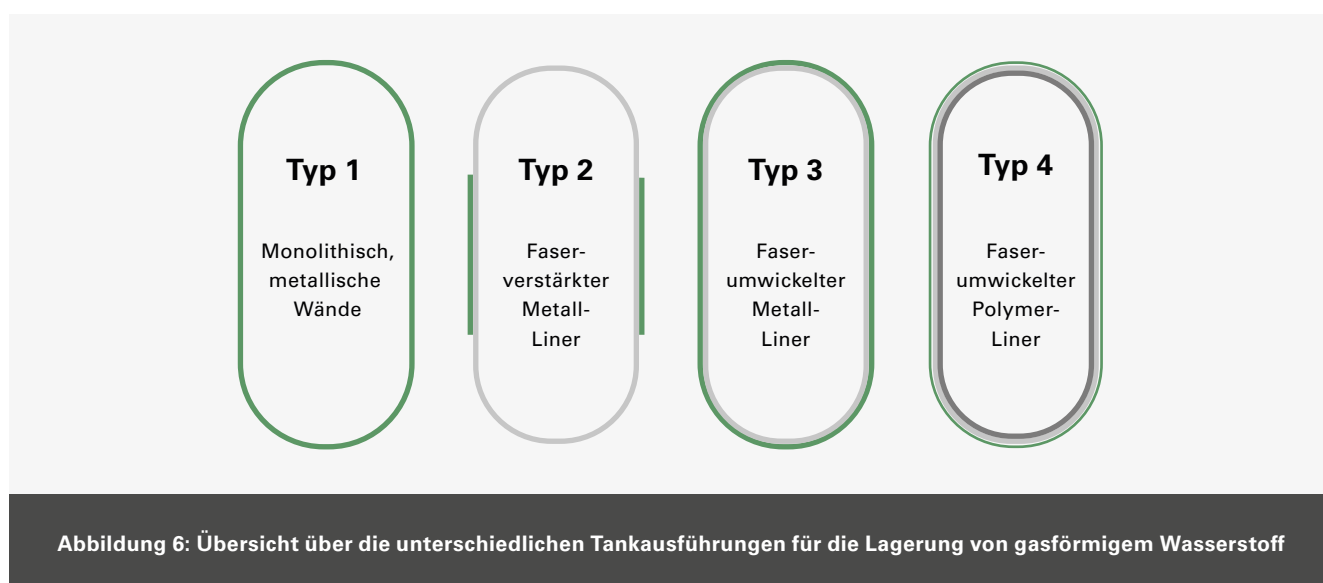


Abbildung 6: Übersicht über die unterschiedlichen Tankausführungen für die Lagerung von gasförmigem Wasserstoff

Hinweis: Bezüglich der für diese Technologie geltenden Richtlinien und Verordnungen wird auf Tabelle 3 mit den dazugehörigen Schwellenwerten für ausgewählte Richtlinien und Verordnungen in Tabelle 11 verwiesen.

Hochdruckspeicher finden sowohl in mobilen als auch in stationären Applikationen Anwendung. Sie dienen der Speicherung von gasförmigem Wasserstoff für Drücke zwischen 200 bar und 700 bar. Im Wesentlichen sind aktuell vier unterschiedliche Druckbehältertypen im Einsatz. Sowohl der Einsatz bei hohen Drücken als auch der Fertigungsprozess resultieren in einer einheitlichen zylindrischen Form der Hochdruckspeicher [5].

2.3.1 Wasserstoff-Hochdruckspeicher Typ 1

Der Hochdruckspeicher vom Typ 1 zeichnet sich durch eine rein metallische Ausführung aus, wie sie auch bei Druckbehältern für andere Fluide üblich ist. Typische Einsatzdrücke liegen bei 200 bar. Dieser Einsatzdruck ist industriell weit verbreitet (beispielsweise Gashochdruckflaschen für Wasserstoff, Stickstoff oder Kohlenstoffdioxid). Solche Gashochdruckflaschen werden sowohl zum Transport von Gasen (über die Straße) als auch für stationäre Anwendungen (Gasflaschenbündel) verwendet.

2.3.2 Wasserstoff-Hochdruckspeicher Typ 2

Im Vergleich zu Typ-1-Hochdruckspeichern sind Behälter vom Typ 2 zusätzlich mit einem Kompositwerkstoff umwickelt, bestehend aus glas- oder kohlefaserverstärkten Harzen. Diese Verstärkung wird im zylindrischen Teil des Hochdruckspeichers angebracht. Der Vorteil hierbei ist die Möglichkeit zur Verringerung der Wandstärke und ein daraus resultierender leichter Gewichtsvorteil. Der Betriebsdruck kann zudem von 200 bar auf 1.000 bar erhöht werden. Typ-2-Druckbehälter sind somit für stationäre Anwendungen vorzuziehen. Eine gängige Applikation stellt hierbei der Hochdruckspeicher bei Wasserstofftankstellen vor dem Betankungsvorgang dar.

2.3.3 Wasserstoff-Hochdruckspeicher Typ 3

Im Vergleich zu Typ-1- und Typ-2-Hochdruckspeichern besitzen Typ-3-Behälter einen Liner (metallische Innenschicht, meist aus Aluminium) und eine Verstärkung aus Kohlefasern, die den gesamten Liner umgibt. Die wesentliche Belastung wird dabei durch diese Verstärkung getragen. Typische Anwendungsdrücke liegen im mobilen Betrieb bei 350 bar für Schwerlastanwendungen, wie beispielsweise LKW, Busse und Schienenfahrzeuge, und 700 bar für PKW. Ebenso ist dieser Hochdruckspeicher auch für stationäre Anwendungen einsetzbar, jedoch mit höherem Materialaufwand im Vergleich zu Typ-1- und Typ-2-Behältern.

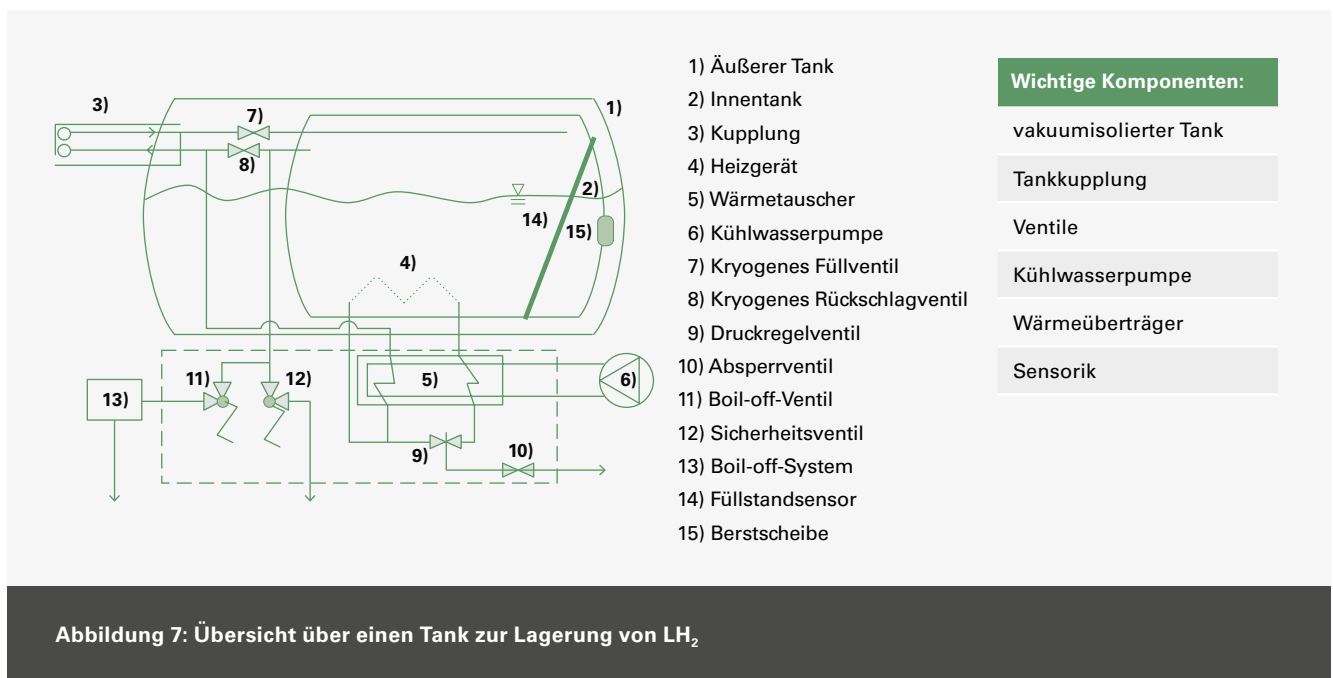
2.3.4 Wasserstoff-Hochdruckspeicher Typ 4

Der Typ-4-Druckbehälter ist die neuste Entwicklungsstufe in der Serienproduktion. Im Vergleich zu Typ 1 und Typ 2 (metallische Wand) sowie Typ 3 (Aluminiumliner) ist dieser Hochdruckspeicher mit einem Kunststoffliner versehen. Dieser wird im Wesentlichen aus hochverdichtetem Polyamid oder Polyethylen gefertigt. Der große Vorteil gegenüber den anderen drei Typen ist das geringere Gewicht aufgrund des Kunststoffliners. Daher wird dieser Hochdruckspeicher für Transportzwecke und im mobilen Bereich eingesetzt. Sein Nachteil ist die Anfälligkeit gegenüber Überhitzung während Befüllprozessen.

2.3.5 Ausblick neue Hochdruckspeicher

Neben den vier benannten Typen ist derzeit ein weiterer Behältertyp in Entwicklung (Typ 5), der gänzlich ohne Liner auskommt. Die faserverstärkte Struktur übernimmt neben der Umsetzung der mechanisch-strukturellen Integrität auch die Aufgabe der Minimierung der Permeation auf ein verträgliches, sicheres Maß.

2.4 Flüssigwasserstoffspeicher



Hinweis: Bezüglich der für diese Technologie geltenden Richtlinien und Verordnungen wird auf Tabelle 3 mit den dazugehörigen Schwellenwerten für ausgewählte Richtlinien und Verordnungen in Tabelle 11 verwiesen.

Im Vergleich zu Speichermethoden mit gasförmiger Komprimierung (Umgebungstemperatur, 350 bar bis 700 bar) bietet die flüssige Lagerung von Wasserstoff (-253 °C , 20 K, bis zu 12,5 bar) den Vorteil der Erhöhung der Speicherkapazität ($39,2\text{ kg/m}^3$ gasförmig bei 700 bar und 298 K und $71,2\text{ kg/m}^3$ bei 1 bar und 20 K). Ein Liter flüssiger Wasserstoff entspricht 750 Litern gasförmigen Wasserstoffs bei Umgebungsbedingungen. Somit führt diese Form der Lagerung zu einer Erhöhung der Energiedichte. Ein mobiler Flüssigwasserstofftank hat ein Fassungsvermögen von 120 Litern (8 kg) bei einem Druck von 5 bar und ermöglicht eine Reichweite von bis zu 300 km. Hohe Kosten und hohes Gewicht, gepaart mit Verdampfungsverlusten, führten zum vermehrten Einsatz des 700-bar-Gashochdruckspeichers im mobilen Bereich. Im stationären Bereich ist der Einsatz von Flüssigwasserstofftanks jedoch weiterhin von Interesse, beispielsweise für die Anwendung in Wasserstofftankstellen.

Ein Flüssigwasserstofftank besteht aus einem inneren und einem äußeren Behälter aus Edelstahl, zwischen denen eine Superisolation in Form eines Vakuums installiert ist (zur Verminderung des Wärmeeintrags durch Wärmeübertragung und Konvektion) [5]. Zusätzlich ist noch eine Isolierschicht, bestehend aus mehreren Schichten (Multi Layer Insulation – MLI), verbaut, um den Wärmeeintrag über Strahlungseffekte zu minimieren. Somit ist der flüssige Wasserstoff im Tank gegenüber Erwärmung weitestgehend abgeschirmt. Jedoch kann selbst solch eine aufwendige Isolierung den Wärmeeintrag nicht vollständig verhindern. Dieser gleichmäßige Wärmeeintrag führt zur kontinuierlichen Verdampfung eines Teils des flüssigen Wasserstoffs und resultiert entsprechend in einem Druckanstieg. Wird ein bestimmter Druck im Sicherheitsventil erreicht, löst dieses aus und entlässt Wasserstoff aus dem Tank. Dieser wird meist katalytisch zu Wasserdampf umgesetzt, um den Wasserstoff nicht unkontrolliert in die Umgebung zu entlassen. Die Standzeit eines solchen Tanks mit Flüssigwasserstoff ist somit limitiert. Daher ist die Anwendung von flüssigem Wasserstoff im Wesentlichen für große Volumina geeignet, bei denen der Erwärmungsvorgang deutlich länger dauert als bei geringeren Volumina.

Die Isolierung eines Flüssigwasserstofftanks dient nicht nur der Reduzierung des Wärmeeintrags, sondern auch zur Vorbeugung gegen direkten Kontakt mit durch flüssigen Wasserstoff gekühlten Komponenten, also beispielsweise der Vermeidung einer Verletzungsgefahr durch Erfrierungen. Ebenfalls geht von solchen Komponenten das Risiko des Ausfrierens der Luftfeuchtigkeit und der Anreicherung von Luftsauerstoff durch dessen Kondensation bei 90 K (erhöhte Brandgefahr) aus.

Nachteile solcher Flüssigwasserstofftanks sind die hohe Sensitivität gegenüber kleinsten Deformationen oder Beschädigungen (Risse und Beulen) und der hohe Anspruch an die geometrische Integrität und den Formfaktor schon während der Fertigung. Formänderungen oder Beschädigungen der Isolierung führen zu einer Erhöhung des Wärmeeintrags ins Tankinnere. Zum anderen kondensieren die Luftbestandteile, hierunter Sauerstoff und Stickstoff, an den kryogen-kalten Oberflächen (Verflüssigungstemperatur Sauerstoff -183 °C , Stickstoff -196 °C), wenn der Gasaustausch mit der Umgebungsluft auch über etwaige thermische Isolationsbarrieren hinweg nicht unterbunden ist. Eine Anreicherung von Sauerstoff über einen Volumenanteil von 23,5 % hinweg erhöht die Oxidationsneigung und gilt als brandbeschleunigend.

2.5 CGH₂-Tankstellen



Quelle: eigene Darstellung

Hinweis: Bezüglich der für diese Technologie geltenden Richtlinien und Verordnungen wird auf Tabelle 3 mit den dazugehörigen Schwellenwerten für ausgewählte Richtlinien und Verordnungen in Tabelle 11 verwiesen.

