




Berichte
des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung

Bericht 47 (2024)



Entwicklung eines bahnspezifischen Standards für Wasserstoffanwen- dungen in Schienenfahrzeugen



Berichte des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung, Bericht 47 (2024)
Projektnummer 2020-7-W-1202

Entwicklung eines bahnspezifischen Standards für Wasserstoffanwendungen in Schienenfahr- zeugen

von

Michael Enders, Bernd Schönauer
TÜV Rheinland InterTraffic GmbH, Köln

im Auftrag des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

Impressum

HERAUSGEBER

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

August-Bebel-Straße 10
01219 Dresden

www.dzsf.bund.de

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

TÜV Rheinland InterTraffic GmbH
Am Grauen Stein
51105 Köln

ABSCHLUSS DER STUDIE

November 2022

REDAKTION

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung
Philipp Streek, Forschungsbereich Umwelt und nachhaltige Mobilität

BILDNACHWEIS

[Pixabay.com/Titelinnenseite](https://pixabay.com/Titelinnenseite)

PUBLIKATION ALS PDF

<https://www.dzsf.bund.de/Forschungsergebnisse/Forschungsberichte>

ISSN 2629-7973

[doi: 10.48755/dzsf.240001.01](https://doi.org/10.48755/dzsf.240001.01)

Dresden, April 2024



This work is openly licensed via CC BY 4.0.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung	7
Abstract	8
1 Einleitung.....	10
2 Methodisches Vorgehen	12
3 Systemdefinition.....	13
3.1 H ₂ -Antrieb, Funktionsweise	13
3.2 H ₂ -Antrieb (BZ), Systemaufbau	14
3.2.1 Basis-Architektur des Brennstoffzellen-Antriebs.....	14
3.3 H ₂ -Antrieb, Schnittstellen.....	15
3.3.1 Schnittstellen des H ₂ -Antriebssystems zu anderen fahrzeugseitigen Systemen und Komponenten.....	17
3.3.2 Schnittstellen des H ₂ -Antriebssystems zur Umgebung.....	18
3.3.3 Schnittstellen des H ₂ -Antriebssystems zu Personen	18
3.4 Varianten von Schienenfahrzeugen.....	19
3.5 Infrastruktur des Schienenverkehrs	19
3.6 Einsatz- und Umgebungsbedingungen im Schienenverkehr.....	20
3.7 Betriebsbedingungen.....	21
4 Risiko- und Gefährdungsanalyse	22
4.1 Begriffe und Definitionen	22
4.2 Gefährdungsidentifikation.....	23
4.3 Unfallszenarien.....	25
4.3.1 Unfallszenario Explosion, Brand und/oder Stromschlag (u. a. ACC-01)	27
4.3.2 Unfallszenario Arbeitsunfall (ACC-03)	28
4.3.3 Unfallszenario Fahrzeug kann Gefahrenbereich nicht oder nur verzögert verlassen (ACC-09)	29
4.3.4 Unfallszenario Kollision, Entgleisung etc. (ACC-10)	29
4.3.5 Unfallszenario Kontamination von Personen (ACC-11).....	29
4.4 Initiale Risikobewertung.....	30
4.4.1 Methodik der initialen Risikobewertung.....	30
4.4.2 Resultat der initialen Risikobewertung	33
4.5 Maßnahmenplanung.....	33
4.6 Finale Risikobewertung.....	34

4.6.1	Methodik der finalen Risikobewertung.....	34
4.6.2	Resultat der finalen Risikobewertung	35
5	Normrecherche.....	37
5.1	Allgemeines	37
5.2	Vorgehensweise	38
6	Zusammenfassung	40
7	Abbildungsverzeichnis.....	41
8	Tabellenverzeichnis	42
9	Quellenverzeichnis	43
10	Anlagen.....	44
11	Anhang – Diskussionsentwurf für eine Richtlinie	45
11.1	Geltungsbereich.....	45
11.2	Aufbau des Dokumentes	45
11.3	Begriffsbestimmungen.....	45
11.4	Einleitung	46
11.5	Personenschutz und Brandschutz.....	49
11.6	Qualifikation des Wasserstoffsystems	49
11.6.1	Materialeigenschaften.....	49
11.6.2	Komponentenqualifikation	51
11.6.3	Prüfung des Druckwasserstoff-Speichersystems	53
11.6.4	Fahrzeuggesamtsystem	54
11.6.5	Zusätzliche Montageanforderungen.....	57
11.6.6	Dokumentation	57
11.7	Validierung/Prüfungen am Fahrzeug.....	57
11.7.1	Erstprüfungen.....	57
11.7.2	Wiederkehrende Prüfungen.....	57
11.8	Quellenverzeichnis.....	58

Kurzbeschreibung

Mit einem verstärkten Einsatz von alternativen Antrieben im Schienenverkehr ergeben sich neue Herausforderungen. Besonders der Einsatz von Brennstoffzellentechnologie und dem damit einhergehenden Umgang mit Wasserstoff erfordern neue Sicherheitskonzepte. Um die Sicherheit von Wasserstofffahrzeugen grundsätzlich zu gewährleisten, sind regulatorische und technische Vorgaben erforderlich. Bisher wurden im Zulassungsprozess für Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeuge im Rahmen der Konformitätsbewertung auf technischen Regelwerke und Normengruppe aus der Industrie, Automobilbranche etc. zurückgegriffen. Eigene technische Regelwerke und Normen für wasserstoffbetriebene Schienenfahrzeuge sollen die Zulassung vereinfachen.

Das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) hat daher eine Ausschreibung zur Vergabe des Forschungsprojektes „DZSF – Entwicklung eines bahnspezifischen Standards für Wasserstoffanwendungen in Schienenfahrzeugen“ veröffentlicht. Zur Vereinfachung des Zulassungsprozesses und Erleichterung der Implementierung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien soll ein bahnspezifischer Standard entwickelt werden.

Daher werden in diesem Forschungsvorhaben zunächst eine generische Risikoanalyse erstellt, um basierend auf den identifizierten Anforderungen alle relevanten nationalen und internationalen Regelwerke und Normen, die auf Wasserstofffahrzeuge und Brennstoffzellensysteme anwendbar sind, gesichtet und ihre Anwendung auf den Schienenfahrzeugbereich geprüft. Darauf aufbauend wird ein Diskussionsentwurf für eine bahnspezifische Richtlinie entwickelt und im Anhang zur Verfügung gestellt. Dieser dient als Leitfaden für den Zulassungsprozess, um diesen zu vereinfachen und die Implementierung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie zu erleichtern.

Dieser Diskussionsentwurf gibt basierend auf einer generischen Gefährdungs- und Risikoanalyse sicherheitstechnische Hinweise zum Einbau und Verwendung von Komponenten für die Anwendung von Wasserstoff auf Schienenfahrzeugen und hat zum Ziel einheitliche Beurteilungskriterien zu schaffen und Hinweise zur Schließung von Regelungslücken zu liefern.

Dieses Dokument stellt keine nationale technische Vorschrift (NTV) dar. Es soll als unterstützende Hilfe für das Sicherheitsmanagement oder für die Genehmigung für das Inverkehrbringen von Schienenfahrzeugen und die Genehmigung von Schienenfahrzeugtypen von Wasserstoffanwendungen in Schienenfahrzeugen dienen.

Abstract

New challenges arise in the railway transport by the increased use of alternative propulsion systems like hydrogen. In particular, the use of fuel cell technology and the associated handling of hydrogen require new safety concepts. Regulatory and technical requirements are necessary to ensure the fundamental safety of hydrogen vehicles. The approval/homologation process for hydrogen fuel cell rail vehicles has so far been based on technical regulations and groups of standards from the industry, the automotive sector etc. as part of the conformity assessment. Separate technical regulations and standards for hydrogen-powered rail vehicles are intended to simplify authorisation.

The Federal Railway Authority (EBA) therefore published a call for tenders for the award of the research project "DZSF - Development of a railway-specific standard for hydrogen applications in rail vehicles". To simplify the approval process and facilitate the implementation of hydrogen and fuel cell technologies, a railway-specific standard is to be developed.

Therefore, in this research project, based on a generic risk analysis, all relevant national and international regulations and standards applicable to hydrogen vehicle and fuel cell systems will be reviewed and their application to the rail vehicle sector will be examined. Based on this, a discussion draft for a railway-specific guideline is developed and made available in the annex. This will serve as a guide for the approval process to simplify it and facilitate the implementation of hydrogen and fuel cell technology.

Based on a generic hazard and risk analysis, this discussion draft provides safety-related information on the installation and use of components for the application of hydrogen on rail vehicles and aims to create uniform assessment criteria and provide information on closing regulatory gaps.

This document does not constitute a national technical rule (NTR). It is intended to serve as a supporting document for the safety management or for the railway vehicle authorisation and railway vehicle type authorisation process of hydrogen applications in rail vehicles.

Begriffe und Abkürzungen

Absperrventil (automatisches) bezeichnet ein Ventil zwischen dem Behälter und dem Wasserstoffsystem, das automatisch aktiviert werden kann und standardmäßig „geschlossen“ ist, wenn es nicht an eine Stromquelle angeschlossen ist.

AP – Arbeitspaket

Behälter bezeichnet jegliches System zum Speichern von komprimiertem gasförmigem Wasserstoff, ohne sonstige wasserstoffführenden Bauteile, die am Behälter befestigt oder in diesen eingebaut sein können.

BZ – Brennstoffzelle

Brennstoffzellensystem bezeichnet ein System, das die Luftzufuhreinheit, Brennstoffzellenstapel und Abgasleitung umfasst.

CHG oder **CGH₂** (compressed gaseous hydrogen) – verdichteter gasförmiger Wasserstoff

EBA – Eisenbahn-Bundesamt (Federal Rail Authority – EBA)

Energiespeicher (nach DIN EN IEC 62928:2018 und DIN EN 62864-1:2017) ist eine physische Ausrüstung, die aus einer Energiespeichertechnik, insbesondere einer Lithium-Ionen-Traktionsbatterieanlage, besteht.

FMEA – Ausfalleffektanalyse (Failure Mode and Effects Analyse)

HGV – Hochgeschwindigkeitsverkehr

HV-Batterie – Hochvoltbatterie

MFP – Höchstzulässiger Betankungsdruck (maximum fuelling pressure)

NTV – Nationale technische Vorschrift (national technical rule – NTR)

NWP – Nennbetriebsdruck (nominal working pressure)

PRD – Druckentlastungsvorrichtung (pressure relief device) bezeichnet eine Vorrichtung, die bei Aktivierung unter bestimmten Betriebsbedingungen verwendet wird, um Wasserstoff aus einem unter Druck stehenden System freizusetzen und dadurch einen Ausfall des Systems zu verhindern.

TPRD – Thermische Druckentlastungsvorrichtung (thermally-activated pressure relief device) bezeichnet ein nicht wieder verschließbares PRD, dass durch eine bestimmte Temperatur aktiviert und geöffnet wird, um Wasserstoffgas freizusetzen.