Allgemeines [6]

Die Wasserstofftankstelle besitzt wie eine konventionelle Tankstelle für fossile Brennstoffe einen zentralen Speichertank in Form eines Niederdruckspeichers. Der Druck in diesem Tank beträgt üblicherweise ungefähr 30 bar. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, den Niederdruckspeicher mit Wasserstoff zu befüllen. Dies kann klassischerweise durch die Belieferung mit einem Wasserstofftankwagen realisiert werden oder mittels Gasleitungen, die direkt mit einer Wasserstoffpipeline verbunden sind. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, einen flüssigen Wasserstoffspeicher auf dem Tankstellengelände zu installieren. Dieser wird dann mittels eines Flüssigwasserstoff-Tankwagens befüllt. Diese Methoden, wie auch der gasförmige Niederdruckspeicher, werden unter dem Begriff „trucked-in“ zusammengefasst. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass der Wasserstoff direkt vor Ort produziert wird, was als On-site-Produktion bezeichnet wird. Dazu zählen die Wasserelektrolyse und die Dampfreformierung. Um einen Betankungsvorgang starten zu können, muss genügend Wasserstoff im Hochdruckspeicher der Tankstelle vorhanden sein. Dazu komprimiert der Kompressor Wasserstoff aus dem Niederdruckspeicher auf 900 bar, anschließend wird dieser Wasserstoff im Hochdruckspeicher gelagert. Eine Vorkühlung ist im Wesentlichen nur für Betankungen bei einem Druck von 700 bar vorgesehen, um eine Überhitzung des fahrzeugseitigen Hochdrucktanks zu vermeiden. Für Betankungen mit einem Druck von 350 bar ist eine Vorkühlung nicht zwingend notwendig. Im Folgenden werden die beiden Druckstufen der Betankung unterschieden.

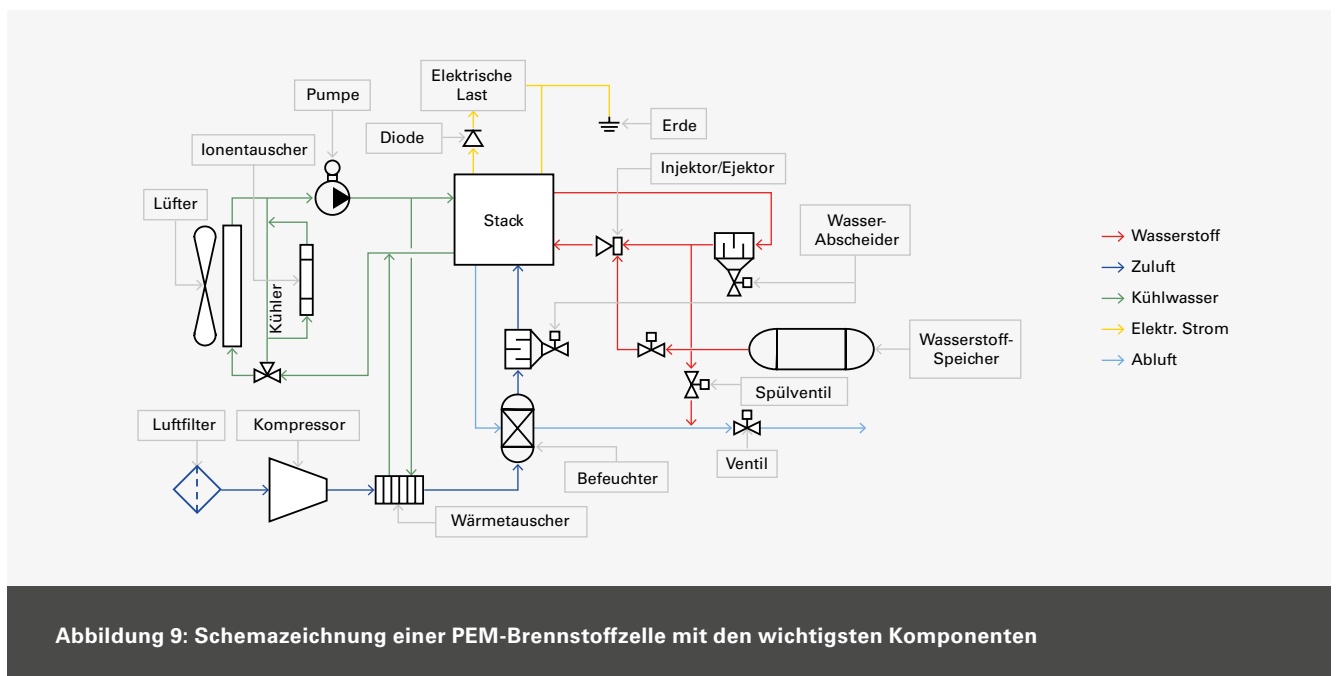
350-bar-Betankung für Schwerlastanwendungen

Die Druckstufe von 350 bar hat sich derzeit für auf dem Markt verfügbare großvolumige Behälter, wie beispielsweise für den Schwerlastverkehr, Busse und Wasserstoffzüge geeignet, sind derzeit üblicherweise auf einen Nenndruck von 350 bar ausgelegt und homologiert. Der Druck ist hierbei auf 350 bar limitiert, da die Realisierung höherer Drücke bei größeren Tankdimensionen mit hohem Aufwand verbunden ist. Die Querschnitte der Tankkupplungen sind mit 8 mm für kleine Massenströme (H35) und auch für hohe Massenströme (H35HF) dimensioniert. Ebenfalls sind bereits Querschnitte bis zu 12 mm verfügbar. Für diese gibt es aktuell noch keinen ISO-Standard, der diese großen Tankkupplungen abdeckt. Aktuell gibt es zudem Ausführungen mit höheren Tankdrücken von 700 bar für Schwerlastanwendungen als Prototypen.

700-bar-Betankung für PKW

Die Druckstufe von 700 bar bildet heute den Standard für die Betankung von PKW. Die im oberen Abschnitt beschriebenen Hochdruckspeicher kommen im mobilen Bereich in Brennstoffzellenfahrzeugen (Typ-4-Tank) zur Anwendung. Der Betankungsvorgang geschieht durch Überströmen, was durch Reibungseffekte und den negativen Joule-Thomson-Koeffizienten zu einer Aufwärmung des Tanks führen kann. Daher wird für diesen hohen Druck meist eine Vorkühlung installiert, um den Wasserstoffstrom vor dem Betankungsvorgang abzukühlen. Bei niedrigen Massenströmen kommen Leitungsquerschnitte zwischen 3 mm und 4 mm zum Einsatz, wohingegen bei hohen Massenströmen Querschnitte zwischen 8 mm und 10 mm Anwendung finden.

2.6 Stationäre Brennstoffzellen



Hinweis: Bezüglich der für diese Technologie geltenden Richtlinien und Verordnungen wird auf Tabelle 3 mit den dazugehörigen Schwellenwerten für ausgewählte Richtlinien und Verordnungen in Tabelle 11 verwiesen.

Stationäre Brennstoffzellen finden heute aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften der

- Lärmemissionsarmut (→ lärmsensitive Umgebungen),
- vernachlässigbaren Vibration (→ vibrationsensitive Umgebungen wie Krankenhäuser mit medizinischem Equipment, zum Beispiel Magnetresonanztomographie (MRT)),
- hohen Wirkungsgrade im Teillastbetrieb

zunehmend Anwendung, zunächst in Nischenapplikationen.

Aus Kosten- und Effektivitätsgründen werden häufig Derivate aus dem automobilen Kontext mit anlaufender großskaliger Serienproduktion bevorzugt. Dort kommen aus verschiedensten technischen Gründen mit Stand des Jahres 2023 ausschließlich PEM-Brennstoffzellen zum Einsatz.

Die saisonale Balancierung der Verfügbarkeit regenerativ erzeugter Energie wird zukünftig die Rückverstromung von Wasserstoff während Strom- oder auch Wärmemangelphasen forcieren. Während nämlich die Speicherung elektrischer Energie in Batteriespeichern vorteilhaft auf Zeiträume im Tages- und Wochenbereich beschränkt ist, kann die saisonale Speicherung in Form von Wasserstoff aus der elektrochemischen Wandlung von Wasser im Elektrolyseur erfolgen (siehe oben). Für die Rückverstromung kann neben der klassischen heißen Verbrennung in einem Verbrennungsmotor wie beispielsweise einem Blockheizkraftwerk (BHKW) oder einer Gasturbine auch die kalte Verbrennung mittels einer Brennstoffzelle erfolgen. In Abhängigkeit vom Lastprofil entscheiden die Stärken und Schwächen der einzelnen Technologien über die sinnhafte Anwendung. Für Brennstoffzellen ist der Betrieb in Teillast aufgrund der dann geringeren spezifischen Stromdichten und somit geringeren ohmschen und ionischen Verluste und ohne große Lastsprünge vorteilhaft, während sich die Vorteile der heißverbrennenden Technologien insbesondere im Vollastbetrieb ergeben – bei aufgrund des höheren Temperaturniveaus einfacherer Wärmeabfuhr.

Im Rahmen der nationalen Wasserstoffstrategie sollen konventionelle Energieträger sukzessive zu 100 % durch strombasierte saisonale Speicherung von Wasserstoff in Verbindung mit einem Elektrolyseur ersetzt werden, um im Sommer überschüssige Sonnenenergie in Wasserstoff umzuwandeln und diesen dann im Winter in Kombination mit der Brennstoffzelle zu nutzen. Ebenso können Brennstoffzellen auch im industriellen Maßstab eingesetzt werden, um Wasserstoff zu elektrischer Energie und Wärme zu wandeln, die dann in Wohnsiedlungen zur Verfügung stehen.

Das grundlegende Prinzip der Brennstoffzelle ist die Umkehrung der Elektrolyse [7]. Bei dieser wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. In der Brennstoffzelle reagieren Wasserstoff und Sauerstoff unter Erzeugung elektrischer Energie und Wärmeabgabe wieder zu Wasser. Wasserstoff wird dabei auf der Anodenseite in die Brennstoffzelle eingeleitet. Dort wird der Wasserstoff zu H^+ -Ionen reduziert, indem überschüssige Elektronen (e^-) abgegeben werden. Die zwischen den Elektroden befindliche Membran fungiert hierbei als Elektrolyt und ist für die H^+ -Ionen leitfähig. Diese wandern durch die Membran zur Kathodenseite. Die Elektronen sind an den elektrischen Leiter gebunden, können die Membran nicht passieren und flie-

ßen über den Leiter von der Anode zur Kathode. Dort vereinigen sich die H⁺-Ionen mit dem dort vorliegenden Sauerstoff (der auf der Kathodenseite eingeleitet wird) mit den Elektronen zu Wasser, das die Brennstoffzelle dann verlässt. Zwischen Anode und Kathode bildet sich ein Spannungspotenzial, das energetisch genutzt werden kann.

Die Brennstoffzellentechnologie stellt eine umweltfreundliche Möglichkeit dar, Wasserstoff wieder in elektrische Energie umzuwandeln. Sofern die Brennstoffzelle mit grünem Wasserstoff (Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse mittels elektrischen Stroms aus erneuerbaren Energien) betrieben wird, emittiert der Umwandlungsprozess kein zusätzliches CO₂ in die Erdatmosphäre.

Die PEM-Brennstoffzelle wird bei Temperaturen zwischen 60 °C und 120 °C betrieben und ist im Leistungsbereich zwischen 5 kW und 250 kW angesiedelt. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt für die Zelle zwischen 50 % und 68 %.

Im Folgenden ist eine Übersicht über gängige Brennstoffzellen mit ihren charakteristischen Kennzahlen dargestellt:

Typ	Betriebs-temperatur/°C	Elektrolyt	Ionen-leitung	Brennstoff	Leistung/kW	Elektrischer Wirkungsgrad/%
AFC	20 bis 90	Wässrige Kalilauge	OH ⁻	Reiner H ₂	5 bis 150	60 bis 70
DMFC	60 bis 130	Protonenleitende Membran	H ⁺	CH ₃ OH	~ 5	20 bis 30
PEMFC	60 bis 120	Protonenleitende Membran	H ⁺	H ₂	5 bis 250	50 bis 68
PAFC	160 bis 220	Konz. Phosphorsäure	H ⁺	H ₂	bis 10.000	~ 55
MCFC	~ 650	Karbonatschmelze	CO ₃ ⁽²⁻⁾	H ₂	0,1 bis 2.000	55 bis 65
SOFC	800 bis 1.000	Dotiertes Zirkoniumdioxid	O ⁽²⁻⁾	H ₂	250 bis mehrere MW	60 bis 65

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 2: Übersicht über Brennstoffzellentechnologien und deren Charakteristika [7]

3. Konformitätserklärungen

3.1 Vorgehensweise zur Erstellung einer Konformitätserklärung

Industrielle Anlagen müssen in ihrer Gesamtheit mit dem legislativen Rahmen für stationäre Anwendungen übereinstimmen. Zwar ist in Europa die „Beseitigung von Handelshemmnissen im Europäischen Wirtschaftsraum“ der wesentliche Beweggrund für die Schaffung des regulativen Rahmens für die Inverkehrbringung von Produkten, das entscheidende technische Kriterium für die inhaltliche Formulierung der Verordnungen und Richtlinien ist jedoch zum überwiegenden Teil die Definition von Mindestanforderungen an die Sicherheit der von den Regelwerken erfassten technischen Lösungen. Nahezu durchgängig werden der Umgang mit den technologiespezifischen Gefahren sowie die Organisation und Implementierung von Sicherheit als wesentliche Kriterien verpflichtend eingefordert. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, ob die in Verkehr gebrachten Produkte einen Wasserstoffbezug aufweisen oder nicht.

Durchgängig ist in der Europäischen Union eine Konformitätserklärung samt zugehöriger CE-Kennzeichnung vonnöten. Diese stellt die Kernvoraussetzung für die Inverkehrbringung eines Produkts auf dem europäischen Markt dar. Mit der Konformitätserklärung der Europäischen Union (EU) bestätigt der „verantwortliche Hersteller“ oder sein Bevollmächtigter mit Sitz in der EU in alleiniger Verantwortung und rechtsverbindlich, dass ein von ihm in Verkehr gebrachtes Produkt den grundlegenden Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen aller relevanten europäischen Richtlinien entspricht.

Der verantwortliche Hersteller ist der physikalische Hersteller oder die Rechtsperson, die sich als Hersteller ausgibt (ausgewiesener Hersteller). Befindet sich der Hersteller außerhalb der Europäischen Union, ist der Inverkehrbringer beziehungsweise Importeur für die Konformitätserklärung samt zugehöriger CE-Kennzeichnung verantwortlich.

Eine korrekte Kennzeichnung kann die Pflicht zur Zuhilfenahme einer sogenannten notifizierten Stelle (Notified Body – NoBo) beinhalten. Die notifizierte Stelle bewertet die Begründung des Herstellers für die CE-Konformität auf Basis der referenzierten EU-Richtlinien und -Verordnungen.

Jede akkreditierte notifizierte Stelle ist in der NANDO Datenbank [8] mit einer klar gekennzeichneten Definition des Akkreditierungsumfangs aufgelistet. Die Anwendung der jeweiligen Richtlinien und Verordnungen für ein spezifisches Produkt bestimmt, inwiefern eine notifizierte Stelle in das Konformitätsverfahren miteinbezogen werden muss.

Dabei liegt der Fokus in erster Linie auf den elementaren Gefahren einer Anlage und nicht auf den Gefahrenszenarien spezieller Anwendungen. Beispielsweise werden die von erhöhtem Druck ausgehenden Gefahren in der Druckgeräterichtlinie behandelt, wohingegen die Gefahren von elektrischem Strom von der Niederspannungsrichtlinie abgedeckt werden. Da es sich hierbei um EU-Richtlinien handelt, ist es zur Schaffung eines geeigneten legislativen Rahmens notwendig, diese Richtlinien in nationales deutsches Recht umzusetzen. Damit wird die nationale Verbindlichkeit gewährleistet. Für EU-Verordnungen ist eine solche nationale Umsetzung nicht vorgesehen, da diese direkt und unmittelbar in den einzelnen EU-Mitgliedsstaaten wirksam werden. Dabei stehen die einzelnen Länder in der Pflicht, jede Unvereinbarkeit innerhalb des nationalen Rechtsrahmens zu eliminieren.

Für stationäre Anwendungen und Ausrüstungen existieren derzeit 26 EU-Verordnungen und -Richtlinien, die die Notwendigkeit und Möglichkeit einer CE-Kennzeichnung induzieren (siehe Tabelle 3) [9].

Hinweis: Es muss nicht zwingend jede Richtlinie für jede Anwendung verwendet werden.

Nr.	Beschreibung	VO/RL*	Registrierung	NoBo notwendig? **
1	Aktive implantierbare medizinische Geräte	VO	2017/745	J
2	Gasverbrauchseinrichtungen	VO	2016/426	J
3	Seilbahnen für den Personenverkehr	VO	2016/424	J
4	Bauprodukte	VO	305/2011	TW
5	Ökodesign	RL VO VO VO VO VO VO VO VO VO	2009/125/EC (Rahmen) 1275/2008 278/2009 244/2009 859/2009 245/2009 107/2009 640/2009 641/2009 642/2009 643/2009	TW
6	Elektromagnetische Verträglichkeit	RL	2014/30/EU	N
7	Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (ATEX)	RL	2014/34/EU	TW
8	Explosivstoffe für zivile Zwecke	RL	2014/28/EU	J
9	Warmwasserheizkessel	RL	92/42/EEC	TW
10	In-vitro-Diagnostik	VO	2017/746	J
11	Aufzüge	RL	2014/33/EU	J
12	Niederspannung	RL	2014/35/EU	N
13	Maschinen	RL	2006/42/EC	TW
14	Messgeräte	RL	2014/32/EU	TW
15	Medizinprodukte	VO	93/42/EEC	TW
16	Umweltbelastende Geräuschemission/Outdoor	RL	2000/14/EC	J
17	Nichtselbsttätige Waagen	RL	2014/31/EU	J
18	Persönliche Schutzausrüstung	VO	2016/425	TW
19	Druckgeräte	RL	2014/68/EU	TW
20	Pyrotechnische Gegenstände	RL	2013/29/EU	J
21	Funkanlagen	RL	2014/53/EU	TW
22	Sportboote	RL	2013/53/EU	N
23	RoHS	RL	2011/65/EU	N
24	Spielzeug	RL	2009/48/EC	TW
25	Einfache Druckgeräte	RL	2014/29/EU	TW
26	Düngemittel	VO	2019/1009	TW

Quelle: eigene Darstellung * VO: Verordnung/RL: Richtlinie ** J: Ja/N: Nein/TW: Teilweises Miteinbeziehen einer notifizierten Stelle, unter Einbezug auf die jeweilige VO/RL

Tabelle 3: Übersicht der europäischen Verordnungen und Richtlinien für stationäre Anwendungen

Jeder Hersteller, der ein Produkt im EU-Wirtschaftsraum in Verkehr bringen will, ist verpflichtet, alle Verordnungen und Richtlinien, die für das jeweilige Produkt angewandt werden müssen, vollständig einzuhalten. Die Basis für die Feststellung der für ein Produkt relevanten Verordnungen und Richtlinien bildet die Beschreibung des Produkts und seiner vorgesehenen Anwendungsfälle. Grundlage dieser Beschreibung ist eine umfassende Risikoanalyse und Risikobeurteilung, die sowohl vorgesehene Anwendungsszenarien als auch den zu erwartenden Missbrauch enthält.

Stationäre Wasserstofftechnologien, wie beispielsweise eine Elektrolyseanlage, bergen eine Vielzahl an Gefahrenfeldern, die an verschiedenen Stellen Berührungspunkte und Überschneidungen mit den jeweiligen Verordnungen und Richtlinien aufweisen. Damit sind im Regelfall mehrere Verordnungen und Richtlinien im Rahmen der Konformitätsbewertung zu berücksichtigen, wodurch sich eine hohe Komplexität des Prozesses ergibt. Gemäß dem „Leitfaden für die Umsetzung der Produktvorschriften der EU 2016“ („Blue Guide“) ist ein Hersteller angehalten, analog den folgenden Schritten (Tabelle 4) vorzugehen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um Gefahren und Risiken zu identifizieren und auf ein gemäß der Richtlinie (gesellschaftlich) toleriertes Maß zu minimieren [10].

Schritt	Technologie
1	Ermittlung aller relevanten Verordnungen und Richtlinien
2	Auswahl des geeigneten Konformitätsbewertungsverfahrens
3	Überprüfung produktspezifischer Anforderungen
4	Beauftragung einer notifizierten Stelle zur Durchführung eines unabhängigen Konformitätsbewertungsverfahrens, falls notwendig
5	Produktprüfung zum Nachweis der Konformität
6	Erstellung der gesamten technischen Unterlagen (inklusive Betriebsanleitung)
7	Anbringung der CE-Kennzeichnung und Unterzeichnen der EU-Konformitätserklärung

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 4: Ablauf einer EU-Konformitätsbewertung

3.2 Relevante Verordnungen und Richtlinien je Technologie

Die anzuwendenden Verordnungen und Richtlinien ergeben sich aus den technologiespezifisch auftretenden Gefährdungen. Die für spezifische Produkt- und Anlagenkonfigurationen anzuwendenden Richtlinien und Verordnungen müssen individuell vom Hersteller identifiziert und festgelegt werden. Die nachfolgenden Übersichten (Tabellen 5 bis 10) stellen für einen marktüblichen Aufbau typische Zusammenstellungen dar, müssen aber aus rechtlichen Gründen vor Anwendung auf formelle gegenseitige Ausschlusskriterien in den Anwendungsbereichen der Richtlinien geprüft werden. Die CE-Kennzeichnung darf keine Verordnung oder Richtlinie enthalten, die nicht auf das Produkt anwendbar ist, unabhängig davon, ob dies aus technischen oder formalen Gründen der Fall ist.

Anmerkung 1: Die Ziffer in der zweiten Spalte bezieht sich auf die Nummer der Richtlinie oder Verordnung in Tabelle 3.

Anmerkung 2: Die Anwendung gewisser Richtlinien verbietet die Verwendung der damit in Verbindung stehenden Richtlinien, da dies einen formellen Fehler bei der Inverkehrbringung induziert.

Technologie: Alkali- und PEM-Elektrolyseanlagen	
Verordnung/Richtlinie	Nr.
Druckgeräterichtlinie	19
RoHS-Richtlinie	23
Niederspannungsrichtlinie	12
Maschinenrichtlinie	13
Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen	7
Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit	6

Tabelle 5: Relevante Verordnungen und Richtlinien für Elektrolyseure

Quelle: eigene Darstellung

Technologie: LKW-Trailer (Be-/Entladestelle)	
Verordnung/Richtlinie	Nr.
Druckgeräterichtlinie	19
RoHS-Richtlinie	23
Niederspannungsrichtlinie	12
Maschinenrichtlinie	13
Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen	7
Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit	6
Messgeräte	14

Tabelle 6: Relevante Verordnungen und Richtlinien für LKW-Trailer (Be-/Entladestelle)

Quelle: eigene Darstellung

Technologie: betriebliche Gashochdruckspeicher (GH ₂)	
Verordnung/Richtlinie	Nr.
Druckgeräterichtlinie	19
RoHS-Richtlinie	23
Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen	7

Tabelle 7: Relevante Verordnungen und Richtlinien für betriebliche Gashochdruckspeicher

Quelle: eigene Darstellung

Technologie: Flüssigwasserstoffspeicher (LH₂)

Verordnung/Richtlinie	Nr.
Druckgeräterichtlinie	19
Niederspannungsrichtlinie	12
RoHS-Richtlinie	23
Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen	7

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 8: Relevante Verordnungen und Richtlinien für Flüssigwasserstoffspeicher**Technologie: Wasserstofftankstellen**

Verordnung/Richtlinie	Nr.
Druckgeräterichtlinie	19
RoHS-Richtlinie	23
Niederspannungsrichtlinie	12
Maschinenrichtlinie	13
Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen	7
Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit	6
Messgeräte	14

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 9: Relevante Verordnungen und Richtlinien für Wasserstofftankstellen**Technologie: stationäre Brennstoffzellen**

Verordnung/Richtlinie	Nr.
Druckgeräterichtlinie	19
RoHS-Richtlinie	23
Niederspannungsrichtlinie	12
Maschinenrichtlinie	13
Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit	6

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 10: Relevante Verordnungen und Richtlinien für stationäre Brennstoffzellen

3.3 Integrierendes Schutzkonzept der Richtlinien und Verordnungen

Der Umgang mit Lücken innerhalb bestimmter Verordnungen und Richtlinien ist in der Richtlinie 2001/95/EG über die allgemeine Sicherheit festgelegt. Das integrale Schutzziel dieser Richtlinie fordert ein, „dass Produkte, die in Verkehr gebracht werden, sicher sind“ (Artikel 1) [11]:

„Es wird davon ausgegangen, dass ein Produkt sicher ist [...], wenn es den nicht bindenden nationalen Normen entspricht, die eine europäische Norm umsetzen, auf die die Kommission gemäß Artikel 4 im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften verwiesen hat.“ (Artikel 3.2)

Es wird darauf hingewiesen, dass sich einige der Richtlinien je nach Definition ihres Inhalts gegenseitig ausschließen. Beispielsweise darf kein Produkt, das in den Anwendungsbereich von (7) eingestuft wird, für elektrische Themen auf (12) verweisen. Die Maschinenrichtlinie (13) definiert, wann ein Produkt die in (12), teilweise die in (19) und (7) genannten Mindestanforderungen erfüllt. Diese Ausnahmen beschränken jedoch nicht die technische Mindestanforderung, während formelle Gründe zu einer Nichteinhaltung des Anwendungsbereichs dieser Dokumente führen würden.

Die veröffentlichten Vorschriften und Richtlinien haben nicht den Anspruch, eine integrale und umfassende Sicherheitsstrategie zur Milderung der im Regelwerk abstrahierten Gefahrenfelder zu formulieren. Dennoch decken diese Rechtsvorschriften die wichtigsten Gefahren ab. Die ausschließliche Einhaltung der von den Richtlinien und Verordnungen abgeleiteten Mindestanforderungen führt üblicherweise nicht zu einem belastbaren Sicherheitskonzept. Dies muss immer durch eine umfassende sicherheitstechnische Betrachtung (Anlagensicherheit, personelle Sicherheit, finanzielle Sicherheit) gewährleistet werden.

3.4 Stand der Technik und Normenarten

Aus formaler Sicht muss der Nachweis der Konformität der Produkte mit den in den Verordnungen und Richtlinien festgelegten Mindestanforderungen einer angemessenen Methodik folgen. Diese muss in der Lage sein, den anerkannten Stand der Technik des Produkts insbesondere für Sicherheitsaspekte nachzuweisen. Eine zuverlässige Maßnahme zur Umsetzung dieser Anforderung ist die Bezugnahme auf internationale, europäische und nationale Standards, die den anerkannten Stand der Technik abbilden.

Dabei wird im Allgemeinen zwischen drei Arten von Normen unterschieden.

- **A-Normen** bilden die Grundlage für eine weitere Detaillierung. In Bezug auf sicherheitsrelevante Themen formen diese einen normativen Rahmen und behandeln Grundbegriffe, Gestaltungsleitsätze und allgemeine Aspekte.
- **B-Normen** beschreiben die technischen Lösungen und werden auch als Sicherheitsgrundnormen bezeichnet. Im Falle sicherheitsrelevanter Themen können sie darauf abzielen, mit Hilfe der Methodiken der A-Normen die spezifischen identifizierten Risiken zu mindern. B1-Normen adressieren bestimmte Sicherheitsaspekte, wohingegen B2-Normen auf Schutzeinrichtungen abzielen.

→ **C-Normen** sind Normen für die Sicherheit von Produkten, die detaillierte Sicherheitsanforderungen an bestimmte Produkttypen für unterschiedliche Anwendungsbereiche wiedergeben.

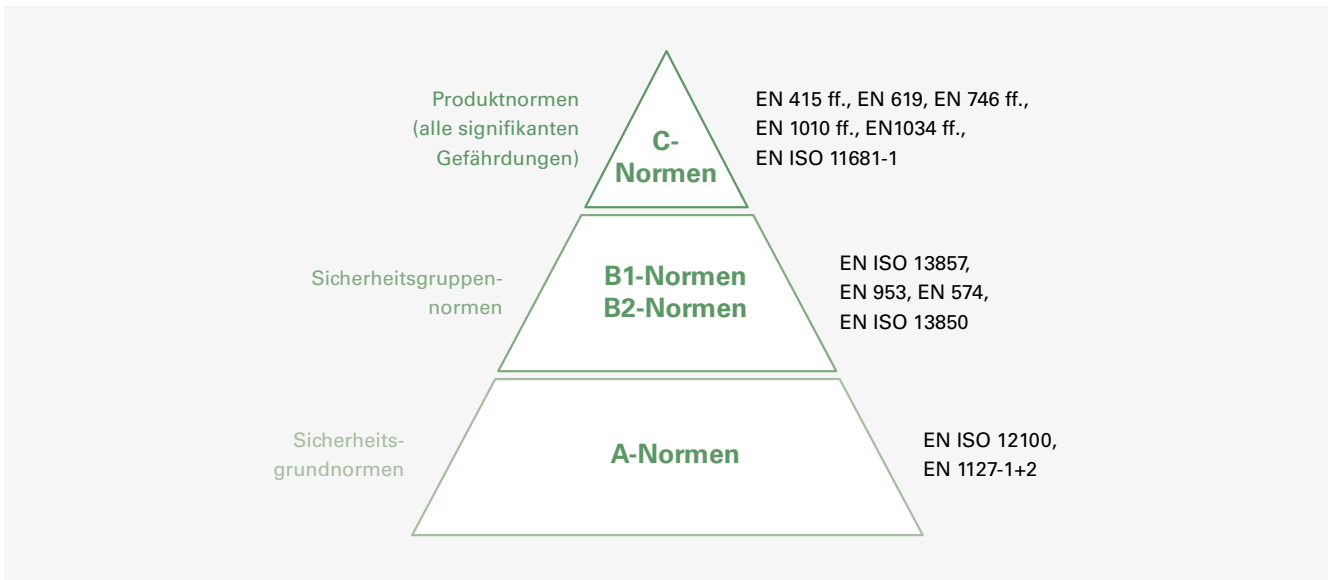


Abbildung 10: Pyramidenförmiger Aufbau des Normierungskonzepts

Solange Normen nicht als bindende Quelle innerhalb eines regulatorischen Rahmens referenziert werden, gelten sie rechtlich als „nicht verbindlich“. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Ausklammerung des Inhalts anerkannter Normen nicht empfehlenswert ist. Im Falle von klaren Verstößen gegen den durch diese Normen definierten anerkannten Stand der Technik könnte eingefordert werden, dass klare und nachvollziehbare Begründungen vorgebracht werden, um die Konformität mit den europäischen Mindestanforderungen darlegen zu können. Die Beweislast liegt auf Seiten des Herstellers. Insofern eine solche Beweisführung nicht möglich ist, kann dies zu rechtlichen Konsequenzen führen. Aufgrund des zunehmenden Konkretisierungsgrads von A- hin zu C-Normen haben C-Normen eine höhere Relevanz und Beweiskraft als beispielsweise A- und B-Normen. Somit hätte ein Ausblenden von anwendbaren C-Normen auch eine Migration der Beweislast zur Folge.