VKM – Verbrennungskraftmaschine

1 Einleitung

Die Projektbearbeitung erfolgt in zwei Arbeitspaketen (AP), die in der nachfolgend dargestellten Weise (Abbildung 1) bearbeitet werden. Im Rahmen von Abstimmungsgesprächen wird der forschungsbegleitende Arbeitskreis über den aktuellen Projektstand informiert. Im Expertenkreis erfolgt ein Fachaus-tausch und entsprechende Rückmeldungen fließen in die Projektbearbeitung ein.

Im Ergebnis des Projektes wird eine:

- Übersicht zu sektorübergreifenden Regelwerken (d. h. Automotive, Industrie) (siehe Anlage 2)

und

- auf Basis dieser identifizierten Anforderungen ein Diskussionsentwurf für einen bahnspezifi-schen Standard (siehe Anlage 11) abgeleitet.

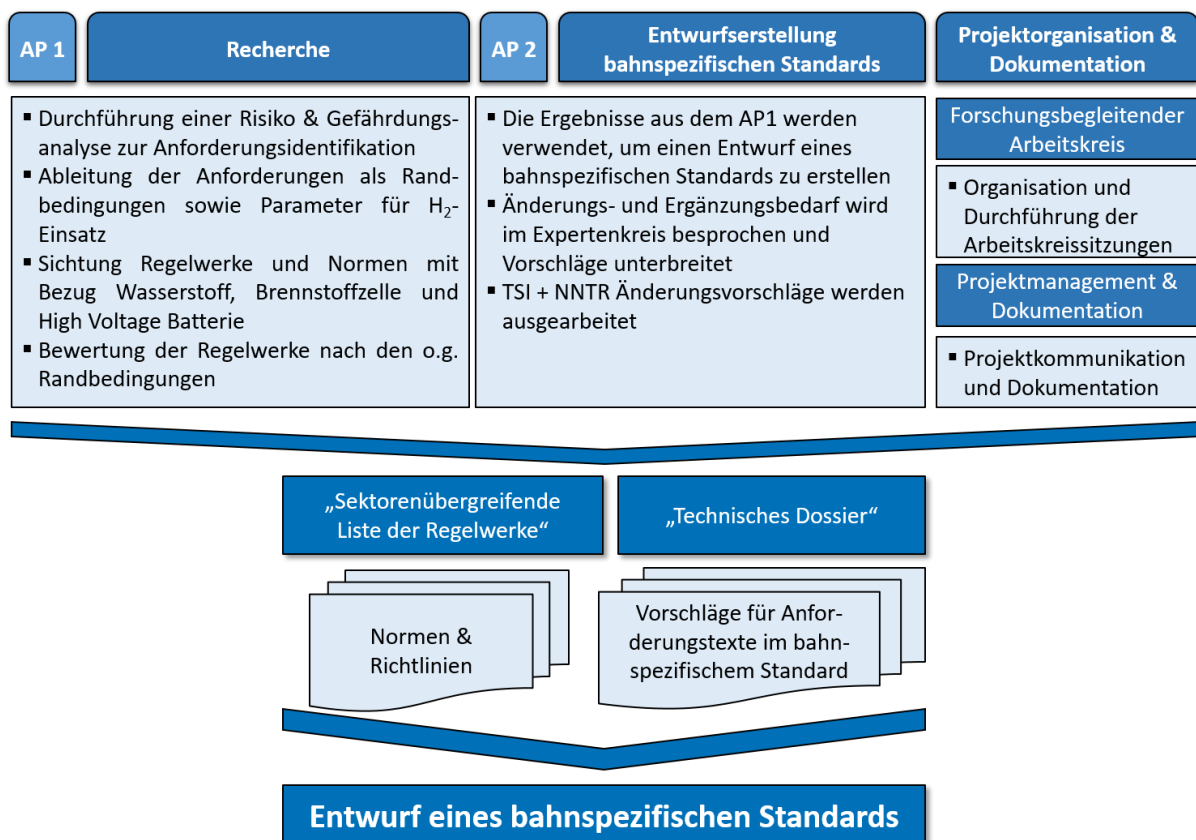


Abbildung 1: Projektstruktur anhand des Durchführungs-konzeptes von TÜV Rheinland InterTraffic

Für das methodische Vorgehen im Projekt empfiehlt sich ein Bottom-Up-Ansatz:

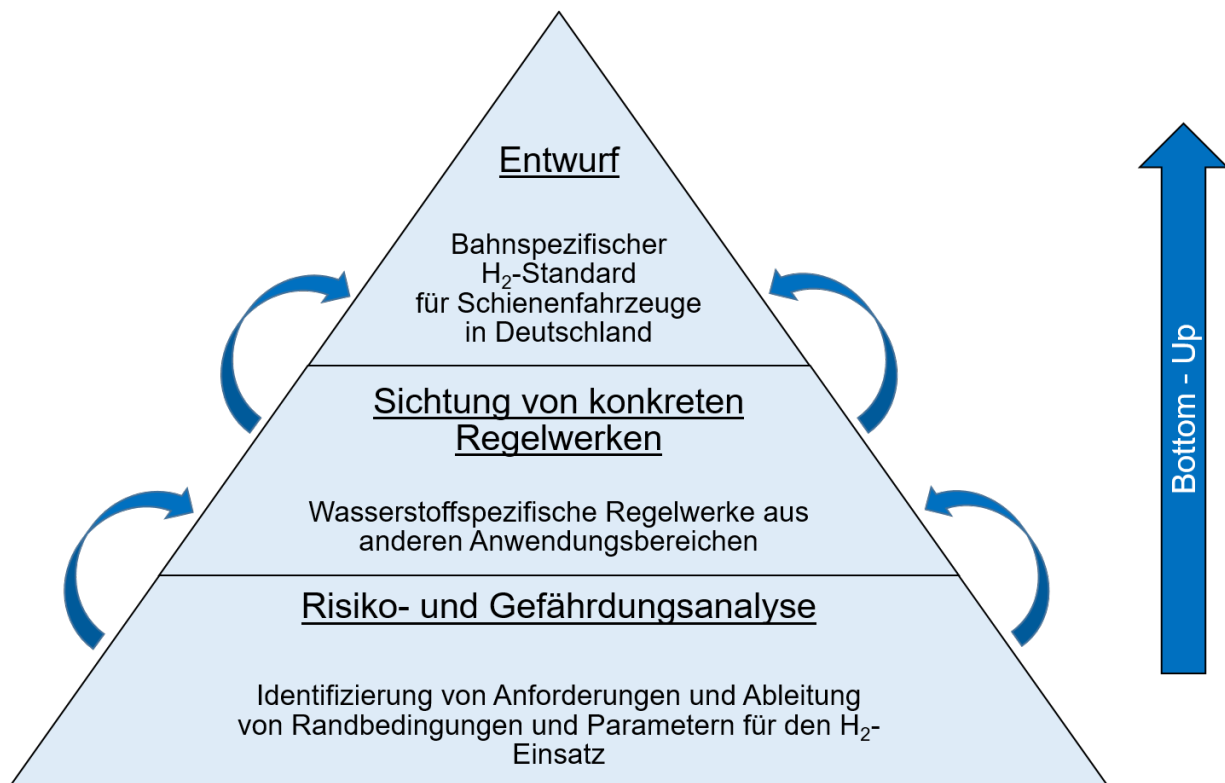


Abbildung 2: Bottom-Up-Methode

Zunächst wird mit der Bottom-Up-Methode eine Risiko- und Gefährdungsanalyse auf „High-Level“ Niveau durchgeführt, um die Anforderungen zu identifizieren. Anschließend werden aus den Anforderungen die Randbedingungen und Parameter für den H₂-Einsatz abgeleitet, die als Suchkriterien bei der Sichtung der Regelwerke aus den verschiedenen Bereichen mit unterschiedlichen Anwendungen verwendet werden.

Daraus entsteht die Basis für die Entwurfserstellung eines bahnspezifischen Standards für wasserstoffangetriebene Schienenfahrzeuge.

Die Bottom-Up-Methode ist eine geeignete Vorgehensweise zur Entwicklung eines Regelwerkes, da zunächst Informationen aus anderen Anwendungsbereichen gesichtet und bei Eignung übernommen werden können. Somit wird eine Standardisierung forciert und eine separate, möglicherweise kostenintensive, Einzellösung für Schienenfahrzeuge vermieden.

2 Methodisches Vorgehen

Eine der wesentlichen Aufgaben im Rahmen dieses Forschungsprojektes ist die Identifikation bzw. Definition aller für eine H₂-Schienenverkehrs-anwendung relevanten Regelwerke und Normen.

Mit der nachfolgend beschriebenen Analyse werden zunächst die im Zusammenhang mit dem H₂-System in Schienenfahrzeugen stehenden Gefährdungen identifiziert. Im Nachgang werden die Gefährdungen hinsichtlich ihres jeweiligen Risikos qualitativ bewertet und es wird zudem jeweils ein geeignetes bzw. vorzugsweise anzuwendendes Risikoakzeptanzkriterium festgelegt.

Die im vorliegenden Bericht beschriebene Risiko- und Gefährdungsanalyse wurde systematisch mittels einer klar definierten Abfolge von Arbeitsschritten und Analysen durchgeführt (s. a. EN 50126-1:2017):

1. Zunächst wurden mit einer detaillierten Systemdefinition die erforderlichen Eingangsinformationen bereitgestellt (siehe Kapitel „3 Systemdefinition“).
2. Im nächsten Schritt wurden die relevanten Gefährdungen identifiziert (siehe Kapitel „4 Risiko- und Gefährdungsanalyse“).
3. Für eine erste Risikobewertung wurde anschließend jede einzelne zuvor identifizierte Gefährdung analysiert. Dies erfolgte mittels einer qualitativen Abschätzung des initialen Risikos mit der Methode der Risikomatrix (s. a. EN 50126-1:2017), die im Ergebnis für jede Gefährdung eine resultierende Risikostufe lieferte (siehe Kapitel 4.4).
4. Im Anschluss an die initiale Risikobewertung wurden basierend auf den möglichen Ursachen der Gefährdungen geeignete Maßnahmen zur Risikominimierung definiert (siehe Kapitel 4.5).
5. Die Risikoanalyse wurde mit einer finalen Risikobewertung abgeschlossen. Für diese Bewertung wurden die identifizierten risikomindernden Maßnahmen berücksichtigt (siehe Kapitel 4.6).

3 Systemdefinition

Für die Durchführung einer Gefährdungs- und Risikoanalyse sind zunächst das betrachtete System selbst und insbesondere auch seine Schnittstellen zu definieren. Für dieses Projekt wird dazu eine generische Anwendung „H₂-Antrieb im Schienenverkehr“ betrachtet. Es wird hierfür zunächst unabhängig von einem späteren projektspezifischen Design, welches im Übrigen dann von den verschiedenen Herstellern auch unterschiedlich realisiert werden kann, eine allgemeine H₂-Fahrzeugantriebsanwendung beschrieben und festgelegt.