3.5 Harmonisierte Normen

Eine besondere Kategorie innerhalb aller genannten Normengruppen sind die sogenannten harmonisierten Normen. Aus der Harmonisierung dieser Normen durch die Gremien der EU entsteht die sogenannte „Konformitätsvermutung“. Stimmt ein Produkt mit harmonisierten Normen überein, wird die Übereinstimmung mit dem europäischen Rechtsrahmen angenommen.

Innerhalb des europäischen Rechtsrahmens haben harmonisierte Normen deshalb eine Sonderstellung. Die Entwicklung der harmonisierten Normen wird durch die Europäische Kommission veranlasst und von europäischen Normungsinstitutionen

(CEN, CENELEC, ETSI) durchgeführt. Der Anteil der europäischen Normen, die nach einem Normungsauftrag der Europäischen Kommission erarbeitet werden, beträgt rund 20 %. Harmonisierte Normen werden im Amtsblatt der Europäischen Union veröffentlicht. Eine harmonisierte Norm muss mit einer Verordnung oder Richtlinie übereinstimmen. Hersteller, andere Wirtschaftsbeteiligte oder Konformitätsbewertungsstellen können anhand harmonisierter Normen nachweisen, dass Produkte, Dienstleistungen oder Prozesse den einschlägigen EU-Rechtsvorschriften entsprechen. Über den Internetauftritt der Europäischen Union [12] sind eine erste Übersicht und ein Ausgangspunkt für die Suche nach harmonisierten Normen möglich.

Die Übersicht ist nach Richtlinien geordnet. Priorisiert findet man harmonisierte Normen mit Relevanz für Wasserstoffapplikationen in folgenden Richtlinien:

- Druckgeräte richtlinie (https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/european-standards/harmonised-standards/pressure-equipment_de)
- ATEX-Richtlinie (https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/european-standards/harmonised-standards/equipment-explosive-atmospheres-atex_en)
- Maschinenrichtlinie (https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/european-standards/harmonised-standards/machinery-md_de)
- Niederspannungsrichtlinie (https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/european-standards/harmonised-standards/low-voltage-lvd_de)
- Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit (https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/european-standards/harmonised-standards/electromagnetic-compatibility-emc_de)

In Tabelle 11 sind für die genannten Richtlinien Hauptgefahren, Schwellenwerte und Definitionen für die jeweilige Anwendbarkeit dargestellt.

Richtlinie	Hauptgefahren	Schwelle/Definition	NoBo?
Maschinenrichtlinie, 2006/42/EG	Sich bewegende Teile	Die Anlage enthält mindestens ein sich bewegendes Teil	Nein, mit Ausnahme von Anhang IV
Druckgeräterichtlinie, 2014/68/EU	Bersten von Behältern oder Komponenten	0,5 bar Überdruck	Ja, mit Ausnahme von Modul A
Niederspannungsrichtlinie, 2014/35/EU	Stromschlag bei Kontakt	50 V < U < 1.000 V für Wechselstrom, 75 V < U < 1500 V für Gleichstrom	Nein
Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit, 2014/30/EU	Beeinflussung der Funktion von elektrischen Geräten durch elektromagnetische Strahlung	Fähigkeit eines Betriebsmittels, in seiner elektromagnetischen Umgebung verlässlich zu arbeiten und die Umgebung nicht unzulässig zu stören	Nein, mit Ausnahme von Modul B und C
ATEX-Richtlinie, 2014/34/EU	Zündung einer explosionsfähigen Atmosphäre	Nutzung von Geräten und Schutzsystemen zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen	Ja, mit Ausnahme von Gerätegruppe II Kategorie 3

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 11: Hauptgefahren und Schwellenwerte beziehungsweise Definitionen für ausgewählte Richtlinien mit Relevanz für Wasserstoffapplikationen

Die Pflicht, eine notifizierte Stelle in das Konformitätsbewertungsverfahren einzubinden, ist in den jeweiligen Richtlinien und Verordnungen geregelt. Dabei fordern insbesondere die Druckgeräterichtlinie, die ATEX-Richtlinie und die EMV-Richtlinie die Prüfung des Konformitätsbewertungsverfahrens durch eine notifizierte Stelle. In diesem Zusammenhang ist jedoch wichtig zu erwähnen, dass nicht jeder Anwendungsfall diese externe Prüfung erfordert. In den jeweiligen Modulen der drei Richtlinien werden sowohl Umfang als auch Notwendigkeit der Zuhilfenahme einer notifizierten Stelle festgelegt. Die Niederspannungsrichtlinie und die Maschinenrichtlinie fordern keine Prüfung durch eine notifizierte Stelle. Hier liegt die Verantwortung voll in der Hand der Hersteller selbst.

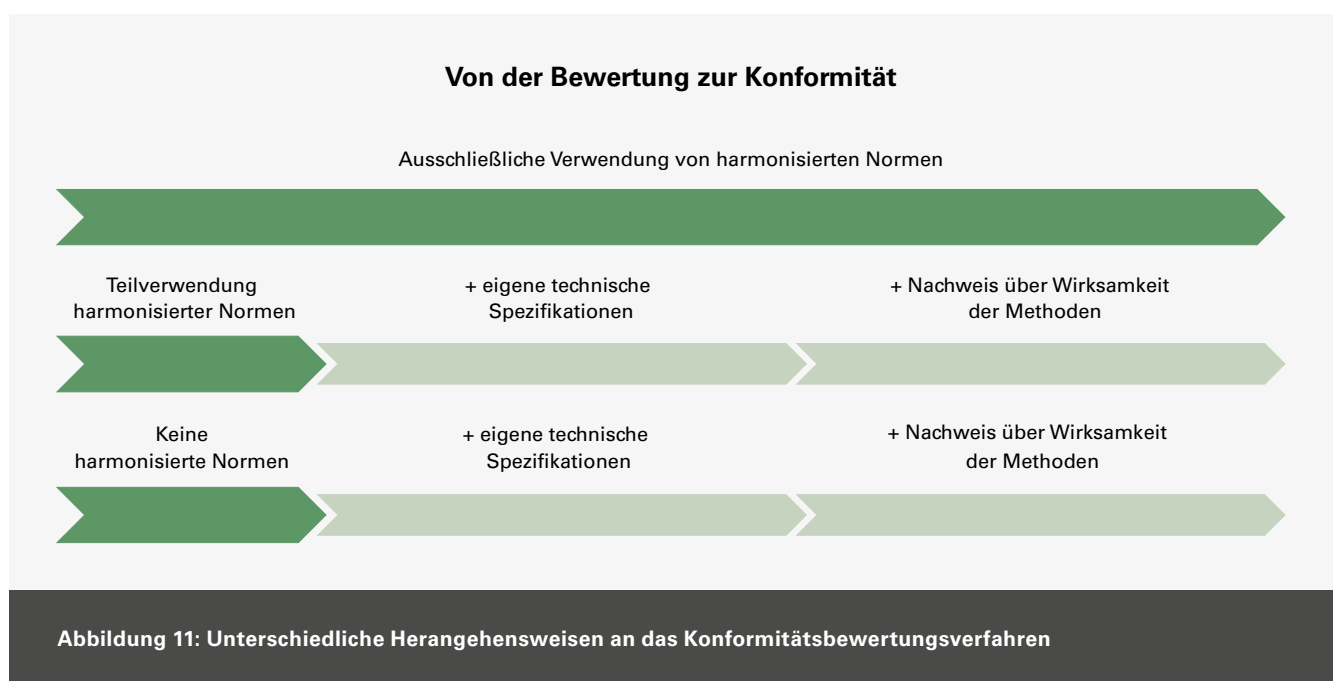
Zusätzlich zu den Anforderungen an die umfassende Übereinstimmung der Inhalte einer bestimmten Norm mit der zugehörigen, typischerweise alleinigen Regelung für ihre „Harmonisierung“ müssen starke Anforderungen an das Format und die Struktur dieser Normen erfüllt werden, sodass diese als harmonisierte Norm anerkannt werden.

Harmonisierte Normen werden stets mit Hilfe der folgenden Kriterien genehmigt und bewertet:

- Stimmen sie mit den Primärzielen der Vereinheitlichung der minimalen Markteintrittsbedingungen überein?
- Sind sie repräsentativ für den Stand der Technik der beschriebenen Technologie?

Hierzu wird die Liste der harmonisierten Normen stets weiterentwickelt. Harmonisierungen können durch Beschlüsse des Europäischen Komitees erfolgen oder obsolet werden, sofern neue Überlegungen zur Vollständigkeit der Norm veröffentlicht werden. Harmonisierte Normen beinhalten zusammengestellte Lösungen für die Konformität bestimmter Methoden oder Produkte in Einklang mit dem Tonus der jeweiligen Verordnung oder Richtlinie. Die derzeitige Anwendung dieser Normen ist also freiwillig zu entscheiden. Sobald eine harmonisierte Norm für den Nachweis der Konformität angewandt wurde, kann die Konformität mit einer einzigen Verordnung oder Richtlinie vermutet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die Harmonisierung von Normen sich auf einzelne Vorschriften bezieht, das heißt, dass eine solche Harmonisierung nicht automatisch zusätzliche Anforderungen aus anderen Vorschriften berücksichtigt. Abbildung 11 zeigt drei mögliche Konformitätsbewertungsverfahren.

Anmerkung: Für den Anwender besteht keinerlei Verpflichtung, diese harmonisierten Normen für den Nachweis der Konformität mit dem regulatorischen Rahmen anzuwenden, was Abbildung 11 verdeutlicht.



3.6 Produktnormen

Nachfolgend sind für wesentliche Produkte in der Wasserstoffökonomie exemplarisch relevante C-Normen, priorisiert harmonisierte Normen zur Implementierung der Konformitätsvermutung, aufgeführt. Wo C-Normen nicht unmittelbar verfügbar sind, wird eine alternative, jedoch final gleichwertig anzusehende Argumentationskette zur Dokumentation der Produktkonformität aufgezeigt. Sicherheit kann nicht 100-prozentig sein, sondern bedarf der Definition des tolerierbaren Restrisikos, das mit der Verwendung des Produkts eingegangen wird.

3.6.1 Auswahl von Produktnormen am Beispiel von Elektrolyseanlagen

Bis ins Jahr 2023 ist keine harmonisierte Norm auf C-Niveau für Elektrolyseanlagen verfügbar, um daraus die Konformitätsvermutung bezüglich einer ausgewählten Richtlinie zu induzieren.

Auf internationaler Normungsebene steht die ISO 22734 (Wasserstoffproduktionseinheiten mittels Wasserelektrolyse) als B-Gruppennorm für die technologische Gruppe der AEL- und PEM-Elektrolyseverfahren zur Verfügung. Diese kann bei der Durchführung solcher Analysen helfen, indem geeignete Maßnahmen zur Risikominderung entweder direkt beschrieben oder Referenzen zu anderen Normen insbesondere auch für Subkomponenten oder -systeme darin vorgeschlagen werden. Diese referenzierten Normen können wiederum selbst mit europäischen Verordnungen und Richtlinien harmonisiert sein. Die Elektrolyse als Gesamtsystem wird durch die Überlagerung der Anforderungen an die Subsysteme nicht notwendigerweise umfänglich abgedeckt.

Innerhalb der bereits genannten ISO 22734 wird beispielsweise auf die IEC 61010-1 verwiesen. Diese stellt innerhalb ihres Geltungsbereichs spezifische Anforderungen an die elektrische Sicherheit der Elektrolyse und verfügt über eine Harmonisierung mit der Niederspannungsrichtlinie.

Der Verweis auf IEC 31010 (Risikomanagement beziehungsweise Techniken zur Risikobewertung) und IEC 61511 (Funktionale Sicherheit beziehungsweise sicherheitstechnische Systeme für die Prozessindustrie) erleichtert die Integration von Elektrolyseanlagen in die Prozessindustrie. Ergänzend wird die EN ISO 12100, die über eine Harmonisierung mit der Maschinenrichtlinie verfügt, in der ISO 22734 referenziert. Alle Verfahren induzieren die Verpflichtung zu einer individuellen, umfassenden Risikoanalyse und -beurteilung, um eine integrale Produktsicherheit für den Umfang und die vorhergesehene Nutzung des Produkts zu gewährleisten.

3.6.2 Produktnormen für Be-/Entladestellen (LKW-Trailer)

Für Be- und Entladestellen von Wasserstoff für LKW-Trailer stehen derzeit keine unmittelbar anwendbaren Produktnormen zur Definition der Anforderungen zur Verfügung.

Daher müssen, wie auch bei der Elektrolyseanlage, Subsysteme definiert werden, für die wiederum Produktnormen vorhanden sind. Die Hauptkomponenten für eine solche Anwendung sind be- und entladungsseitig

- ein Speichertank,
- ein Kompressor und
- eine Be- oder Entladeeinheit mit einem geeigneten Kopplungsmechanismus.

Beim LKW-Trailer sind die Hauptkomponenten

- eine Befüll- oder Entladestation und
- Druckgasflaschenbündel für den Transport von GCH_2 beziehungsweise
- vakuumisolierte Tanks für den Transport von LH_2 .

Die wesentliche Richtlinie für diese Art der Wasserstofftechnologie ist die Druckgeräterichtlinie. Die Produktnormen für diese Hauptkomponenten werden im Folgenden näher erläutert.

3.6.3 Produktnormen für betriebliche Gashochdruckspeicher

Für betriebliche Gashochdruckspeicher können Normen herangezogen werden, die mit der Druckgeräterichtlinie harmonisiert sind. Durch deren Anwendung entsteht die Konformitätsvermutungswirkung, dass ein Druckgerät den Sicherheitsanforderungen dieser Richtlinie entspricht.

Die DIN EN ISO 19884 legt die Anforderungen für die Auslegung von CGH_2 -Flaschen und Großflaschen zur ortsfesten Lagerung fest. Dabei werden die Werkstoffe Stahl und Edelstahl sowie Aluminiumlegierungen und nichtmetallische Werkstoffe berücksichtigt. Die Grenzen dieser Norm liegen bei einem maximalen Behältervolumen von 10.000 Liter und einem maximal zulässigen Betriebsdruck von 110 MPa.

Neben dieser Norm ist die Norm für unbefeuerte Druckbehälter DIN EN 13445 zu nennen. In ihr werden ausschließlich Stahlwerkstoffe mit ausreichender Dehnung und Duktilität betrachtet. Andere Werkstoffe wie beispielsweise

- faserverstärkter Kunststoff,
- Graphit oder
- Kupfer

sind nicht im Geltungsbereich enthalten. Hierfür müssen gegebenenfalls in Abstimmung mit einer notifizierten Stelle andere Nachweismethoden und Maßnahmen zum Konformitätsnachweis definiert und umgesetzt werden. Diese können ohne Anspruch auf eine Vollständigkeitswirkung beispielsweise auf dem ASME- oder dem AD-2000-Regelwerk aufbauen.

3.6.4 Produktnormen für Flüssigwasserstoffspeicher

LH_2 -Speicher werden ebenfalls im Rahmen der Druckgeräterichtlinie betrachtet. Im Gegensatz zu betrieblichen Gashochdruckspeichern sind Behälter für kryogene Temperaturen anders auszulegen, was die Anwendung der Norm DIN EN 13445 ausschließt. Wie bereits beschrieben (siehe Abbildung 7), sind Speicher für tiefkalte Flüssigkeiten doppelwandig vakuum-

isoliert ausgeführt, um den Wärmeeintrag zu minimieren. Die Sicherheit dieser Art der Speicher ist durch DIN EN 13458 geregelt, die für ortsfeste vakuumisolierte Behälter gilt. Diese ist ebenfalls mit der Druckgeräterichtlinie harmonisiert.

3.6.5 Produktnormen für Wasserstoff-Füllanlagen

Die DIN EN ISO 19880-1 definiert die Anforderungen an Füllanlagen für gasförmigen Druckwasserstoff. In ihr sind die minimalen Sicherheitsanforderungen für öffentliche und nicht öffentliche Wasserstofftankstellen insbesondere zur Betankung von leichten Straßenfahrzeugen (Light Duty Vehicles) definiert. Die Norm schließt die Betankung mit kryogenem Flüssigwasserstoff sowie die Beladung von Metallhydrid-Speichern aus. In Abhängigkeit der notwendigen Wasserstoffreinheit für die jeweilige Anwendung (Brennstoffzellenfahrzeug oder Fahrzeug mit Wasserstoffmotor) muss die Reinheit ebenfalls geregelt werden. In der DIN EN 17124 und in der ISO 14687 wird die Wasserstoffqualität für die jeweiligen Anwendungsprozesse ausführlich dargestellt. Etwaige Verunreinigungen und die einzuhaltenden Grenzwerte sind ebenfalls definiert. Mit der Beschränkung auf die Befüllung von Straßenfahrzeugen formuliert die DIN EN 17127 Mindestanforderungen, „die zur Gewährleistung der Interoperabilität (einschließlich der Betankungsprotokolle) von öffentlichen Wasserstofftankstellen, die gasförmigen Wasserstoff an Straßenfahrzeuge (zum Beispiel Brennstoffzellenfahrzeuge) abgeben, erfüllt werden müssen“ [13].

Aufgrund der Anforderungen der Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) sind sowohl die EN 17124 als auch die EN 17127 für öffentliche Tankstellen für die Befüllung leichter Straßenfahrzeuge verpflichtend anzuwenden.

Die Normenreihe der DIN EN ISO 19880 definiert noch weitere Anforderungen für Komponenten einer gasförmigen Wasserstofftankstelle:

- ISO 19880-1 Allgemeine Anforderungen
- ISO 19880-2 Dispenser
- ISO 19880-3 Ventile
- ISO 19880-5 Schläuche
- ISO 19880-6 Verbindungsstücke

Da die Betankung von Fahrzeugen im Allgemeinen eine Kritikalität innerhalb einer sicheren Wasserstoffökonomie darstellt, ist geplant, dass die Normenreihe DIN EN ISO 1988X in Zukunft auch für abweichende Fahrzeugtypen im Mobilitätssektor, unter anderem für den Schwerlast- und den Schienenverkehr, Anforderungen und somit Lösungsansätze für den anerkannten Stand der Technik formulieren wird. Im Jahr 2023 sind industriell standardisierte Lösungen auch für größere Querschnitte verfügbar, derzeit jedoch nicht als normativer Produktstandard. Die technische Bewertung muss deshalb individuell ohne Rückgriff auf unmittelbar anwendbare Normen erfolgen. In der Praxis werden die Normen für leichte Straßenfahrzeuge auf andere Applikationen übertragen, ohne dass hierdurch die Vielzahl der Quersensitivitäten umfänglich abgebildet werden kann.

Für die Hochdruck-Betankungskupplung ist mit der DIN EN ISO 17268 eine nicht harmonisierte, jedoch ebenfalls anwendbare Produktnorm vorhanden. Aktuell ist jedoch keine Betankungskupplung in Verkehr gebracht.

Für die Lagerung von CGH_2 in einer Tankstelle werden sowohl für den Niederdruck- als auch für die Hochdruckspeicher Gashochdruckspeicher aus Stahl verwendet. Diese unterliegen der Druckgeräterichtlinie und die harmonisierten Normen DIN EN ISO 19884 und DIN EN 13445 sind hierbei anzuwenden.

Zur Spezifikation erwartbarer Bestandteile von H_2 -Füllanlagen wird innerhalb der angeführten Normen auf Subkomponenten-spezifische Normen verwiesen. Beispielsweise wird innerhalb der ISO 19880-1 hinsichtlich der druckauslösenden Sicherheitsventile auf die ISO 21013-1 verwiesen. Aufgrund der nicht bindenden Wirkung der internationalen Norm sind Abweichungen im Rahmen der Inverkehrbringung prinzipiell regulatorisch möglich. Um den Anforderungen der den anerkannten Stand der Technik abbildenden Norm gerecht zu werden, bedürfen Abweichungen von den Inhalten der Norm aber des Nachweises zumindest äquivalenter Funktionalität und Sicherheit. Der Wasserstoffverdichter wird detailliert im nächsten Absatz beschrieben.

3.6.6 Produktnormen für Verdichter

Der Wasserstoffverdichter unterliegt sowohl der Maschinenrichtlinie als auch der Druckgeräterichtlinie. Die Norm EN 1012-1 ist mit der Maschinenrichtlinie harmonisiert und beschreibt Sicherheitsanforderungen für Kompressoren und Vakuumpumpen. Ebenfalls ist EN ISO 12100 für die allgemeine Sicherheit von Maschinen zu nennen. Die EN 764 regelt die Sicherheit von Druckgeräten und ist mit der Druckgeräterichtlinie harmonisiert. Hinzu kommen noch Normen, die mit der Umweltschutzrichtlinie (EN ISO 3744:2009, EN ISO 2151:2004), der Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit (EN 61000-6) und der Niederspannungsrichtlinie (EN 60034, EN 60204-1:2009, EN 60439-1:2004) harmonisiert sind.

3.6.7 Produktnormen für stationäre Brennstoffzellen

Für die Inverkehrbringung von stationären Brennstoffzellen stehen mit EN 62282 3 100:2012 und EN 62282 3 300:2012 mit der Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU harmonisierte Normen zur Verfügung. Durch die Harmonisierung mit 2014/35/EU ist keine Konformitätsvermutung mit weiteren Richtlinien, zum Beispiel 2014/68/EU, verbunden.

Während in der Liste der mit 2014/35/EU harmonisierten Normen (Stand 10.07.2023) die Normversionen von 2012 als harmonisiert gelistet sind, wird die EN 62282-3-100 auf der IEC-Plattform als „zurückgezogen“ und „ersetzt“ durch EN 62282-3-100:2019 aufgeführt. Hierdurch ergibt sich zunächst ein Widerspruch.

Während die Listung einer Norm im EU-Amtsblatt die Konformitätsvermutung gegenüber der behördlichen Marktüberwachung auslöst, verlangt das Produkthaftungsgesetz abgeleitet aus den EU-Richtlinien die Einhaltung des „Standes der Technik“ zum Zeitpunkt der Inverkehrbringung.

3.6.8 Schlussfolgerung aus Richtlinien, Verordnungen und harmonisierten Normen

Im Wesentlichen sind von den in Tabelle 3 gezeigten europäischen Richtlinien und Verordnungen sechs Kernrichtlinien und -verordnungen für Wasserstofftechnologien von Bedeutung. Ergänzend zu diesen ist je nach Art der Technologie die Messgeräterichtlinie [13] erwähnenswert. Durch die Einhaltung der Anforderungen dieser Richtlinien und Verordnungen, gegebenenfalls und vereinfachend mittels der damit harmonisierten Normen, kann die Konformität einer Komponente oder Anlage argumentiert werden.

Die Erklärung der Konformität erfolgt in alleiniger Verantwortung durch den Hersteller, abhängig von der Ausführung von Komponenten oder Anlagen kann die Konformitätsbestätigung durch eine notifizierte Stelle erforderlich sein. Dies stellt den ersten Schritt des Konformitätsbewertungsverfahrens dar.

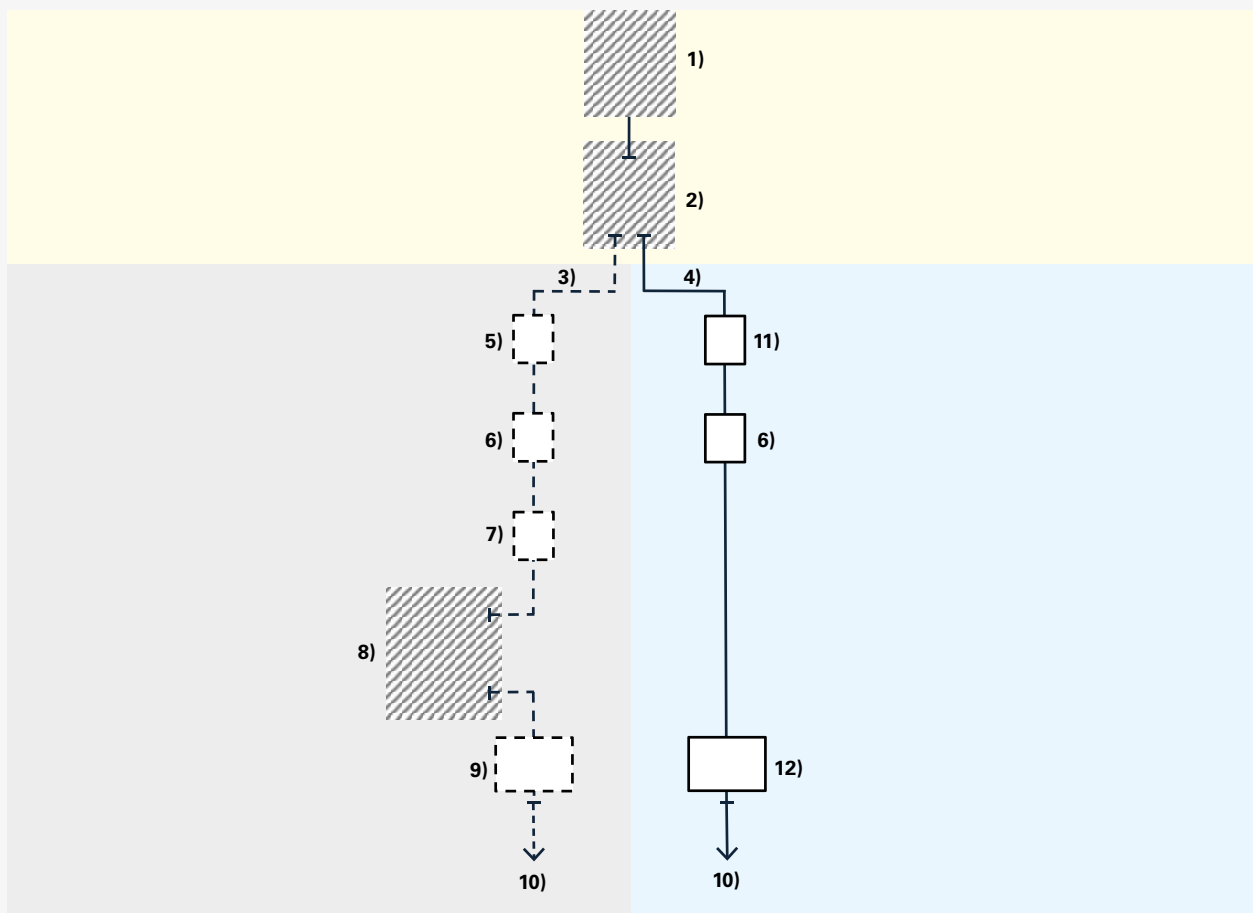
Es ist erkennbar, dass noch nicht für alle gängigen stationären Wasserstofftechnologien passende Produktnormen entwickelt und veröffentlicht wurden. Beispielsweise sind für Elektrolyseanlagen keine unmittelbar anwendbaren harmonisierten Produktnormen verfügbar.

Mit der Unterteilung von Systemen in Subsysteme mit passenden Granularitäten können mitunter auf niedrigerem Abstraktionslevel geeignete Produkt- oder Gruppennormen identifiziert werden, die zwar durch Aneinanderreihung und Überlapung noch keine integrale Aussage über die Konformität auf Systemebene erlauben, die Argumentation der CE-Konformität auf Systemebene jedoch abstützen und vereinfachen können.

Daher muss die Elektrolyseanlage dabei immer in Subsysteme unterteilt (Wasseraufbereitung, Elektrolyse-Stack, Wasserstoffaufreinigung) werden und es muss geprüft werden, ob für diese passende Produkt- oder Gruppennormen vorhanden sind.

3.7 Besonderheiten für Inverkehrbringung im Geltungsbereich des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG)

Eine Besonderheit besteht bzgl. der Einbindung von Wasserstoffherzeugungseinheiten in den Geltungsbereich des Energiewirtschaftsgesetzes. Ein Überblick über den Geltungsbereich ist im folgenden Schema in Anlehnung an DIN EN 14161 aufgeführt [14].



Legende

- | | | | |
|---|---------------------|---------------|-----------------------|
| 1) Bohrplatz | 4) Gas | 7) Tanklager | 10) Verteilung |
| 2) Sammelstation, Aufbereitungs- oder Prozessanlage | 5) Pumpstation | 8) Raffinerie | 11) Verdichterstation |
| 3) Flüssigkeit | 6) Armaturenstation | 9) Tank | 12) Druckregelstation |

- In diesem Dokument behandelte Rohrleitungsteile
- | Anschlüsse an andere Einrichtungen (das Rohrleitungssystem sollte an den Anschlussstellen zu anderen Einrichtungen und an Abzweigungen eine Absperrarmatur enthalten)
- - - - - Flüssigkeitsteile, die kein Gegenstand dieser Beschreibung sind
- In diesem Dokument behandelte(r) Station/Anlagenbereich

Abbildung 12: Umfang der behandelten Rohrleitungssysteme

Im Hinblick auf die Genehmigung von Wasserstoffgasnetzen müssen die blau hinterlegten Bereiche und Komponenten in Übereinstimmung mit dem EnWG ausgeführt sein. Die Anwendung des Regelwerks des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfachs (DVGW) induziert die Konformitätsvermutung.