Neben dem technischen H₂-Antriebssystem sind im Rahmen einer Gefährdungs- und Risikoanalyse, insbesondere im Hinblick auf mögliche Unfallszenarien, auch die Einsatzbedingungen zu berücksichtigen. Hierfür werden in den Abschnitten 3.4 die relevanten Fahrzeugvarianten beschrieben. Abschnitt 3.5 enthält wichtige Informationen zur Infrastruktur und die Abschnitte 3.6 und 3.7 behandeln die Einsatz- und Umgebungsbedingungen sowie die Betriebsaspekte.

3.1 H₂-Antrieb, Funktionsweise

Für Schienenfahrzeuge mit H₂-Antrieb wird mittlerweile der Überbegriff „Hydrail“ geführt. Die Energiequelle Wasserstoff kann zum Betrieb des Traktionsmotors und/oder eines Hilfstriebwerks dienen. Es kann zwischen zwei grundsätzlichen Antriebsarten unterschieden werden:

1. Fahrzeuge mit Elektroantrieb über die Brennstoffzelle (BZ)
2. Fahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotor (als Verbrennungskraftmaschine (VKM))

Aus technischer Sicht sind beide Antriebsarten in allen Fahrzeugkategorien bzw. -varianten (Lokomotiven, Güterzügen, Triebzügen, Straßenbahnen etc.) oder auch eine hybride Form, d.h. ein angetriebener Generator über den Verbrennungsmotor, möglich. Nach derzeitigem Stand sind von den Fahrzeugen mit Elektroantrieb bislang jedoch nur wasserstoffelektrische Triebzüge, z. B. der CORADIA iLINT im Personenverkehr im Einsatz. Wasserstoffverbrennungsmotoren in Schienenfahrzeugen werden aktuell noch erforscht (z. B. Forschungsprojekt TRAINS mit der Umrüstung des GTW 2/6)¹.

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, unterscheiden sich die beiden Hydrail-Fahrzeugvarianten in ihren wesentlichen Systembestandteilen. So benötigen beispielsweise beide Varianten in der Regel mehrere Tanks zur Speicherung und Bereitstellung der benötigten Menge an gasförmig unter Hochdruck gespeicherten Wasserstoff. Nach derzeitigem Stand der Technik sind diese Tanks auf den Fahrzeugdächern angebracht.

Im Zusammenhang mit dem Betrieb der oben genannten Systembestandteile sind natürlich weitere Komponenten (z. B. Ventile, Rohrleitungen, Ab- und Anschlüsse etc.) erforderlich. Weitere diesbezügliche Erläuterungen enthalten die folgenden Abschnitte dieses Dokuments.

Im Weiteren wird sich auf die Anwendung des Elektroantriebes mittels Brennstoffzelle konzentriert.

¹ Informationen zum Forschungsprojekt online verfügbar: https://www.innovation-strukturwandel.de/strukturwandel/de/report/_documents/artikel/g-i/gruene-aussichten-fuer-triebzuege.html?nn=450838 (zuletzt abgerufen am 06-2022)

TABELLE 1: SYSTEMBESTANDTEILE

Systembestandteil	BZ	VKM
Hochdruck-Wasserstofftank(s)	x	x
Brennstoffzelle(n)*	x	
Verbrennungsmotor		x
Energiespeicher (HV-Batterie(n))	x	
separates Kühlsystem für Motor	x	x
separates Kühlsystem für Batterie(n)	x	
separates Kühlsystem für Brennstoffzelle(n)	x	

*) Bei der Brennstoffzelle handelt es sich genau genommen um einen Verbund aus mehreren zusammengeschalteten Brennstoffzellen.

3.2 H₂-Antrieb (BZ), Systemaufbau

Auch bei einem Schienenfahrzeug mit Brennstoffzelle (BZ), ist ein Elektromotor der eigentliche Antrieb. Der Elektromotor wird dabei mit elektrischer Energie gespeist, die durch eine kontrollierte elektrochemische Reaktion in einer Brennstoffzelle erzeugt wird. Dazu werden Wasserstoff und Sauerstoff zusammengeführt. Der Sauerstoff (O₂) aus der Umgebungsluft dient als Oxidationsmittel, während der Wasserstoff (H₂) gewissermaßen den „Kraftstoff“ darstellt. Bei der Vermischung beider Stoffe entsteht Wasser und es werden Wärme und Energie freigesetzt. Die chemische Energie wird in der Brennstoffzelle in elektrische Energie umgewandelt. Diese wird in Hochvoltbatterien (HV-Batterie) gespeichert und steht als Energiequelle für den (die) Elektromotor(en) im Schienenfahrzeug zur Verfügung.

Zum besseren Verständnis der Funktionsweise und des Systemaufbaus werden diese in den beiden folgenden Abschnitten zunächst am Beispiel der technisch erforderlichen Mindestausstattung (Basis-Architektur) und anschließend als „erweiterte Architektur“ im Ergebnis der initialen Risikoabschätzung unter Berücksichtigung weiterer Sicherheitskomponenten erläutert.

3.2.1 Basis-Architektur des Brennstoffzellen-Antriebs

Bei der Betrachtung der Basis-Architektur steht zunächst die reine Funktionalität des Systems ohne Berücksichtigung von zusätzlichen Sicherheitsfunktionen im Fokus, es werden also die prinzipiellen physikalisch-technischen Grundanforderungen und deren Realisierung einer Basis-Architektur betrachtet. Funktional muss ein solches Basissystem folgende grundlegenden Funktionen gewährleisten.

Das System

- muss mit Wasserstoff betankt werden können;
- muss den Wasserstoff unter Druck speichern können;
- muss den Wasserstoff vom Tank zur Brennstoffzelle transportieren können;
- muss beim Transport von Wasserstoff verschiedenen Drücken standhalten können;
- erzeugt mit Hilfe einer Brennstoffzelle elektrische Energie aus Wasserstoff und Sauerstoff.

Aus den genannten Funktionen ergeben sich bestimmte Bauteile, durch die diese Funktionen realisierbar sind. Der Aufbau des Basissystems ist in Abbildung 3 dargestellt. Neben den bereits genannten grundlegenden Funktionen erfüllen die Komponenten des Basissystems auch weitere Funktionen.

Diese werden in Tabelle 2, Seite 16 beschrieben.

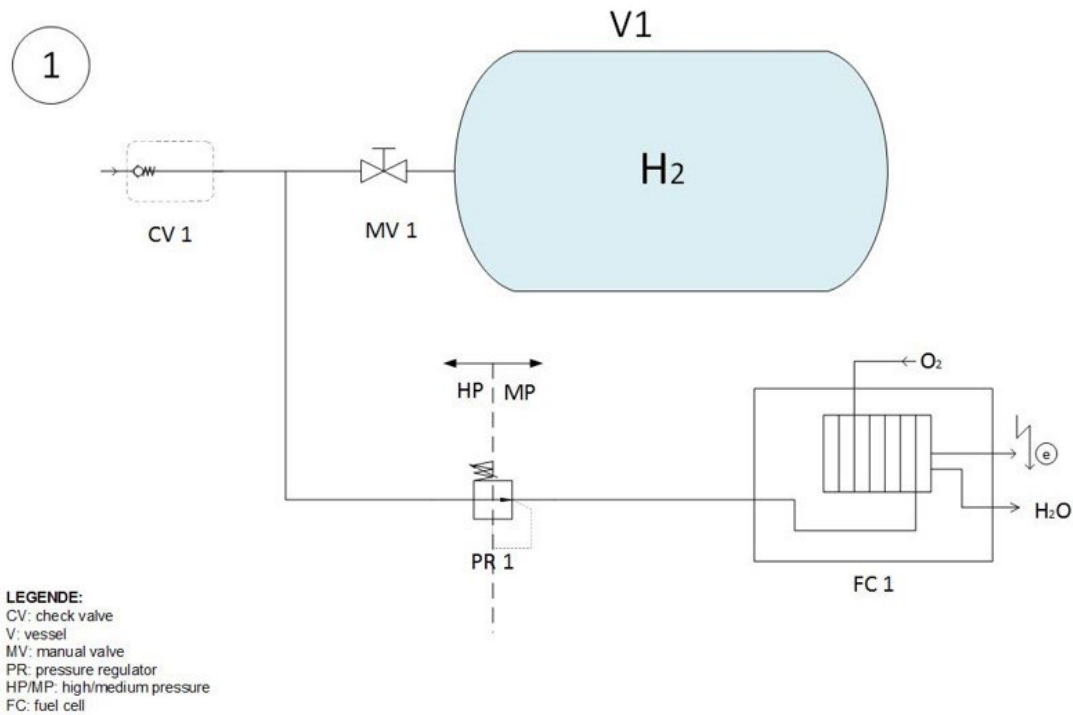


Abbildung 3: Basis-Architektur

Bestandteile der Basis-Architektur des Wasserstoff-Brennstoffzellensystems sind demnach:

- Füllventil mit Rückschlagventilfunktion, federbelastet (CV1)
- Absperrventil / manuelles Behälterventil (MV1)
- Druckregler von Hochdruck auf Mitteldruck (PR1)
- Wasserstoffbehälter (V1)
- Brennstoffzelle (FC1)
- Mitteldruckleitung (MP)
- Hochdruckleitung (HP)

3.3 H₂-Antrieb, Schnittstellen

Insbesondere für die Identifikation potentieller Gefährdungen (s. a. Abschnitt 4.2) ist ein eindeutiges Verständnis der Schnittstellen des H₂-Antriebssystems unabdingbar. Der Anwendungsbereich des vorliegenden Forschungsberichts ist auf das fahrzeugseitige H₂-Antriebssystem beschränkt. Die physische Schnittstelle zur „Außenwelt“ ist der „Betankungsstutzen“ und diese fahrzeugseitige Schnittstelle bei der Betankung und der Instandhaltung wird mit den ihr zuzuordnenden Gefährdungen im Rahmen dieses Projekts

TABELLE 2: KOMPONENTEN UND FUNKTIONEN DER BASIS-ARCHITEKTUR (AUSSCHNITT)

Nr.	Komponente		Funktion
01	Wasserstoffbehälter (Vessel)	V1	01-01 Aufnahme von unter Druck stehenden Wasserstoff 01-02 Speicherung von unter Druck stehenden Wasserstoff 01-03 Abschirmung des unter Druck stehenden Wasserstoffs gegen Einwirkungen von außen
02	Absperrventil für Drucktank (Manual Valve)	MV1	02-01 Ermöglichen des Einfüllens von Wasserstoff in den Wasserstoffbehälter 02-02 Ermöglichen der Entnahme von Wasserstoff aus dem Wasserstoffbehälter
03	Füllventil (Check Valve)	CV1	03-01 Ermöglichen des Betankens des Wasserstoffbehälters 03-02 Verhindern, dass Wasserstoff am Füllventil selbst austritt
04	Druckregler (Pressure Regulator)	PR1	04-01 Druckübergang zwischen Hochdruck (auf Seite des Wasserstoffbehälters) und Mitteldruck (auf Seite der Brennstoffzelle) gewährleisten
05	Brennstoffzelle (Fuel Cell)	FC1	05-01 Wasserstoff unter gezielter Zugabe von Sauerstoff in elektrische Energie und Wasser umwandeln
06	Hochdruckleitung (High Pressure)	HP	06-01 Transport des Wasserstoffs vom Wasserstoffbehälter zum Druckregler 06-02 Standhalten des unter Hochdruck stehenden Wasserstoffs
07	Mitteldruckleitung (Medium Pressure)	MP	07-01 Transport des Wasserstoffs vom Druckregler zur Brennstoffzelle 07-02 Standhalten des unter Hochdruck stehenden Wasserstoffs

berücksichtigt. Explizit nicht betrachtet werden jedoch Gefährdungen und Risiken der infrastrukturseitigen Produktion, des Transports, der Speicherung und der wirtschaftlichen Bereitstellung des von Brennstoffzellenzügen benötigten Wasserstoffs. Diese Aspekte sind nicht Gegenstand der im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Gefährdungs- und Risikoanalyse.