Die Bereitstellung des Wasserstoffs erfolgt durch den Betreibenden der Wasserstoffproduktionsstätten, was im gelb hinterlegten Bereich dargestellt ist. Hier gelten bezüglich der Inverkehrbringung die Anforderungen gemäß Kapitel 3, wobei an der Übergabestelle in den blauen Bereich die Anforderungen des EnWG erfüllt sein müssen. Die ergänzende Anwendung des DVGW-Regelwerks innerhalb des gelben Bereichs ist fakultativ möglich und kann die Integrierbarkeit erleichtern. Im Originalschema der DIN EN 14161 sind die gelb hinterlegten Teile (1 und 2) als Bohrplatz (1) und Sammelstation, Aufbereitungs- oder Prozessanlage (2) ausgeführt. Im blauen Bereich, das heißt stromabwärts der Übergabestelle im Rohrleitungssystem sowie bei den nachfolgenden Verdichter- und Druckregelstationen, ist bei der Inverkehrbringung auf das DVGW-Regelwerk Bezug zu nehmen. Innerhalb des Anwendungsbereichs des EnWG für die sogenannten Energieanlagen ist die Anwendung des DVGW-Regelwerks nicht verpflichtend, es entsteht jedoch die DVGW-Konformitätsvermutung zu den Anforderungen der Gashochdruckleitungsverordnung (GasHDrLtgV). Einer der aktuell wesentlichen Bausteine des DVGW-Regelwerks bei der Umstellung auf eine Wasserstoffökonomie ist das DVGW-Regelwerk 463, in dem die wesentlichen Unterschiede von Wasserstoffanwendungen gegenüber den klassischen Anwendungsgebieten herausgearbeitet sind. Zur leichteren Orientierung, inwiefern die besonderen Belange von Wasserstoffanwendungen auch schon unmittelbar in einem der vielzähligen DVGW-Regelwerke berücksichtigt waren, werden diejenigen Regelwerke, die die Wasserstoffapplikation miteinschließen, durch ein „H₂ ready“-Symbol gekennzeichnet.

3.8 Anstehende und erwartbare Änderungen zu den Inhalten des 3. Kapitels

Mit einer zunehmend vernetzten Welt steigen auch stets die Anforderungen an die Sicherheit und den Schutz vor Angriffen auf vernetzte Systeme. Besonderem Schutz unterliegen die kritischen Infrastrukturen (KRITIS), die als Organisationen und Einrichtungen eine wichtige Bedeutung für die Gesellschaft haben [15]. Ihr Ausfall oder ihre Beeinträchtigung würde in einer massiven Störung der öffentlichen Sicherheit oder Versorgungsengpässen resultieren. Die Sektoren der kritischen Infrastrukturen sind:

- Energiesektor
- Informationstechnologie (IT) und Telekommunikation (TK)
- Transport und Verkehr
- Gesundheit
- Medien und Kultur
- Wasser
- Ernährung
- Finanz- und Versicherungswesen
- Abfallentsorgung
- Staat und Verwaltung

Kritische Infrastrukturen müssen ein Mindestmaß an Sicherheit in Bezug auf die Sicherheit in der Informationstechnologie aufweisen. Diese sind durch das IT-Sicherheitsgesetz geregelt. Aufgrund ihrer Wichtigkeit werden diese gesetzlich durch den Staat kontrolliert. Verantwortliche Ministerien für KRITIS sind die Bundesministerien des Innern und für Heimat sowie für Katastrophenschutz und Katastrophenhilfe. KRITIS zielt darauf ab, die relativ neue Bedrohung durch Angriffe auf die Steuerbarkeit und Verfügbarkeit kritischer Infrastruktur zu behandeln. Im Speziellen sind hierbei Elektrolyseanlage im Fokus, die insbesondere bei Anschluss an das Versorgungsnetz durch Sabotagen die Energieversorgung weitreichend lähmen können, aber auch ein relevantes prozesstechnisches Risiko bei kompromittierter Steuerung darstellen können. In Kapitel 6 wird der Betrieb einer Elektrolyseanlage auch auf Basis der bereits bestehenden Richtlinien der Cyber-Sicherheit diskutiert. Somit sind in diesem Bereich bereits Schutzmaßnahmen etabliert, um potenziellen Cyber-Angriffen entgegenzuwirken. Dieses Thema wird sich auch in der neuen Maschinenverordnung wiederfinden. Elektrolyseanlagen wie auch Wasserstofftankstellen und stationäre Brennstoffzellen sind im Zuge der Digitalisierung zunehmend mit steuerbaren Komponenten ausgestattet. Dies birgt die Gefahr, dass beispielsweise bei einem Elektrolyseur oder einer stationären Brennstoffzelle steuerbare Ventile durch Einschreiten Dritter manipuliert werden können. Ein beabsichtigter oder unbeabsichtigter Eingriff darf zu keinem größeren Schaden oder gefährlichen Situationen führen. Zukünftig wird eine Konformitätserklärung das Referenzieren der neuen Richtlinien der Cyber-Sicherheit einfordern. Zudem soll ein neuer Cyber Resilience Act in Kraft treten, der regelt, dass ein Produkt über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg sowohl hard- als auch softwareseitig sicher ist.

Hinweis: Die erste unmittelbare Erwähnung erfolgt in der regulatorischen Neuordnung der Maschinensicherheit.

Die bereits im Jahr 2006 veröffentlichte Maschinenrichtlinie 2006/42/EG wird zukünftig durch die neue Maschinenverordnung (MVO) ersetzt werden. Die neue Verordnung wurde am 29.06.2023 mit der Registratur EU 2023/1230 veröffentlicht. Sie beinhaltet wesentliche Neuerungen, um die bereits seit über 15 Jahren gültige Maschinenrichtlinie im Sinne der fortschreitenden Digitalisierung zu aktualisieren. Zudem soll sowohl die globale Wettbewerbsfähigkeit der Europäischen Union aufrechterhalten als auch ein hohes Maß an Vertrauen in innovative Technologien geschaffen werden. Die wichtigste Neuerung in der neuen Maschinenverordnung wird die Integration von Themen wie künstlicher Intelligenz, maschinellem Lernen und Cyber-Sicherheit für regelbare Systeme (autonome und remote geregelte Anlagen) und Software sein. Im Allgemeinen tritt eine veröffentlichte Richtlinie oder Verordnung 20 Tage nach ihrer Veröffentlichung in Kraft, in diesem Fall zum 19.07.2023. Mit einer Übergangsfrist von 42 Monaten nach Veröffentlichung wird die neue Maschinenverordnung frühestens im Januar 2027 verpflichtend anzuwenden sein. Bis zu diesem Zeitpunkt darf die neue Maschinenverordnung nicht auf freiwilliger Basis angewandt werden. Bis dorthin behält die aktuelle Maschinenrichtlinie noch ihre Gültigkeit, jedoch sollten Hersteller bereits vorher Vorbereitungen treffen, um ab dem besagten Zeitpunkt Konformitätsbewertungsverfahren nach der neuen MVO durchzuführen. Am 30.03.2023 wurden die neuen EU-Produktsicherheitsvorschriften beschlossen. Die Veröffentlichung erfolgte am 10.05.2023 mit der Registratur EU 2023/988 und sie gelten ab dem 13.12.2024. Sie werden die Allgemeine Produktsicherheitsrichtlinie 2001/95/EG ablösen. Mit den neuen Richtlinien sollen Produktsicherheitsrückrufe sichergestellt und Sicherheitsrisiken minimiert werden. Produkte sollen zukünftig insbesondere im Bereich der Cyber-Sicherheit beurteilt werden.

4. Aussprache der Konformität

Die Konformität eines Produkts wird durch den Hersteller erklärt. Dieser hat zu überprüfen, dass bei der Konstruktion und der Herstellung seines Produkts die wesentlichen Anforderungen der europäischen Richtlinien und Verordnungen für stationäre Anwendungen umgesetzt wurden. Dies spiegelt die Einhaltung eines Mindestmaßes an Sicherheit wider. Sofern alle notwendigen Schritte, wie in Tabelle 4 dargestellt, erfolgreich durchlaufen wurden, kann im letzten Schritt das CE-Kennzeichen auf dem Produkt sichtbar angebracht und die Konformität somit ausgesprochen werden.

Die Anwendung gewisser Richtlinien und Verordnungen fordert, dass die Konformität nicht allein vom Hersteller ausgesprochen werden kann. Sowohl die Druckgeräterichtlinie als auch die ATEX-Richtlinie verlangen zumindest in Teilen die Begleitung und Überprüfung der erstellten Konformitätsbewertung durch eine notifizierte Stelle. Diese bescheinigt dem Hersteller, dass sein Produkt den europäischen Mindestanforderungen für den Markteintritt entspricht. Ob eine notifizierte Stelle bei der Konformitätsbewertung miteinbezogen werden muss oder nicht, ist in Tabelle 3 übersichtlich dargestellt.

Nach erfolgter Konformitätsbewertung kann der Hersteller sein Produkt im europäischen Wirtschaftsraum in Verkehr bringen und vertreiben. Sofern es sich um ein langlebiges Produkt handelt, das über viele Jahre produziert werden soll, muss der Hersteller während des Produktionszyklus darauf achten, dass der für die Inverkehrbringung relevante Stand der Technik sich fortwährend weiterentwickelt. Dies verpflichtet den Hersteller dazu, dass er stets Kenntnis über die aktuellen Sicherheitsnormen besitzt und überprüft, dass sein Produkt nach wie vor den gültigen Standards und dem etablierten Fachwissen entspricht. Sofern dies nicht der Fall ist, muss das Produkt einem neuen Konformitätsbewertungsverfahren unterzogen werden, damit die Übereinstimmung mit dem Stand der Technik gewährleistet bleibt und das Produkt sicher betrieben werden kann.

Sofern ein Produkt von einem Hersteller zu einem Betreiber übergeht, ist dieser für alle Änderungen am Produkt verantwortlich. Die Konformitätsbewertung wurde auf Basis des Originalzustands des Produkts ausgestellt, wie es final zum Betreiber überging. Die Realisierung etwaiger Änderungen oder Anpassungen des Produkts liegt nicht mehr in Herstellerhand. Sofern der Betreiber ein Produkt anpasst oder dieses verändert, geht die Herstellerverantwortung an ihn als Inverkehrbringer dieser Veränderung über. Dies hat zur Folge, dass die Produktmodifikation erneut einer Konformitätsbewertung unterzogen werden muss. Erst auf der Grundlage der konformen Inverkehrbringung ist es möglich, den sicheren Betrieb weiterhin zu gewährleisten. Wird dies nicht durchgeführt, kommt es im Zuge eines Vorfalls zur Haftung des Betreibers, da die CE-Konformität nicht aktualisiert wurde. Im Falle einer Umrüstung oder einer Erweiterung ist im Bedarfsfall ebenfalls für die Einbeziehung einer notifizierten Stelle zu sorgen.

5. Gesamtkonformität

In Bezug auf die Konformität ergeben sich verschiedene Fallgestaltungen. Insbesondere wenn ein Produkt beziehungsweise eine Anlage aus mehreren Anlagenteilen oder Komponenten besteht, stellt sich die Frage, wer für die Konformitätsbewertung der Gesamtanlage zuständig ist. Die einzelnen Anlagenteile sind jedenfalls durch die jeweiligen Hersteller CE-konform auszuführen und die jeweiligen Bewertungen sind in der technischen Dokumentation vorzuhalten. Durch den Zusammenbau der Anlage aus den Einzelteilen entstehen jedoch neue Risiken, die nicht durch die Konformitätsbewertungen der Einzelteile abgedeckt werden können.

In Hinblick auf die Gesamtkonformität sind folgende zwei Situationen zu unterscheiden.

1. Schlüsselfertige Anlagen

Bei der Bereitstellung von schlüsselfertigen Anlagen und Komplettsystemen durch einen Hersteller auf dem Markt liegt die Durchführung der Konformitätsbewertung der gesamten Anlage in dessen Verantwortung. Er hat dafür Sorge zu tragen, dass die verbauten Einzelkomponenten und Baugruppen konform sind. Risiken und Gefahren, die infolge des Zusammenbaus und des Zusammenspiels der Teile in der Gesamtanlage entstehen, sind von dem Hersteller, der die Gesamtanlage in Verkehr bringt, zu beurteilen und etwaige Sicherheitsrisiken sind von ihm zu beseitigen.

Vergleichbar ist die Situation, wenn Dritte vom Betreiber mit dem Bau einer Gesamtanlage beauftragt werden und diese betriebsbereit an den Betreiber übergeben wird. Dritte können zum Beispiel Generalunternehmer oder Handwerker sein. Nach den Inverkehrbringenvorschriften werden diese dann zum Hersteller der Gesamtanlage.

Die Durchführung der Konformitätsbewertung der Anlage obliegt in diesem Fall dem vom Betreiber beauftragten Dritten. Dieser hat nach den anzuwendenden Rechtsvorschriften eine Konformitätserklärung auszustellen und die Anlage oder Anlagenteile entsprechend zu kennzeichnen.

2. Vom Betreiber selbst erstellte Anlagen

Außerdem gibt es die Variante, dass eine Anlage komplett oder in Teilen erst in der Verantwortung des Betreibers entsteht, also erst vom Betreiber zusammengebaut wird.

Sofern der Betreiber Arbeitnehmer beschäftigt, muss er auf Grundlage einer Gefährdungsbeurteilung die Gesamtheit der Arbeits- und Betriebsmittel so wählen und gestalten, dass deren Verwendung innerhalb der Arbeitsorganisation dem Stand der Technik entspricht und nicht tolerierbare Risiken bei der ordnungsgemäßen Verwendung ausgeschlossen sind. Die Konformitätsbewertung für die Gesamtanlage einschließlich der Gesamtkonformitätserklärung stellt für den Betreiber als Arbeitgeber des Betriebspersonals eine verlässliche Quelle für die Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung dar. Es ist daher sinnvoll und hilfreich, wenn der Betreiber in diesem Fall eine Konformitätsbewertung durchführt.

Beschäftigt der Betreiber keine Arbeitnehmer, so ist er jedenfalls verantwortlich und haftbar dafür, dass die Anlage sicher betrieben wird. Die Bewertung der Gesamtkonformität vermittelt dem Betreiber auch hier eine Grundlage und Dokumentation für den sicheren Betrieb der Anlage.

6. Kriterien für den Betrieb einer Anlage

6.1 Betriebliche Nutzung von H₂-Anlagen

Sobald eine Prozessanlage genehmigt und in Betrieb genommen wurde, untersteht sie der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV). Diese regelt den sicheren Betrieb einer Anlage oder eines Arbeitsmittels im Sinne des Arbeitsschutzes. Ziel dieser Verordnung ist es, „die Sicherheit und den Schutz der Gesundheit von Beschäftigten bei der Verwendung zu gewährleisten“. Dabei ist es wichtig, geeignete Arbeitsmittel auszuwählen, auf die Wahl der geeigneten Gestaltung von Arbeits- und Fertigungsverfahren zu achten und die Qualifikationen und Unterweisungen von Mitarbeitenden zu priorisieren.

Das durch die BetrSichV definierte Schutzkonzept ist wie folgt gegliedert:

- Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung für das Arbeitsmittel
- Durchführung einer sicherheitstechnischen Bewertung für überwachungsbedürftige Anlagen
- Beachtung des aktuellen Stands der Technik
- Einführung von Schutzmaßnahmen und Prüfungen (wiederkehrende Prüfung, Prüfung vor Inbetriebnahme)

Anhand der Risiken, die in der Betriebsanleitung (immer in der jeweiligen Landessprache, in der die Anlage in Verkehr gebracht wird) beschrieben werden, muss in Kombination mit der Arbeitsumgebung eine Gefährdungsbeurteilung der Anlage durchgeführt werden. In dieser werden geeignete Schutzmaßnahmen identifiziert und im Betrieb umgesetzt. Dabei ist die Gefährdungsbeurteilung eine Form der Risikoanalyse und immer durch den Arbeitgeber zu erstellen, der dafür fachkundiges Personal einsetzt. Es ist darauf zu achten, dass eine vorhandene CE-Kennzeichnung einer Anlage den Betreiber nicht von seiner Pflicht der Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung befreit.

Die Erstellung der Gefährdungsbeurteilung beginnt bereits mit der Auswahl und der Beschaffung einer Anlage. Dabei wird geprüft, ob die Anlage für die geplante Verwendung geeignet ist und in Arbeitsabläufe und die Arbeitsorganisation integriert werden kann. Vor der erstmaligen Verwendung sind die Gefährdungsbeurteilung sowie die Ermittlung und Umsetzung notwendiger und geeigneter Schutzmaßnahmen vorzunehmen.

Hinweis: Eine durchgeführte Gefährdungsbeurteilung muss während des Betriebs fortwährend überprüft und auch stets aktualisiert werden, sobald die Anlage sicherheitsrelevant verändert wurde oder neue sicherheitstechnische Erkenntnisse gefunden wurden. Die Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung ist in der Technischen Regel für Betriebssicherheit TRBS 1111 beschrieben [16].

Sobald in Anlagen brennbare oder explosive Medien prozessiert werden, muss die Gefährdungsbeurteilung um ein Explosionsschutzdokument erweitert werden. Darin werden die Gefährdungen, die von diesen Medien ausgehen, gesondert ausgewiesen. Das Erstellen des Explosionsschutzdokuments basiert auf der Gefahrstoffverordnung, die besagt, dass festgestellt werden muss, ob während des Betriebs einer Anlage durch die verwendeten Medien eine explosionsfähige Atmosphäre gebildet werden kann. Der Inhalt dieses Dokuments ist ebenfalls in der BetrSichV geregelt:

- Beschreibung der Anlage
- Ermittlung der Gefährdungen durch Explosion und der potenziell freiwerdenden Mengen
- Explosionsschutzkonzept
- Einteilung in Schutzzonen
- Regelung der Zusammenarbeit verschiedener Firmen
- Prüfungen zum Explosionsschutz

Überwachungsbedürftige Anlagen haben innerhalb der BetrSichV eine Sonderstellung. Diese dürfen nur in Betrieb genommen werden, wenn sie den vorherrschenden Anforderungen des Produktsicherheitsgesetzes und dessen nationaler Umsetzung genügen. Zudem ist zu überprüfen, ob die Erlaubnispflicht (§ 18) bei einer Behörde eingeholt werden muss.

Hinweis: Die Bundesimmissionsschutz-Verordnungen (BImSchV) enthalten gegebenenfalls zusätzliche Erlaubnispflichten.

Von überwachungsbedürftigen Anlagen gehen besondere Gefahren aus, wie beispielsweise Druck, Explosion oder Absturz. Abschnitt 3 der BetrSichV regelt, dass solche Anlagen einer Prüfung vor Inbetriebnahme (§ 15) und wiederkehrenden Prüfungen (§ 16) durch eine ZÜS unterzogen werden müssen. Zu den überwachungsbedürftigen Anlagen zählen:

- Druckbehälteranlagen (Elektrolyseanlagen, betriebliche Gashochdruckspeicher)
- Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen
- Leitungen unter innerem Überdruck für brennbare Gase
- Befüllanlagen
- Wasserstofftankstellen

Hinweis: Wird eine Energieanlage nicht innerhalb der BetrSichV betrachtet, sondern im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG), ist sie nicht überwachungsbedürftig im Sinne der BetrSichV. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass eine Energieanlage den Anforderungen der neu verabschiedeten Cyber-Sicherheitsrichtlinie entsprechen muss.

Die Prüfung vor Inbetriebnahme (PvI) stellt sowohl die Prüfung aller technischen Unterlagen auf Vollständigkeit und Plausibilität als auch die Prüfung der Anlage dar. Sofern eine prüfpflichtige Änderung an der Anlage vorgenommen wird, ist erneut eine PvI durchzuführen. Die wiederkehrende Prüfung findet in regelmäßigen Abständen (maximale Prüffristen) statt und soll die fortwährende sichere Verwendung der Anlage gewährleisten. Bei einem Druckgerät würden beispielsweise die folgenden Prüfungen durchgeführt werden:

- äußere Prüfung
- innere Prüfung
- Festigkeitsprüfung

Hinweis: Die Prüfmethode und der Prüfumfang müssen dabei jeweils vom Arbeitgeber selbst festgelegt werden.

Sofern Wasserstoffproduktionsanlagen als Teil von Energieanlagen im Sinne des EnWG im Verbund der Gashochdruckleitungen integriert sind, ist der Betrieb außerhalb der Übergabestellen nicht mehr von der Betriebssicherheitsverordnung abgedeckt. Der Flussrichtung des Wasserstoffs folgend, findet nach den Übergabestellen das EnWG Anwendung. Heutzutage sind unsere Gesellschaft und die Industrie stark von einer intakten Energieversorgung abhängig. Das Fehlen von Strom und Gas kann innerhalb von Minuten den Ausfall lebensnotwendiger Dienstleistungen herbeiführen. Daher ist die Integration von Anlagen (insbesondere auch Elektrolyseanlagen) ins Energienetz von besonderer Bedeutung. Diese Anlagen müssen Mindeststandards zum Schutz gegen Bedrohungen für elektronische Datenverarbeitungssysteme erfüllen, sodass ein sicherer Netzbetrieb gewährleistet werden kann. Hierzu wurden zwei IT-Sicherheitskataloge veröffentlicht:

- Sicherheitskatalog für Betreiber von Strom- und Gasnetzen
- Sicherheitskatalog für Betreiber von Energieanlagen

Basis dieser Sicherheitskataloge bilden die Cyber-Sicherheits-ISO-Normen 27001, 27002 und 27019. Die Normen basieren inhaltlich aufeinander. Die ISO 27002 wurde umfassend überarbeitet und im Frühjahr 2022 in der dritten Version veröffentlicht. Im Jahr 2024 wird eine Aktualisierung der ISO 27019 erfolgen.

6.2 Private Nutzung von Wasserstoffanlagen

Die Anwendbarkeit der BetrSichV ist auf betriebliche Kontexte im Rahmen unternehmerischen Handelns beschränkt. Für die private Anwendung greift folglich keine Erlaubnispflicht, die sich aus der BetrSichV unmittelbar ableitet. Wie oben dargestellt, entstehen auch durch andere rechtliche Rahmenbedingungen Erlaubnispflichten, deren unmittelbare Wirkung im Hinblick auf privat betriebene Wasserstoffinfrastruktur bisher keine nennenswerte Relevanz hatte.

Es bedarf folglich einer Einzelprüfung, inwiefern das BImSchG eine Genehmigungspflicht mit der der BImSchV eigenen Konzentrationswirkung für niederrangige Genehmigungsverfahren induziert, zum Beispiel der Bauprodukteverordnung, der Umweltverträglichkeitsprüfung oder des Wasserhaushaltsgesetzes.

Eine Genehmigungspflicht nach BImSchG entsteht gemäß nachfolgenden Kriterien [17]:

- ≥ 3 Tonnen (H_2) → Vereinfachtes Verfahren § 19 BImSchG
- ≥ 30 Tonnen (H_2) → Genehmigungsverfahren § 10 BImSchG

Ergänzend [18]:

- 12. BImSchV > 5 Tonnen (H_2) Störfallbetrieb untere Klasse
- 12. BImSchV > 50 Tonnen (H_2) Störfallbetrieb obere Klasse

Es erfolgt eine anteilige Anrechnung beziehungsweise Aggregationswirkung gemäß den in 12. BImSchV Anhang 1 aufgeführten Mengenschwellen für weitere Brenn- und Gefahrstoffe.

Mittels § 26 des BImSchG kann bei besonders hoher Gefährdung von Menschen oder der Umwelt der Betrieb einer Anlage untersagt werden. Dieser Paragraph kann auch dann anwendbar sein, wenn das Betreiben der Anlage durch eine nicht ausreichend qualifizierte Privatperson erfolgt.

Inwiefern durch die niederrangigen Genehmigungsverfahren die Möglichkeit zur Intervention durch die beteiligten Behörden auch für Privatanlagen besteht, ist Gegenstand der laufenden Diskussionen.

7. Zusammenfassung

Dieser Konformitätsleitfaden wurde zur übersichtlichen Darstellung der wichtigsten Aspekte im Rahmen der Bewertung von CE-Konformitätserklärungen als wichtiger Bestandteil von Genehmigungsverfahren stationärer Anlagen erstellt.

Dabei wurden zuerst die wichtigsten Wasserstofftechnologien entlang der Wertschöpfungskette übersichtlich und im Hinblick auf sicherheitsrelevante Eigenschaften und deren Kenngrößen wie beispielsweise Betriebsdruck- und Temperatur erläutert.

Zur Inverkehrbringung und Genehmigung solcher Anlagen ist eine Konformitätsbewertung durchzuführen. Die für das Bewertungsverfahren wichtigsten Richtlinien und Verordnungen wurden übersichtlich dargestellt. Zudem wurden anschließend die für die jeweilige Wasserstofftechnologie spezifizierten Richtlinien oder Verordnungen dargestellt. Die zu den jeweiligen Richtlinien und Verordnungen zugehörigen harmonisierten Normen wurden anhand von Produkt- oder Gruppennormen für die unterschiedlichen Wasserstofftechnologien aufgeführt und diskutiert.

Zudem wurde die Verantwortlichkeit der Aussprache der Konformität basierend auf der Konformitätserklärung geklärt. Die Aussprache der Konformität wurde auch auf den Rahmen einer Gesamtanlage erweitert und die damit einhergehenden Verpflichtungen für den Betreiber einer Anlage wurden erläutert.

Ebenso wurden Kriterien zum sicheren Betrieb einer Anlage basierend auf der Betriebssicherheitsverordnung diskutiert und erläutert. Insbesondere der Betrieb von überwachungsbedürftigen Anlagen wurde beleuchtet und es wurde auf die Besonderheiten dieser Anlagen hingewiesen. Zusätzlich wurden die unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten des Betriebs einer Anlage auf einem Betriebsgelände oder innerhalb des Gasnetzes diskutiert. In diesem Zusammenhang wurde das zukünftig bedeutsame Thema der Cyber-Sicherheit erläutert.



Literaturverzeichnis

[1]

VDI 4635 Blatt 1.2. URL <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4635-blatt-12-power-to-x-systemische-aspekte> – abgerufen am 10.07.2023.

[2]

VDI 4635 Blatt 3.1. URL <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4635-blatt-31-power-to-x-wasserstoff-erzeugung-durch-wasserelektrolyse> – abgerufen am 10.07.2023.

[3]

Schmidt, T. (2020): Wasserstofftechnik: Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

[4]

Plank-Wiedenbeck, U. (2019): https://tlubn.thueringen.de/fileadmin/001_TMUEN/Unsere_Themen/Energie/Elektromobilitaet/schlussbericht_machbarkeitsstudie_pilotprojekt_h2bz-triebwagen.pdf.

[5]

Barthélémy, H. (2012): „Hydrogen storage – industrial perspectives“. In: International Journal of Hydrogen Energy, Jahrgang: 37, 22, S. 17364–17372.

[6]

ISO 19880-1: Allgemeine Anforderungen. URL <https://www.iso.org/standard/71940.html> – abgerufen am 10.07.2023.

[7]

Kurzweil P. (2016): Brennstoffzellentechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg.

[8]

NANDO Datenbank. URL <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm> – abgerufen am 10.07.2023.

[9]

Zugang zum EU-Recht. URL <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html?locale=de> – abgerufen am 10.07.2023.

[10]

Blue Guide. URL [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022XC0629\(04\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022XC0629(04))

– abgerufen am 10.07.2023.

[11]

Richtlinie über allgemeine Produktsicherheit.

URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001L0095> – abgerufen am

10.07.2023.

[12]

Harmonisierte Normen. URL https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/european-standards/harmonised-standards_de – abgerufen am 10.07.2023.

[13]

DIN EN 17127. URL <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-17127/288864172> – abgerufen am 10.07.2023.

[14]

DIN EN 14161. URL <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-14161/233444405> – abgerufen am 10.07.2023.

[15]

KRITIS. URL https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/kritische-infrastrukturen_node.html – abgerufen am 10.07.2023.

[16]

TRBS 1111. URL <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/TRBS-1111.html> – abgerufen am 10.07.2023.

[17]

BImSchG. URL <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/> – abgerufen am 10.07.2023.

[18]

BImSchV. URL https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_1_2010/ – abgerufen am 10.07.2023.

Anhang

A1. Anwendungsbeispiel formell korrekte CE-Konformitätserklärung – Brennstoffzellensystem

Eine formell korrekte CE-Konformitätserklärung umfasst die CE-Erklärung durch den Hersteller, Inverkehrbringer oder EU-Bevollmächtigten unter Verweis auf die Gesamtheit der anzuwendenden Richtlinien samt Referenz auf die zur Konformitätsbewertung herangezogenen Normen und Regelwerke.

In Tabelle 10 wurden die wesentlichen für die Inverkehrbringung von Brennstoffzellensystemen relevanten Richtlinien aufgeführt:

Technologie: stationäre Brennstoffzellen	
Verordnung/Richtlinie	Nr.
Druckgeräterichtlinie	19
RoHS-Richtlinie	23
Niederspannungsrichtlinie	12
Maschinenrichtlinie	13
Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit	6

Quelle: eigene Darstellung

Für die Inverkehrbringung ist stets der Blue Guide zu beachten, der die Übereinstimmung mit allen relevanten Richtlinien vorschreibt. Aus dieser generellen Anforderung leiten sich mehrere Möglichkeiten einer formell korrekten Inverkehrbringung ab.

- a) Die EN 62282-3-100 ist mit der Niederspannungsrichtlinie harmonisiert. Durch deren Anwendung resultiert die Konformitätsvermutung mit der Niederspannungsrichtlinie im Hinblick auf elektrische Gefahren. Für die Übereinstimmung mit der Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit 2014/30/EU müssen Aspekte der elektromagnetischen Verträglichkeit in Überlappung zu etwaigen bereits in der Norm vorgeschriebenen Anforderungen nachgewiesen werden. Vorteilhaft ist zum Beispiel der Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit durch die mit der 2014/30/EU harmonisierten Normen aus der EN 61000-Reihe.