Bei den Schnittstellen eines H₂-Antriebssystems ist zu unterscheiden zwischen:

- Schnittstellen des H₂-Antriebssystems zu anderen fahrzeugseitigen Systemen und Komponenten
- Schnittstellen des H₂-Antriebssystems zur Umgebung
- Schnittstellen des H₂-Antriebssystems zu Personen (z. B. Instandhaltungspersonal)

In Abbildung 4 ist das H₂-Antriebssystem als „Black-Box“ dargestellt, d. h. der in den vorangegangenen Abschnitten näher beleuchtete Systemaufbau muss in diesem Schritt nicht berücksichtigt werden. Es werden in diesem Schritt ausschließlich die Schnittstellen an der Systemgrenze der „Black-Box“ betrachtet, interne Schnittstellen zwischen den Komponenten des H₂-Antriebssystems können somit erst einmal ausgeblendet werden. Im Zusammenhang mit den Systemschnittstellen des H₂-Antriebssystems ist es von elementarer Bedeutung, festzustellen bzw. zu definieren, ob die jeweilige Schnittstelle eine Wirkung

nach außen und/oder nach innen hat. Die Wirkrichtung an den unterschiedlichen Systemschnittstellen ist in der Abbildung farblich und mit Pfeilrichtung gekennzeichnet.

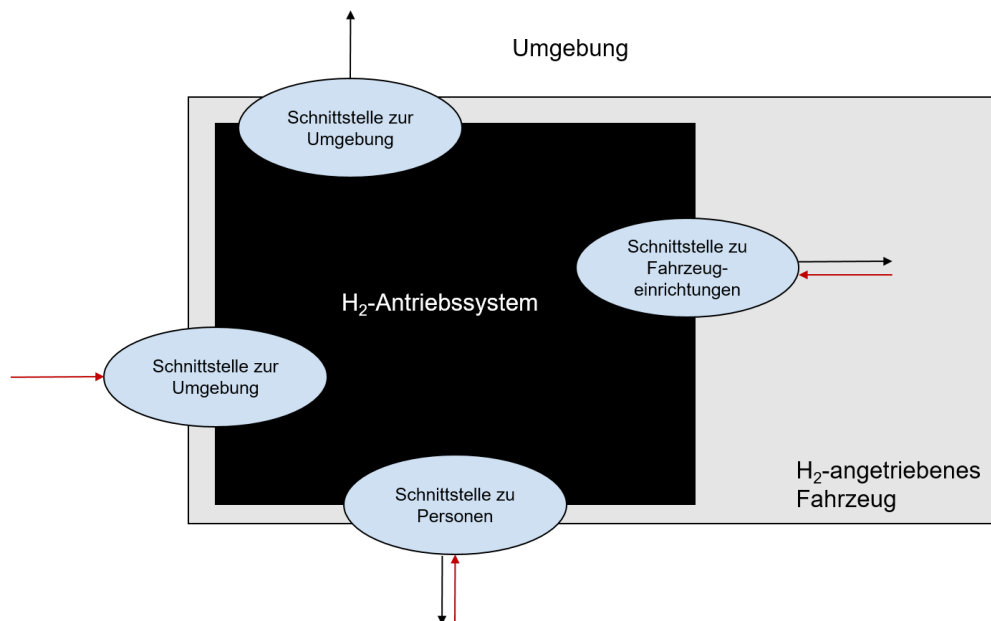


Abbildung 4: Systemschnittstellen H₂-Antriebssystem

Einzelne Systemschnittstellen können einem oder aber auch mehreren Diensten oder Eigenschaften zugeordnet werden. So kann beispielsweise an einer Schnittstelle zu Fahrzeugeinrichtungen ein Signal an den zentralen Zugrechner gesendet (dargestellt durch den schwarzen Pfeil) und im Gegenzug auch ein Signal von diesem (dargestellt durch den schwarzen Pfeil) empfangen werden. An der Systemschnittstelle zur Umgebung können beispielsweise klimatische Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit etc.) oder auch elektromagnetische Strahlung (beide Aspekte dargestellt durch den schwarzen Pfeil) auf das H₂-Antriebssystem einwirken, es kann aber auch elektromagnetische Strahlung (dargestellt durch den schwarzen Pfeil) vom H₂-Antriebssystem an die Umgebung abgegeben werden.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die für ein H₂-Antriebssystem identifizierten Schnittstellen beschrieben.

3.3.1 Schnittstellen des H₂-Antriebssystems zu anderen fahrzeugseitigen Systemen und Komponenten

Nachfolgende Tabelle 3 beinhaltet eine Auflistung der Schnittstellen des H₂-Antriebssystems zu Teilsystemen oder Komponenten, die dem Fahrzeug bzw. der Fahrzeugtechnik, nicht jedoch unmittelbar dem H₂-Antriebssystem, zugerechnet werden.

TABELLE 3: SCHNITTSTELLE H₂-ANTRIEBSSYSTEM INNERHALB DES FAHRZEUGES

Nr.	Schnittstelle
01	H ₂ -Antriebssystem ⇔ Mechanische Anbindung an das Fahrzeug
02	H ₂ -Antriebssystem ⇔ Zentrale Fahrzeugsteuerung
03	H ₂ -Antriebssystem ⇔ Energiemanagement
04	H ₂ -Antriebssystem ⇔ Kühlsystem

3.3.2 Schnittstellen des H₂-Antriebssystems zur Umgebung

Nachfolgende Tabelle 4 beinhaltet eine Auflistung der Schnittstellen des H₂-Antriebssystems zu seiner Umgebung. Bei der Umgebung wird auf der einen Seite zwischen dem Bereich, der sich zwar außerhalb des H₂-Antriebssystems, aber immer noch zum Fahrzeug gehört und zum anderem dem Bereich außerhalb des Fahrzeugs, unterschieden.

TABELLE 4: SCHNITTSTELLE H₂-ANTRIEBSSYSTEM ZUR UMGEBUNG

Nr.	Schnittstelle
01	Betankungseinrichtung des H ₂ -Antriebssystems ⇔ Stationäre Betankungseinrichtung
02	H ₂ -Antriebssystem ⇔ Umgebung innerhalb des Fahrzeugs
03	H ₂ -Antriebssystem ⇔ Umgebung außerhalb des Fahrzeugs

3.3.3 Schnittstellen des H₂-Antriebssystems zu Personen

Nachfolgende Tabelle 5 beinhaltet eine Auflistung der Schnittstellen des H₂-Antriebssystems zu Personen.

TABELLE 5: SCHNITTSTELLE H₂-ANTRIEBSSYSTEM ZU PERSONEN

Nr.	Schnittstelle
01	H ₂ -Antriebssystem ⇔ Betriebs- und Instandhaltungspersonal
02	H ₂ -Antriebssystem ⇔ Rettungskräfte
03	H ₂ -Antriebssystem ⇔ Personal im Fahrzeug (z. B. Triebfahrzeugführer)
04	H ₂ -Antriebssystem ⇔ Personen im Fahrzeug (z. B. Passagiere)
05	H ₂ -Antriebssystem ⇒ Dritte (Personen außerhalb des Fahrzeugs, die nicht unter die Nr. 6 fallen, z. B. Passanten, Kraftfahrzeugfahrer)
06	H ₂ -Antriebssystem ⇐ Dritte (Personen außerhalb des Fahrzeugs, die nicht unter die Nr. 5 fallen, und eine Schadensabsicht verfolgen, z. B. Vandalismus, Cyber-Attacke, Terroranschlag)

3.4 Varianten von Schienenfahrzeugen

Im Schienenverkehrssektor werden unterschiedlichste Leistungen abgewickelt und daher sind vielfältige Arten bzw. Varianten von Fahrzeugen im Einsatz. Je nach Variante können sich die erforderliche Infrastruktur (s. a. Abschnitt 3.5), die Umgebung (s. a. Abschnitt 3.6) und die betrieblichen Bedingungen (s. a. Abschnitt 3.7) maßgeblich unterscheiden. Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt, hat die H₂-Antriebstechnik grundsätzlich das Potential in allen Fahrzeugvarianten eingesetzt werden zu können. Während die Gefährdungen (s. a. Abschnitt 4.2), die ein H₂-Antriebssystem mit sich bringt, im Wesentlichen unabhängig von den Fahrzeugarten sind, können die Fahrzeuge je nach Einsatzart in vollkommen unterschiedliche Unfälle verwickelt werden. Aus diesem Grunde ist es erforderlich, den hier im Rahmen der vorgenommenen Risiko- und Gefährdungsanalyse berücksichtigten Fahrzeugkreis auf die Fahrzeuge des Vollbahnbereiches zu beschränken:

- Lokomotiven mit Passagierwagen
- Lokomotiven mit Güterwagen (geschlossen/offen), Tank- bzw. Kesselwagen (flüssige und gasförmige Stoffe)
- Triebzüge und Triebwagen (insbesondere auch Hochgeschwindigkeitsverkehr)

3.5 Infrastruktur des Schienenverkehrs

Neben den in Abschnitt 3.4 identifizierten Fahrzeugarten kann die jeweilige Infrastruktur ebenfalls Einfluss auf resultierende Unfallszenarien haben. Aus diesem Grunde ist es erforderlich, die im Rahmen der hier vorgenommenen Risiko- und Gefährdungsanalyse berücksichtigte Infrastruktur festzulegen:

Fahrweg:

- ebenerdiger Fahrweg
- aufgeständerter Fahrweg
- einspuriger Fahrweg
- mehrspuriger Fahrweg

Infrastruktur

- Eisenbahntunnel
- Eisenbahnbrücken

Streckenausrüstung:

- Schienen
- Weichen
- signaltechnische Ausrüstung (z. B. Signale, Balisen)
- Oberleitung, Stromschienen

Gütertransport:

- Güterbahnhöfe
- Häfen
- Umladeplätze
- Rangierbahnhöfe/-stellen

Personentransport:

- Bahnhöfe (ober-/unterirdisch) mit den Zu-/Abgängen mit öffentlichen und nichtöffentlichen Bereichen
- Haltestellen (ober-/unterirdisch) mit den Zu-/Abgängen öffentlichen und nichtöffentlichen Bereichen
- Ausstiegsmöglichkeit an jedem Punkt der Strecke gegeben
- Ausstiegsmöglichkeit nur an bestimmten Punkten der Strecke gegeben