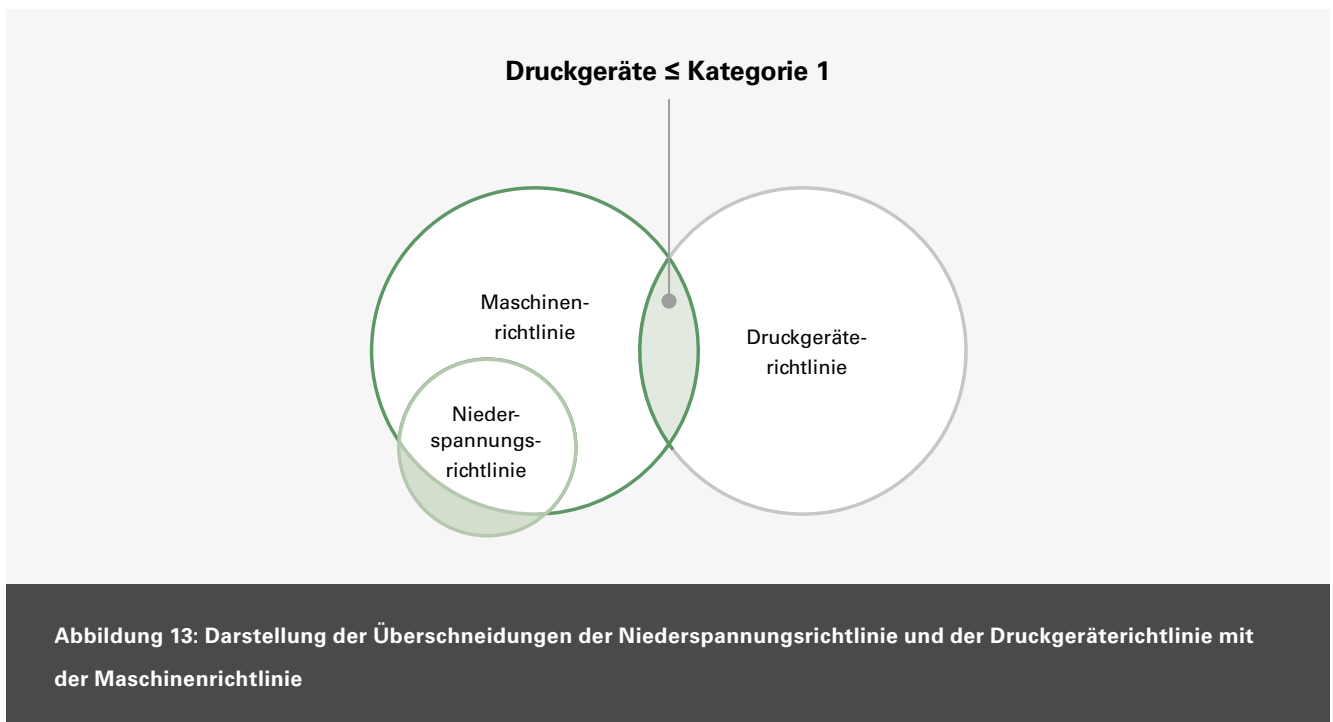
Bei Brennstoffzellensystemen, die zumindest in Teilsegmenten einen Überdruck $> 0,5$ bar in den Mediensträngen aufweisen (können), ist ergänzend die Druckgeräterichtlinie anwendbar. Jedoch findet bei den häufig geringen Volumina in diesen Mediensträngen, zum Beispiel „H₂-Medienstrang“, die „gute Ingenieurpraxis“ (Artikel 4.3 in der Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU) Anwendung, die eine auf die Druckgeräterichtlinie bezugnehmende CE-Kennzeichnung formell ausschließt.

- b) In Brennstoffzellensystemen ist üblicherweise mindestens eine Subkomponente gemäß Maschinenrichtlinie in Verkehr gebracht. Aus der in der Maschinenrichtlinie vorgenommenen Definition einer Maschine:

„[...] eine mit einem anderen Antriebssystem als der unmittelbar eingesetzten menschlichen oder tierischen Kraft ausgestattete oder dafür vorgesehene Gesamtheit miteinander verbundener Teile oder Vorrichtungen, von denen mindestens eines bzw. eine beweglich ist und die für eine bestimmte Anwendung zusammengefügt sind.“

leitet sich die formelle Möglichkeit ab, die Gesamtheit der mit der auslösenden „Maschine“ verbundenen Teile als „vollständige Maschine“ zu deklarieren.

Die Maschinenrichtlinie aggregiert neben spezifischen Inhalten zur Definition der beweglichen Einheiten auch Inhalte der Niederspannungsrichtlinie, der Druckgeräterichtlinie und der Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit, was die folgende Abbildung verdeutlicht:



In der Folge ist die Nennung der von der Maschinenrichtlinie (teil-)abgedeckten Richtlinien und Verordnungen nur in begründeten Ausnahmefällen möglich und üblicherweise aus formellen Gründen nicht erlaubt.

Hinweis: Der Ausschluss der parallelen Anwendung der Niederspannungsrichtlinie durch die Maschinenrichtlinie führt formell zum Wegfall der Konformitätsvermutung mittels Anwendung der EN 62282-3-100 im Hinblick auf die elektrischen Gefahren.

Beide Möglichkeiten a) und b) der Inverkehrbringung sind formell möglich. Es wird jedoch empfohlen, bei der Wahl der Richtlinien zwischen Haupt- und Nebenfunktionalitäten des in Verkehr zu bringenden Produkts zu unterscheiden.

A2. Anwendungsbeispiel formell korrekte CE-Konformitätserklärung – Elektrolyseanlage

Gemäß der nachfolgenden Tabelle, wie in Tabelle 5 bereits dargestellt, unterscheiden sich die üblicherweise für Elektrolyseanlagen zu beachtenden Richtlinien nur unwesentlich von denen des Brennstoffzellensystems.

Technologie: Alkali- und PEM-Elektrolyseanlagen	
Verordnung/Richtlinie	Nr.
Druckgeräterichtlinie	19
RoHS-Richtlinie	23
Niederspannungsrichtlinie	12
Maschinenrichtlinie	13
Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen	7
Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit	6

Quelle: eigene Darstellung

Das nachfolgende Beispiel soll auf die Besonderheiten hinweisen, die aufgrund etwaiger Freisetzungsmöglichkeiten von Wasserstoff bereits bei der Inverkehrbringung zu berücksichtigen sind.

- a) Die Elektrolyseanlage beziehungsweise -einheit gefährdet sich selbst nicht durch eine erwartbare, gegebenenfalls kontrollierbare Freisetzung von brennbarem Gas an den Grenzflächen zur Umgebung. Sie kann und darf weiterhin nicht in einer bezüglich Explosionsschutz relevanten Zone betrieben werden. In der Folge ist es ausreichend und in der Verantwortung des Herstellers verbleibend, den elektrischen Gefahren durch Übereinstimmung des Designs mit der Niederspannungsrichtlinie zu genügen.

- b) Die Elektrolyseanlage beziehungsweise -einheit lässt eine wesentliche Freisetzung von brennbarem Gas an den Grenzflächen zur Umgebung samt Bildung von explosionsfähigen Gemischen erwarten, die Auswirkungen auf den eigenen Betrieb haben kann. Sie kann und darf weiterhin auch und alternativ in einer bezüglich Explosionsschutz relevanten Zone betrieben werden. In der Folge müssen Zündquellen vermieden werden, den elektrischen Gefahren muss durch Übereinstimmung des Designs mit der ATEX-Richtlinie Genüge getan werden.

In der Folge können und dürfen die Niederspannungsrichtlinie und die ATEX-Richtlinie nicht gleichzeitig in CE-Konformitätserklärungen aufgeführt sein. Die Anforderungen der ATEX-Richtlinie sind erwartbar höher als diejenigen der Niederspannungsrichtlinie. Die CE-Konformitätserklärung für die Elektrolyseanlage erfordert auch die Nennung der weiteren anzuwendenden Richtlinien, um die Konformität des Produkts umfänglich zu dokumentieren. Auch für Elektrolyseanlagen ist auf die in Beispiel A1 angeführten Besonderheiten im Umgang mit der Maschinenrichtlinie Rücksicht zu nehmen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Überblick der Wasserstoff-Wertschöpfungskette von der Herstellung bis zum Verbrauch	6
Abbildung 2:	Fließbild einer Power-to-Gas-Anlage mit Elektrolysezelle und benötigter Peripherie zur Herstellung von Wasserstoff	9
Abbildung 3:	Schematische Darstellung eines Alkali-Elektrolyseurs mit den wichtigsten Komponenten	10
Abbildung 4:	Schematische Darstellung eines PEM-Elektrolyseurs mit den wichtigsten Komponenten	12
Abbildung 5:	Beispiel zum Transport von komprimiertem gasförmigem Wasserstoff mittels Flaschenbündeln in einem LKW-Trailer, die befüllt und am Bestimmungsort zur Befüllung von Tanks verwendet werden können	17
Abbildung 6:	Übersicht über die unterschiedlichen Tankausführungen für die Lagerung von gasförmigem Wasserstoff	18
Abbildung 7:	Übersicht über einen Tank zur Lagerung von LH_2	20
Abbildung 8:	Übersicht einer Wasserstofftankstelle mit den wichtigsten Komponenten	22
Abbildung 9:	Schemazeichnung einer PEM-Brennstoffzelle mit den wichtigsten Komponenten	23
Abbildung 10:	Pyramidenförmiger Aufbau des Normierungskonzepts	33
Abbildung 11:	Unterschiedliche Herangehensweisen an das Konformitätsbewertungsverfahren	36
Abbildung 12:	Umfang der behandelten Rohrleitungssysteme	42
Abbildung 13:	Darstellung der Überschneidungen der Niederspannungsrichtlinie und der Druckgeräterichtlinie mit der Maschinenrichtlinie	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auswahl behandelter Wasserstofftechnologien	8
Tabelle 2:	Übersicht über Brennstoffzellentechnologien und deren Charakteristika	25
Tabelle 3:	Übersicht der europäischen Verordnungen und Richtlinien für stationäre Anwendungen	28
Tabelle 4:	Ablauf einer EU-Konformitätsbewertung	29
Tabelle 5:	Relevante Verordnungen und Richtlinien für Elektrolyseure	30
Tabelle 6:	Relevante Verordnungen und Richtlinien für LKW-Trailer (Be-/Entladestelle)	30
Tabelle 7:	Relevante Verordnungen und Richtlinien für betriebliche Gashochdruckspeicher	30
Tabelle 8:	Relevante Verordnungen und Richtlinien für Flüssigwasserstoffspeicher	31
Tabelle 9:	Relevante Verordnungen und Richtlinien für Wasserstofftankstellen	31
Tabelle 10:	Relevante Verordnungen und Richtlinien für stationäre Brennstoffzellen	31
Tabelle 11:	Hauptgefahren und Schwellenwerte beziehungsweise Definitionen für ausgewählte Richtlinien mit Relevanz für Wasserstoffapplikationen	35

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

AEL	Alkali-Elektrolyse	O ₂	Sauerstoff
AEM	Alkalische Membran-Elektrolyse	OH ⁻	Hydroxidion
AFIR	Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe	PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung	PGM	Platin-Gruppen-Metalle
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz	PvI	Prüfung vor Inbetriebnahme
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung	RL	Richtlinie
BHKW	Blockheizkraftwerk	SOEL	Hochtemperatur-Elektrolyse
CEN	Europäisches Komitee für Normung	TK	Telekommunikation
CENELEC	Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung	TRBS	Technische Regel für Betriebssicherheit
CGH ₂	Komprimierter gasförmiger Wasserstoff	VO	Verordnung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	<i>U</i>	Spannung/V
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs	ÜAnlG	Gesetz über überwachungsbedürftige Anlagen
e ⁻	Elektron	ZÜS	Zentrale Überwachungsstelle
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz	σ	Elektrische Leitfähigkeit
ETSI	Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen		
EU	Europäische Union		
GasHDrLtgV	Gashochdruckleitungsverordnung		
H ⁺	Wasserstoff-Ion		
H ₂	Wasserstoff		
H ₂ O	Wasser		
IT	Informationstechnologie		
K ₂ CO ₃	Kaliumcarbonat		
KOH	Kalilauge		
KRITIS	Kritische Infrastrukturen		
LH ₂	Flüssigwasserstoff		
MEA	Membran-Elektroden-Einheit		
MLI	Multi Layer Insulation		
MRT	Magnetresonanztomographie		
MVO	Maschinenprodukte-Verordnung		
NANDO	Datenbank der notifizierten Stellen		
NoBo	Notifizierte Stelle		

Impressum

Autoren

TÜV SÜD Industrie Service GmbH
Westendstraße 199, 80686 München
Christian Schüßler, Florian Michl

Herausgeber

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft
Baden-Württemberg

Realisation der Publikation und Gesamtedaktion

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue
Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg
Alina Richter, Hedda Benkert
www.e-mobilbw.de

Koordination und inhaltliche Redaktion

Ref. 42 UM Immissionsschutz, Störfallvorsorge

Bildnachweise

Umschlag: © Scharfsinn86/istockphoto

Die Bildrechte liegen, soweit nicht direkt im Bild vermerkt, bei den in der Bildunterschrift jeweils angegebenen Unternehmen und Institutionen.

Layout/Satz/Illustration

markentrieb – Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Druck

Karl Elser Druck GmbH

1. Auflage, 250 Stück, Stand: November 2023

Genereller Hinweis: Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei zusammengesetzten personenbezogenen Substantiven in dieser Studie die männliche Form verwendet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter. Die verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe und beinhaltet keine Wertung.



Disclaimer

Wir haben uns bemüht, die Inhalte auf Qualität, Zuverlässigkeit und Korrektheit hin zu überprüfen. Trotz sorgfältiger Bearbeitung bleibt eine Gewährleistung oder Haftung für die Richtigkeit der in der Publikation verwendeten Informationen ausgeschlossen, soweit uns kein vorsätzliches oder grob fahrlässiges Handeln nachgewiesen werden kann.

Unser Angebot enthält unter Umständen Links zu externen Webseiten Dritter, auf deren Inhalte wir keinen Einfluss haben.

Für die Inhalte der verlinkten Seiten ist stets der jeweilige Anbieter oder Betreiber der Seiten verantwortlich. Für die Inhalte und die Richtigkeit der Informationen verlinkter Websites fremder Informationsanbieter wird keine Gewähr übernommen.

Die vorliegende Publikation beinhaltet allgemeine Informationen zu einem bestimmten Thema beziehungsweise zu bestimmten Themen und hat nicht den Anspruch, vollständig zu sein. Dementsprechend können die Informationen aus dieser Publikation keine Beratung oder fachliche Empfehlung darstellen. Wenn Sie eine Beratung zu bestimmten Inhalten der Publikation wünschen, dann sollten Sie uns – wenn möglich – direkt mit Ihrem Anliegen kontaktieren oder den Rat eines Fachmanns suchen. Die Inhalte auf diesen Seiten unterliegen dem deutschen Urheberrecht. Die Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und jede Art der Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtes bedürfen der schriftlichen Zustimmung des jeweiligen Autors beziehungsweise Erstellers. Streitigkeiten in Zusammenhang mit der Nutzung der in dieser Publikation enthaltenen Informationen unterliegen der ausschließlichen Gerichtsbarkeit der Gerichte in München sowie den Gesetzen der Bundesrepublik Deutschland. Alle Rechte vorbehalten.