Betriebliche Einrichtungen:

- Betankungseinrichtungen
- Instandhaltungseinrichtungen
 - ebenerdige Einrichtungen
 - Gruben
 - Hebeeinrichtungen
 - Kräne
- Abstellplätze

3.6 Einsatz- und Umgebungsbedingungen im Schienenverkehr

Auch die Einsatz- und Umgebungsbedingungen der in Abschnitt 3.4 identifizierten Fahrzeugarten können sich auf resultierende Unfallszenarien auswirken. Aus diesem Grunde ist es erforderlich, die im Rahmen der hier vorgenommenen Risiko- und Gefährdungsanalyse berücksichtigten Einsatz- und Umgebungsbedingungen festzulegen:

Streckenprofil:

- zugängliche Strecke (auch für Rettungsfahrzeuge)
- nicht zugänglich (z. B. abseits des Straßennetzes)
- Gefälle (z. B. Bremsversagen)
- Steigungen
- Strecken an Berghängen (Gefahr von Lawinen/Geröll)
- Höhenlage der Strecke
- Stadt-/Wohngebiete
- Industriegebiete
- in der Umgebung von systemrelevanten Einrichtungen (Kraftwerke, Flughäfen etc.)
- Natur-/Waldgebiete (z. B. Kollisionen mit Tieren oder umgestürzten Bäumen)

Klimatische Bedingungen:

- Temperatur
- Regen, Schnee, Eis
- Staub

Weitere Umgebungsbedingungen:

- Höhe
- Vibration

3.7 Betriebsbedingungen

Auch die Betriebsbedingungen können maßgeblichen Einfluss auf das Entstehen von Gefährdungen und die Art der resultierenden Unfälle haben. An erster Stelle seien hier die verschiedenen Betriebsarten genannt (ohne auf etwaige Automatisierungsgrade einzugehen).

Betriebsart

- manuelle Fahrt auf Sicht
- manuelle Fahrt mit Zugbeeinflussung
- halbautomatischer Zugbetrieb mit Fahrer

Verkehrskonzept

- nicht-gemischter Verkehr
 - ausschließlich Güterverkehr
 - ausschließlich Personenverkehr
- Gemischter Schienenverkehr
 - Güter- und Personenverkehr ohne HGV
 - Güter- und Personenverkehr mit HGV

Betriebsszenario

- Normalbetrieb
- Störungsbetrieb:
 - Evakuierung
 - Sicherung der Störstelle
- Notfallbetrieb:
 - Rettung
 - Löschen
 - Sicherung der Notfallstelle

4 Risiko- und Gefährdungsanalyse

Die für die Durchführung der Risiko- und Gefährdungsanalyse gewählte prinzipielle Vorgehensweise wurde bereits im Kapitel 2 im Überblick erläutert, welche in den nachfolgenden Abschnitten tiefergehend betrachtet wird. In Abschnitt 4.1 werden zunächst die verwendeten Begriffe definiert, um so ein einheitliches Verständnis bei den Lesern zu ermöglichen. Die Vorgehensweise zur Gefährdungsidentifikation ist in Abschnitt 4.2 beschrieben und in Abschnitt 4.3 werden potentielle Unfallszenarien aufgezeigt. Die eigentliche Risikoanalyse wurde in zwei Schritten zunächst ohne Berücksichtigung risikomindernder Maßnahmen als „initiale Risikobewertung“ (Abschnitt 4.4) und nach Beschreibung risikoreduzierender Maßnahmen (Abschnitt 4.5) anschließend unter Berücksichtigung der Maßnahmen als „finale Risikobewertung“ (Abschnitt 4.6) vorgenommen.

4.1 Begriffe und Definitionen

Da nicht zuletzt auch in den verschiedenen Technologiesektoren bzw. den jeweiligen Regelwerken und Normen die im Zusammenhang mit Gefährdungs- und Risikoanalysen verwendeten Begriffe nicht einheitlich verwendet werden, sollen zunächst im Folgenden die im vorliegenden Projekt verwendeten Begriffe beschrieben und in der Tabelle 6 definiert werden.

Per Definition gemäß EN 50126-1:2017 stellt eine Gefährdung einen Zustand dar, der zu einem Unfall führen kann. Für dieses Projekt wird weiterhin die Festlegung getroffen, dass Gefährdungen ausschließlich an der Systemgrenze auftreten und in ihrer Wirkung nach außen gerichtet sind. In Abbildung 5 ist dies durch den von der Gefährdung ausgehenden schwarzen Pfeil dargestellt. An der anderen in der Grafik ersichtlichen Schnittstelle wird durch den roten Pfeil eine nach innen gerichtete Wirkung dargestellt, die demnach aufgrund der getroffenen Festlegung eben nicht eine Gefährdung darstellt, sondern aufgrund ihrer Wirkrichtung als externe Ursache behandelt wird. Wie zuvor bereits erwähnt, können Gefährdungen prinzipiell zu einem Unfall oder mehreren unterschiedlichen Unfällen führen. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch, dass bei Auftreten einer Gefährdung nicht zwangsläufig ein Unfall die Folge sein muss. Es ist vielmehr in der Regel mindestens ein weiteres auslösendes Ereignis erforderlich, damit es zu einem Unfall kommt.

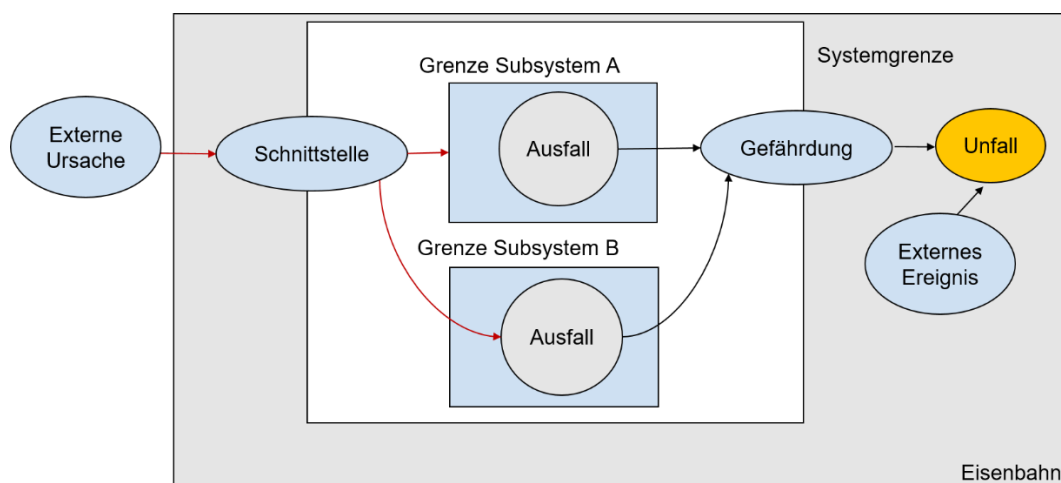


Abbildung 5: Unfall-Ereigniskette

TABELLE 6: BEGRIFFE

Begriff	Definition	Kommentar
Gefährdung	Zustand, der zu einem Unfall führen kann	Quelle: EN 50126-1:2017
Unfall	nicht beabsichtigtes Ereignis oder Reihe von Ereignissen mit der Folge von Toten, von Verletzten, von Verlust eines Systems oder eines Dienstes, oder von Umweltschäden	Quelle: EN 50126-1:2017
Risiko	Kombination aus erwarteter Häufigkeit eines Schadens und erwartetem Schweregrad dieses Schadens	Quelle: EN 50126-1:2017
Ausfall	Verlust der Fähigkeit, wie gefordert zu funktionieren	Quelle: EN 50126-1:2017
Ursache	Ereignis oder Zustand, das bzw. der zu einem Ausfall führen kann	Eigendefinition

Ein einfaches Beispiel für diesen Zusammenhang ist der Zustand bzw. die Gefährdung „explosives Gasgemisch“. Der potentielle Unfall „Explosion“ tritt erst ein, wenn ein weiteres auslösendes Ereignis, in diesem Falle eine Zündquelle mit ausreichender Zündenergie, hinzukommt und die Explosion tatsächlich auch auslöst.

Eine Gefährdung wiederum beruht auf mindestens einem Ausfall im betrachteten System. Ausfälle können viele verschiedene Ursachen, externe wie interne, haben. Das Beispiel einer während der Fahrt geöffneten Ein-/Ausstiegstüre an einer Metro soll diesen Zusammenhang verdeutlichen: Die geöffnete Einstiegstür stellt die Gefährdung dar. Ein weiteres auslösendes Ereignis, in diesem Falle im Türbereich befindliche Personen, können zu dem Unfall führen, dass Personen aus dem Fahrzeug stürzen. Die geöffnete Tür kann zum Beispiel auf einem Ausfall der Türsteuerung oder dem Defekt der mechanischen Türverriegelung beruhen. Beide Ausfälle wiederum können vielfältige Ursachen haben.

Das Risiko im Zusammenhang mit dieser Gefährdung ergibt sich aus der erwarteten Häufigkeit des Schadens und dessen Schweregrades. Da der Schaden aber unmittelbar mit einem eingetretenen Unfall verknüpft ist, kann das Risiko auch als Kombination aus erwarteter Häufigkeit des Unfalls und dessen Schweregrades gesehen werden.

4.2 Gefährdungsidentifikation

Für die Identifikation der Gefährdungen eines H₂-Antriebssystems werden Checklisten verwendet, die u. a. im Rahmen der Gefahrenanalyse beim Erstellen von Sicherheitsanalysen bzw. Sicherheitsberichten nach der Störfall-Verordnung (12. BImSchV) entwickelt wurden. Diese intern entwickelten Checklisten sind als Ergebnis einer auf das Untersuchungsobjekt "Betriebsbereich/Anlage/Anlagenteil mit Anforderungen nach der Störfall-Verordnung" bezogenen Pre-HAZOP-Studie zu verstehen und können an das jeweils konkrete Untersuchungsobjekt angepasst werden.

Dabei wird zwischen den folgenden Gefahrenquellen unterschieden:

- anlagenbezogene Gefahrenquellen
- ereignisbezogene Gefahrenquellen
- umgebungsbedingte Gefahrenquellen
- Eingriffe Unbefugter

Mittels der Gefahrenquellen wurden zunächst Primärgefährdungen identifiziert:

- 1) freigesetzter gefährlicher Stoff
- 2) strukturelle Integrität nicht gegeben
- 3) Systemfunktion des H₂-Systems gestört
- 4) Energieerzeugungsprozess gestört/beeinträchtigt (außerhalb der Brennstoffzelle)
- 5) Energieerzeugungsprozess gestört/beeinträchtigt (innerhalb der Brennstoffzelle)
- 6) unzulässige Beeinflussung von Systemen/Komponenten außerhalb des H₂-Systems
- 7) gefährlicher elektrischer Zustand
- 8) heiße Oberfläche(n)
- 9) weitere Gefahren (ohne elektrische und thermische) aus dem Bereich „Arbeitsschutz“

Darauf aufbauend wurden die spezifischen Gefährdungen abgeleitet und deren jeweiliges Eintreten, die spezifische Ursache sowie die unmittelbaren Auswirkungen bestimmt.

Für dieses Vorgehen wird ein Bottom-Up-Ansatz gewählt. Da die Struktur des H₂-Antriebssystems generisch festgelegt ist, wird statt einzelner spezifischer Komponentenbezeichnungen eine allgemeine Bezeichnung („Funktionselement“) verwendet. Dabei werden alle Elemente/Komponenten, mit Ausnahme der eigentlichen Brennstoffzelle und der Batterie, bezeichnet, die entweder Wasserstoff speichern, transportieren oder den Austritt von Wasserstoff aus dem H₂-Antriebssystem verhindern sollen. Das heißt ein Funktionselement kann beispielsweise ein Wasserstoffbehälter oder ein Absperrventil sein. Die Brennstoffzelle und die Batterie werden separat von den übrigen Funktionselementen betrachtet.

Das entsprechende Funktionsversagen wird dann mittels der Methode einer Ausfalleffektanalyse (FMEA) untersucht. Hierfür sind folgende Angaben notwendig:

- Gefährdung
- Gefährdung tritt ein bei... (Funktionsversagen)
- Ursache(n) der Gefährdung(en) allgemein
- Ursache(n), Beschreibung
- unmittelbare Auswirkung(en) der Gefährdung(en)
- Mögliche Folgeauswirkung(en)
- Mögliche Unfallszenarien

Das Beispiel in der Tabelle 7 soll die gewählte Vorgehensweise anhand einer Gefährdung im Zusammenhang mit dem Funktionselement (beispielsweise ein Wasserstoffbehälter) verdeutlichen.

Im Ergebnis dieser Analyse wurden zum einen systematisch die relevanten Gefährdungen identifiziert und zum anderen potentielle Unfallszenarien zugeordnet. Diese Unfallszenarien wiederum stellen die Grundlage für die weitere Risikoabschätzung dar, deren Vorgehensweise nachfolgend beschrieben wird.

TABELLE 7: BEISPIEL ZUR VORGEHENSWEISE ANHAND EINER GEFÄHRDUNG

Komponente	Wasserstoffbehälter
Primärgefährdung	freigesetzter gefährlicher Stoff
Gefährdung	freigesetzter Wasserstoff
Gefährdung tritt ein bei ...	Freisetzen von Wasserstoff durch mechanisches Versagen der Umschließung von Funktionselementen
Ursache, allgemein	Konstruktionsfehler
Ursache, Beschreibung	Verwendung von Funktionselementmaterialien, die eine unzulässige Diffusion zulassen
unmittelbare Auswirkung(en)	unzulässig hohe Diffusion von Wasserstoff
mögliche Folgeauswirkung(en)	Ansammlung von Wasserstoff in einem betroffenen Bereich und dort Verdrängung des Sauerstoffs
mögliche Unfallszenarien	Möglichkeit schwerer bleibender Schädigungen bis hin zum Tod der im betroffenen Bereich befindlichen Personen aufgrund unzureichender Sauerstoffversorgung

4.3 Unfallszenarien

Wie aus dem in Tabelle 7 beschriebenen Beispiel ersichtlich, werden ausgehend von der Funktion der jeweiligen Komponente mögliche Gefährdungen identifiziert und anschließend basierend auf den unmittelbaren Auswirkungen und möglichen Folgeauswirkungen strukturiert potentielle Unfallszenarien abgeleitet. Nachfolgende Tabelle listet die identifizierten Unfallszenarien auf.

TABELLE 8: UNFALLSZENARIEN

Unfall-ID.	Unfallszenario
ACC-01	Abhängig von der Fehlfunktion oder der Funktionseinschränkung im H ₂ -System kann es zu schweren Unfällen (Explosion, Brand, Stromschlag) kommen
ACC-02	Abhängig von der Fehlfunktion, des Funktionsverlusts oder der betroffenen Komponenten kann es zu schweren Unfällen (Explosion, Brand, Stromschlag) kommen
ACC-03	Arbeitsunfall mit der Möglichkeit schwerer oder tödlicher Verletzungen
ACC-04	Aufgrund der Fehlfunktion oder des Ausfalls des H ₂ -Systems kann es zu schweren Unfällen (Explosion, Brand, Stromschlag) kommen
ACC-05	Aufgrund der Fehlfunktion oder eingeschränkten Funktion von Systemen/Komponenten außerhalb des H ₂ -Systems kann es zu schweren Unfällen (Explosion, Brand, Stromschlag) kommen
ACC-06	Brand im H ₂ -System oder benachbarten Bereichen

Unfall-ID.	Unfallszenario
ACC-07	Brand und/oder Explosion
ACC-08	Explosion
ACC-09	Fahrzeug kann einen Gefahrenbereich (z. B. bei Feuer im Tunnel) nicht oder nur verzögert verlassen
ACC-10	Kollision mit der auf dem Gleis liegegebliebenen Komponente und/oder Entgleisung als Folge des Überfahrens der auf dem Gleis liegegebliebenen Komponente
ACC-11	Kontamination von Personen durch ätzende und/oder toxische Stoffe
ACC-12	Krafteinwirkung auf Person(en) durch abfallende oder wegfliegende Komponenten
ACC-13	Möglichkeit schwerer bleibender Schädigungen bis hin zum Tod der im betroffenen Bereich befindliche Personen aufgrund unzureichender Sauerstoffversorgung
ACC-14	Stromschlag mit schweren oder tödlichen Verletzungen/Verbrennungen
ACC-15	Unfälle (z. B. Austritt von Gefahrstoffen, Zündstoffen) in EM-sensitiven Bereichen / Industrie-Anwendungen (z. B. Elektrolyse-Anlagen) aufgrund einer Störung der bereichsseitigen Steuerung(en)
ACC-16	Unfälle (z. B. Kollision, Entgleisung etc.) aufgrund einer Störung externer Einrichtungen (z. B. signaltechnische Einrichtungen der Infrastruktur)
ACC-17	Verbrennung an/von Körperteilen

Für die im Zusammenhang mit den verschiedenen Unfallszenarien zu sehenden Konsequenzen und die Bewertung des Schweregrades wird als pragmatische Vorgehensweise der „vernünftigerweise anzunehmender Worst Case“ herangezogen. Eine solche Annahme mag für bestimmte Unfälle eine konservative Bewertung darstellen, aus dem Betrachtungswinkel der Sicherheit soll damit jedoch verhindert werden, dass unter Umständen unzureichende Maßnahmen zur Risikoreduktion festgelegt bzw. getroffen werden. Direkten Einfluss auf den Schweregrad von Unfällen hat die Anzahl der betroffenen Personen. Auch in diesem Zusammenhang wird zur Vereinfachung eine konservative Annahme gewählt, die davon ausgeht, dass bei bestimmten Unfallszenarien (z. B. Brand, Entgleisung, Kollision etc.) ein relativ hoher Anteil (> 10) der im betroffenen Schienenfahrzeug befindlichen Personen unmittelbar vom Unfall betroffen ist. Handelt es sich um ein Unfallszenario, welches im Zusammenhang mit betrieblichen Maßnahmen ohne Anwesenheit von betriebsfremden Personen zu sehen ist, kann von einer reduzierten Anzahl (1 bis 10) betroffener Personen ausgegangen werden. Die anzunehmende Personenzahl steht des Weiteren im Zusammenhang mit der Art des Schienenfahrzeuges (s. a. Abschnitt 3.4). Bis auf wenige Fahrzeugvarianten, wie zum Beispiel Nebenfahrzeuge, ist davon auszugehen, dass eine große Anzahl von Personen (deutlich mehr als 10 Personen) in den Fahrzeugen befördert werden. In der nachfolgenden Tabelle 9 wird den Unfallszenarien aus Tabelle 8 die jeweils angenommene Personenzahl zugeordnet und diese wird wiederum bei der Ermittlung der jeweiligen Schweregradkategorie der Risikomatrix angewendet.

TABELLE 9: UNFALLSZENARIEN UND ANZAHL DER PERSONEN

Unfall-ID.	Unfallszenario (Kurzbeschreibung)	Anzahl der betroffenen Personen
ACC-01, ACC-02, ACC-04 bis ACC-08 ACC-14	Explosion, Brand und/oder Stromschlag (im Passagierbetrieb)	viele Personen (mehr als 10)
	Explosion, Brand und/oder Stromschlag (im Instandhaltungsbereich)	kleine Anzahl von Personen (max. 10)
ACC-03	Arbeitsunfall	kleine Anzahl von Personen (max. 10)
ACC-09	Fahrzeug kann einen Gefahrenbereich nicht oder nur verzögert verlassen	viele Personen (mehr als 10)
ACC-10	Kollision, Entgleisung etc.	viele Personen (mehr als 10)
ACC-11	Kontamination von Personen	kleine Anzahl von Personen (max. 10)
ACC-12	Krafteinwirkung auf Person(en)	kleine Anzahl von Personen (max. 10)
ACC-13	unzureichende Sauerstoffversorgung	kleine Anzahl von Personen (max. 10)
ACC-15	Unfälle aufgrund einer Störung der bereichsseitigen Steuerung(en)	viele Personen (mehr als 10)
ACC-16	Kollision, Entgleisung etc. aufgrund einer Störung externer Einrichtungen	viele Personen (mehr als 10)
ACC-17	Verbrennung an/von Körperteilen	kleine Anzahl von Personen (max. 10)

In den nachfolgenden Abschnitten werden zu einem Teil der in Tabelle 8 enthaltenen Unfallszenarios die für die Bewertung des initialen Risikos (s. a. Abschnitt 4.4) zugrunde gelegten Annahmen erläutert.

4.3.1 Unfallszenario Explosion, Brand und/oder Stromschlag (u. a. ACC-01)

Dieses Unfallszenario bezieht sich auf einen Brand und/oder eine Explosion, der bzw. die ihre Ursache im H₂-Antriebssystem, nicht jedoch der Batterie hat. Der Schweregrad hängt insbesondere von der Ausdehnung des Brandes oder der Stärke der Explosion ab. Im Zusammenhang mit Wasserstoff ist diesbezüglich zu berücksichtigen, dass

- Wasserstoff extrem leicht entzündlich ist;
- Wasserstoff leichter als Luft ist;
- Wasserstoff mit Luft, Sauerstoff, Halogenen und starken Oxidationsmitteln reagiert (Bildung eines explosiven Gasgemischs);
- Wasserstoffflammen zum einen bis zu 2.200°C, also extrem heiß, und zum anderen im Vergleich zu einem Flüssigkeitsbrand auch kaum sichtbar sind.

Es wird für die vorliegende Risikoanalyse die vereinfachte Annahme getroffen, dass im Schienenpersonenverkehr viele der beförderten Personen (mindestens 11) von den schwersten Konsequenzen (Tod durch Erstickern und/oder tödliche Verbrennungen) betroffen sein können. Wie bereits im vorigen Ab-

schnitt beschrieben, stellt diese Annahme eine konservative Abschätzung dar, die in konkreten Anwendungsfällen bzw. Projekten durch weiterführende Analysen vertieft werden kann. Für das Unfallszenario „Brand und/oder Explosion“ wird im Falle dieser generischen Betrachtung für den nichtöffentlichen Bereich (z. B. Depot, Werkstatt) eine geringere betroffene Personenzahl (max. 10) angenommen. Diese Annahme ist projektspezifisch zu verifizieren.

Dass es tatsächlich zu einem Brand und/oder einer Explosion kommt bzw. die Häufigkeit eines solchen Unfallszenarios eintritt, hängt in der Regel von mehreren Faktoren ab. Zunächst müsste sich ein brand-/explosionsfähiges Gasgemisch infolge eines unerwünschten Zustands einer Komponente des H₂-Antriebssystems bilden und dieses Gas müsste durch eine Zündquelle mit einer bestimmten Zündenergie beaufschlagt werden.

Auch zur möglichen Ausbreitung eines Brandes tragen verschiedene Umstände bei:

- Fehlende oder verzögerte Branderkennung
- Umgebungsbedingungen des Brandherdes (verbaute Materialien, klimatische Bedingungen wie z. B. Wind, externe Umgebung etc.)
- Mögliche Kettenreaktion(en)
- Übergreifen des Brandes auf externe Flächen
- Fehlende, verzögerte oder unzureichende Brandbekämpfung

Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte wird der Grad der Häufigkeit eines Brandes und/oder einer Explosion aufgrund des inhärenten Zustands des H₂-Antriebssystems bzw. seiner Komponenten für die initiale Risikobewertung als unwahrscheinlich eingestuft. Mit anderen Worten: Das Unfallszenario eines Brandes und/oder einer Explosion mit mehr als 10 Toten ist unwahrscheinlich, aber möglich. Aus der Kombination der vorgenommenen Einstufungen des Schwergrades und der Häufigkeit ergibt sich nach der Risikomatrix (s. a. Abbildung 6) für dieses Unfallszenario die als „unerwünscht“ bezeichnete Risikoakzeptanzniveauekategorie. Das Restrisiko muss daher durch geeignete Maßnahmen/Kontrollen reduziert werden.

Neben dem Brand und/oder einer Explosion verursacht durch Defekte im H₂-Antriebssystem selbst, sind dessen Komponenten nicht zuletzt aufgrund ihrer Einbettung im Schienenfahrzeug auch mittelbar von möglichen Unfällen des Fahrzeugs (Kollision, Entgleisung, Brand etc.) betroffen. Auch für diesen Fall wird der Grad der Häufigkeit, wiederum mit einer konservativ erscheinenden Annahme, als unwahrscheinlich eingestuft.

4.3.2 Unfallszenario Arbeitsunfall (ACC-03)

Dieses Unfallszenario bezieht sich insbesondere auf Instandhaltungs- und Wartungsaktivitäten bei denen eine unsachgemäße Arbeit bzw. Nutzung/Anwendung von Werkzeugen die Ursache ist. Da hierbei nur Einzelpersonen oder Personen in unmittelbarer Nähe betroffen sind (bspw. Mitarbeiter in der Instandhaltung), wurde der Schweregrad mit „kritisch“ (max. zehn Todesfälle) eingestuft. Für diesen Fall wird der Grad der Häufigkeit, wiederum mit einer konservativ erscheinenden Annahme, als gelegentlich gewählt.

4.3.3 Unfallszenario Fahrzeug kann Gefahrenbereich nicht oder nur verzögert verlassen (ACC-09)

Der Schweregrad dieses Unfallszenarios kann sehr unterschiedlich ausfallen und hängt primär von der Art bzw. den Umständen des Gefahrenbereichs ab. Als schlimmster anzunehmender Fall wird angenommen, dass das Fahrzeug einen Bereich mit einer hohen toxischen und/oder thermischen Belastung nur verzögert verlassen kann und das Personal und die Passagiere im Fahrzeug diesen Belastungen ausgesetzt sind. Es wird für die vorliegende Risikoanalyse die vereinfachte Annahme getroffen, dass viele der beförderten Personen (mindestens 11) von den schwersten Konsequenzen (Tod durch Erstickern und/oder tödliche Verbrennungen) betroffen sind. Wie bereits im Abschnitt 4.3 beschrieben, stellt diese Annahme eine konservative Abschätzung dar, die in konkreten Anwendungsfällen bzw. Projekten durch weiterführende Analysen präzisiert werden kann.

Bei der Ermittlung des Grads der Häufigkeit dieses Unfallszenarios muss die Wahrscheinlichkeit einer externen Gefahrensituation (z. B. Feuer, Rauch etc.) berücksichtigt werden. Das Fahrzeug muss sich entweder schon in diesem Bereich befinden oder in diesen hineinfahren und dann auch noch nur verzögert, z. B. aufgrund reduzierter Antriebsleistung, wieder verlassen können. Diese Verkettung wird als sehr unwahrscheinlich eingestuft. In anderen Worten: Das Auftreten eines solchen Unfallszenarios mit mehr als 10 Toten ist sehr unwahrscheinlich, aber es kann eben nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Das Restrisiko kann daher durch geeignete Maßnahmen/Kontrollen reduziert werden.

4.3.4 Unfallszenario Kollision, Entgleisung etc. (ACC-10)

Dieses Unfallszenario bezieht sich auf Unfälle (z. B. Kollision, Entgleisung etc.) eines Schienenfahrzeugs aufgrund einer Störung der Fahrzeugsteuerung oder externer Einrichtungen (z. B. signaltechnische Einrichtungen der Infrastruktur) verursacht durch unzulässige elektromagnetische Strahlung aus der Steuereinheit des H₂-Antriebsystems. Da bei Kollisionen und/oder Entgleisungen alle Fahrzeuginsassen betroffen sein können, wird der Schweregrad mit „katastrophal“ (mehr als zehn Todesfälle) eingestuft. Für diesen Fall wird der Grad der Häufigkeit, wiederum mit einer konservativ erscheinenden Annahme, als selten gewählt.

4.3.5 Unfallszenario Kontamination von Personen (ACC-11)

Dieses Unfallszenario bezieht sich auf eine Kontamination von Personen durch ätzende und/oder toxische Stoffe infolge einer ungewollten chemischen Reaktion. Der Schweregrad dieses Unfallszenarios kann sehr unterschiedlich ausfallen und hängt primär von der chemischen Zusammensetzung, der Menge (Masse/Volumen), der Konzentration und der Verteilung des ätzenden und/oder toxischen Stoffes nach seiner Freisetzung ab. Für Lithium gilt, dass bei Kontakt mit Wasser (z. B. Löschwasser) Lithiumlauge (LiOH) entstehen kann, die zu schweren Verätzungen und Verbrennungen führen kann. Für dieses Unfallszenario wird angenommen, dass zum einen eine relativ geringe Menge von Lithium in der Batterie vorhanden ist und zum anderen nur eine begrenzte Anzahl von Personen mit der Lithiumlauge in gefährlichen Kontakt kommt. Es muss daher nicht mit vielen Toten gerechnet werden und der Schweregrad wird mit kritisch eingestuft.

Bei der Ermittlung des Grads der Häufigkeit dieses Unfallszenarios ist die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes zu berücksichtigen. Zudem müssten im Falle eines Brandes auch noch die im Bereich des Brandes befindlichen Personen tatsächlich mit der Lithiumlauge in gefährlichen Kontakt kommen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Rettungs- und insbesondere Löschkräfte im Umgang mit dieser Gefahr geschult sind. Der Grad der Häufigkeit wird für dieses Unfallszenario nicht zuletzt aus diesem Grunde mit unwahrscheinlich bewertet. In anderen Worten: Das Unfallszenario einer Kontamination von

Personen durch ätzende und/oder toxische Stoffe infolge einer ungewollten chemischen Reaktion mit einem oder bis zu 10 Toten ist unwahrscheinlich, aber möglich. Das Restrisiko kann daher durch geeignete Maßnahmen/Kontrollen reduziert werden.

4.4 Initiale Risikobewertung

4.4.1 Methodik der initialen Risikobewertung

Im Rahmen der initialen Risikoabschätzung wird basierend auf der zuvor beschriebenen Gefährdungsidentifikation für jede Gefährdung bzw. dem ihr zugeordneten Unfallszenario die erwartete Häufigkeit des Auftretens des Unfalls sowie dessen Schweregrad qualitativ ermittelt und in Form einer Risikomatrix dargestellt. Diese in verschiedenen Industrie- und Verkehrssektoren bekannte Darstellungsweise kommt insbesondere auch im Eisenbahnwesen häufig zum Einsatz und die Risikomatrix ist in der Bahnnorm EN 50126-1:2017 ausführlich beschrieben. Die gewählten Kategorien für die Unfallhäufigkeit, den Schweregrad und die Risikoakzeptanz sind nachfolgend beschrieben.

Die Kategorie-Definitionen sind an die in der Bahnnorm EN 50126-1:2017 beispielhaft genannten Festlegungen angelehnt. Zum besseren Verständnis wurden die Definitionen für dieses Projekt angepasst.

Der Grad der Häufigkeit bezieht sich dabei auf die Häufigkeit eines Unfalls als Folge der spezifischen Gefährdung und auf ein einzelnes Element, welches in diesem Fall das mit einem H₂-Antriebssystem ausgestattete Schienenfahrzeug (Triebzug, Lokomotive etc.) ist. Es wird vereinfachend angenommen, dass dieses Fahrzeug jährlich 5.000 Stunden in Betrieb ist.

TABELLE 10: HÄUFIGKEITSKATEGORIEN

Grad der Häufigkeit	Beschreibung	Äquivalentes Auftreten für ein einzelnes Element
häufig	Das Unfallszenario wird häufig stattfinden.	häufiger als einmal innerhalb eines Zeitraums von etwa 6 Wochen
wahrscheinlich	Das Unfallszenario wird voraussichtlich oft auftreten.	etwa einmal alle 6 Wochen bis einmal jährlich
gelegentlich	Das Unfallszenario wird voraussichtlich mehrere Male auftreten.	etwa einmal jährlich bis einmal alle 10 Jahre
selten	Es kann davon ausgegangen werden, dass das Unfallszenario auftreten wird.	etwa einmal alle 10 Jahre bis einmal alle 1.000 Jahre
unwahrscheinlich	Das Unfallszenario ist unwahrscheinlich, aber möglich.	etwa einmal alle 1.000 Jahre bis einmal alle 100.000 Jahre
sehr unwahrscheinlich	Es kann angenommen werden, dass das Unfallszenario nicht eintritt.	einmal innerhalb eines Zeitraums von etwa 100.000 Jahren oder länger

Zur Ermittlung der Unfallhäufigkeit wird ein Zwischenschritt, nämlich die Abschätzung der Häufigkeit des Auftretens der Ursache, vorgenommen. Es werden dafür die gleichen sechs Häufigkeitsgrade verwendet,

aber eben auf die Ursache und nicht auf den Unfall bezogen. Es wird weiterhin die Annahme getroffen, dass für keine der identifizierten Gefährdungen ein unmittelbares Unfallrisiko angenommen werden muss. Mit anderen Worten: Das Auftreten einer (Unfall-)Ursache hat bei keiner der identifizierten Gefährdungen direkt bzw. zwangsläufig den Unfall zur Folge. Daher kann in der Regel bei der Festlegung der initialen Unfallhäufigkeit die Häufigkeit der Ursache um eine Stufe (z. B. von „gelegentlich“ dann auf „selten“) reduziert werden. Ausnahmen für diese Vorgehensweise sind Gefährdungen, für die zwar auch nicht zwangsläufig ein direktes Unfallpotential festzustellen ist, die Wahrscheinlichkeit, dass es zum jeweiligen Unfall kommt, jedoch so hoch eingeschätzt wird, dass auf eine Abstufung verzichtet wird. Es sind dies folgende Gefährdungen:

- unsachgemäße Arbeit an heißen Oberflächen der Batterie
- Arbeit aufgrund von im Fehlerfall heißen Oberflächen der Batterie
- Freisetzen von ätzenden und/oder toxischen Stoffe durch mechanisches Versagen der Umschließung der Batterie
- Freisetzen von ätzenden und/oder toxischen Batteriestoffen aufgrund betrieblicher Fehler
- Freisetzen von ätzenden und/oder toxischen Stoffe aus der Brennstoffzelle aufgrund betrieblicher Fehler
- Freisetzen von Wasserstoff durch gewolltes Ablassen des Wasserstoffs mittels thermischer Druckentlastungsvorrichtung (thermally-activated pressure relief device – TPRD).

Für die Bewertung des Schweregrades gelten vier Kategorien, die den möglichen Folgen, zum einen für Personen und die Umwelt und zum anderen für den Bahnbetrieb, zugeordnet sind. Bei den Folgen wird zwischen Todesfällen, Schwerverletzten und Leichtverletzten unterschieden. Für eine Kalibrierung dient das sogenannte Todesfalläquivalent, welches gemäß EN 50126-1:2017 einen Ausdruck für die Angabe von Todesfällen und gewichteten Verletzungen und eine Vereinbarung für das Kombinieren von Verletzungen und Todesfällen in einem Zahlenwert darstellt, um die Beurteilung und den Vergleich von Risiken zu erleichtern. Es gilt folgende Festlegung:

Ein Todesfalläquivalent \approx 1 Todesfall \approx 10 schwere Verletzungen \approx 100 leichte Verletzungen

TABELLE 11: SCHWEREGRADEKATEGORIEN

Schweregrad-kategorie	Beschreibung
katastrophal	viele Todesfälle (wahrscheinlich mehr als 10) und/oder extremer Umweltschaden
kritisch	ein bis zehn Todesfälle und/oder schwerer Umweltschaden
geringfügig	nur schwere oder leichte Verletzungen und/oder schwere Umweltschaden
unbedeutend	möglicherweise leichte Verletzung

Wie bereits erwähnt, ergibt sich in der Risikomatrix nach vorgenommener Einstufung der Unfallhäufigkeit und des Schweregrads eine Risikostufe bzw. ein Feld in der Matrix.

TABELLE 12: RISIKOMATRIX (QUELLE: EN 50126-1:2017CHWEREGRADKATEGORIEN)

Häufigkeit des Auftretens eines Unfalls (verursacht durch Gefährdung)	Risikoakzeptanzkategorien			
A – häufig	nicht akzeptabel	nicht akzeptabel	nicht akzeptabel	unerwünscht
B – wahrscheinlich	nicht akzeptabel	nicht akzeptabel	unerwünscht	tolerabel
C – gelegentlich	nicht akzeptabel	unerwünscht	unerwünscht	tolerabel
D – selten	unerwünscht	unerwünscht	tolerabel	vernachlässigbar
E – unwahrscheinlich	unerwünscht	tolerabel	vernachlässigbar	vernachlässigbar
F – sehr unwahrscheinlich	tolerabel	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar
	1 – katastrophal	2 – kritisch	3 – marginal	4 – unbedeutend
	Schweregrad eines Unfalls (durch eine Gefährdung verursacht)			

Die im Projekt verwendete und in Tabelle 12 gezeigte Risikomatrix beinhaltet vier verschiedene Risikoakzeptanzkategorien. Für jede dieser Kategorien sind anzuwendende Maßnahmen definiert (s. a. Tabelle 13), die dem in EN 50126-1:2017 enthaltenen Vorschlag entsprechen.

TABELLE 13: RISIKOAKZEPTANZKATEGORIEN (QUELLE: EN 50126-1:2017)

Risikoakzeptanzkategorie	Anzuwendende Maßnahmen
nicht akzeptabel	Das Risiko muss eliminiert werden.
unerwünscht	Das Risiko darf nur dann akzeptiert werden, wenn eine Minderung nicht durchführbar ist und die Zustimmung des Bahnunternehmens oder der zuständigen Sicherheitsbehörde vorliegt.
tolerabel	Das Risiko kann unter der Voraussetzung angemessener Kontrollen (z. B. Instandhaltungsmaßnahmen oder -regeln) und mit Zustimmung des verantwortlichen Bahnunternehmens toleriert und akzeptiert werden.
vernachlässigbar	Das Risiko ist ohne Zustimmung der Bahnunternehmen annehmbar.

Bei der in diesem Abschnitt beschriebenen Risikoabschätzung handelt es sich um die initiale Bewertung, die die in Abschnitt 3.2.1 beschriebene Basisarchitektur eines H₂-Antriebssystems für ein Schienenfahrzeug bewertet und noch keine risikomindernden Maßnahmen berücksichtigt. Für die Reduzierung des Risikos sind geeignete Maßnahmen, die ggfs. über die Sicherheitselemente der im Abschnitt 4.6 beschriebenen erweiterten Architektur hinausgehen bzw. diese ergänzen, im Laufe des Projekts zu identifizieren. Anschließend kann eine erneute Risikoabschätzung, ebenfalls mittels der Methode der Risikomatrix, dann aber unter Berücksichtigung der identifizierten Maßnahmen, vorgenommen werden.

4.4.2 Resultat der initialen Risikobewertung

Die Anzahl der ermittelten Gefährdungen in den verschiedenen Risikokategorien ist in den nachstehenden Tabellen aufgeführt. Die Tabellen spiegeln die Risikobewertung vor Minderungsmaßnahmen wider. In Summe wurden 158 Gefährdungen identifiziert, deren initiales Risiko nach der obigen Definition wie folgt aufteilt:

TABELLE 14: INITIALES RISIKO

Risikoakzeptanzkategorie	Initiales Risiko
nicht akzeptabel	97
unerwünscht	61
tolerabel	0
vernachlässigbar	0
	158

Entsprechend der festgelegten Risikomatrix verteilen sich die Gefährdungen wie folgt:

TABELLE 15: VERTEILUNG DES INITIALEN RISIKOS NACH HÄUFIGKEIT UND SCHWERE

Häufigkeit \ Schwere	1 - katastrophal	2 - kritisch	3 - marginal	4 - unbedeutend
A - häufig	0	0	0	0
B - wahrscheinlich	0	0	0	0
C - gelegentlich	97	19	0	0
D - selten	38	4	0	0
E - unwahrscheinlich	0	0	0	0
F - sehr unwahrscheinlich	0	0	0	0

Weitere Details und Einzelheiten zur Analyse sind der Anlage 1 zu entnehmen.

4.5 Maßnahmenplanung

Bei der Maßnahmenplanung werden auf Basis der identifizierten Ursachen von Gefährdungen Möglichkeiten identifiziert, die bei ihrer Anwendung risikomindernd wirken. Durch entsprechende Maßnahmen könnte entweder die Wahrscheinlichkeit, dass es zum Unfall kommt, niedriger und/oder der Schweregrad geringer eingestuft werden. Prinzipiell können die Maßnahmen in betriebliche oder technische Maßnahmen unterschieden werden. Dies soll an zwei Beispielen erläutert werden:

1. Das Risiko durch eine mögliche Störung der Steuerung H₂-Systems aufgrund elektromagnetischer Einwirkung kann vermindert werden, indem nachgewiesen wird, dass die Steuerung die Anforderungen aus EN 50121-3-2:2016 bzgl. elektromagnetischer Strahlung erfüllt.
2. Das Risiko einer Störung des chemischen/physikalischen Prozesses der Energieerzeugung in der Brennstoffzelle aufgrund verunreinigten Sauerstoffs kann vermindert werden, indem ausschließlich qualifizierte Filter verwendet werden und diese regelmäßig gereinigt bzw. ausgetauscht werden.

Während es sich bei dem ersten Beispiel um eine technische Maßnahme handelt, kommt beim zweiten Beispiel die Kombination einer technischen und einer betrieblichen Maßnahme zum Tragen.

Bei der Identifikation möglicher Maßnahmen wurde die Brainstorming-Technik mit einer systematischen Normenrecherche (Verweis auf Kapitel 5) kombiniert. Der Ablaufprozess für die Maßnahmenplanung ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Die identifizierten Ursachen werden dahingehend separiert, dass einzelne Parameter für die gezielte Normrecherche abgeleitet und somit gezielt die normativen Anforderungen identifiziert wurden.



Abbildung 6: Ablaufprozess

Mit den identifizierten Anforderungen werden dann u. a. technische Vorgaben an die Konstruktion und Auswahl der Materialien abgeleitet werden, die bei der finalen Architektur zu berücksichtigen sind. Identifizierte betriebliche Maßnahmen sind im betrieblichen Regelwerk zu berücksichtigen und es ist sicherzustellen, dass die Maßnahmen korrekt und vollständig vom Betriebspersonal umgesetzt werden.

4.6 Finale Risikobewertung

4.6.1 Methodik der finalen Risikobewertung

Wie schon beim initialen Risiko praktiziert, werden auch für das finale Risiko zum einen die Unfallhäufigkeit und zum anderen der Schweregrad des Unfalls bewertet. Es kommt die in Tabelle 12 dargestellte Risikomatrix erneut zur Anwendung.

Bei der Bewertung der finalen Unfallhäufigkeit werden die festgelegten Maßnahmen wie folgt berücksichtigt: Es wird um eine Stufe (z. B. von „selten“ auf „unwahrscheinlich“) reduziert, wenn entweder nur eine einzelne Maßnahme identifiziert bzw. festgelegt wurde, oder im Falle von mehreren Maßnahmen deren unabhängige Wirkung nicht nachweislich gegeben ist. Es kann um zwei Stufen (z. B. von „selten“ auf „sehr unwahrscheinlich“) reduziert werden, wenn mindestens zwei voneinander unabhängige Maßnahmen identifiziert bzw. festgelegt werden.

Bei der Bewertung des Schweregrades wird wie auch bereits bei der initialen Risikobewertung die Anzahl der mutmaßlich von einem Unfall betroffenen Personen Rechnung getragen. Handelt es sich um potentiell tödliche Unfälle, bei denen neben Betriebspersonal auch Passagiere und/oder Dritte, betroffen sind,

so wird die Kategorie „katastrophal“ vergeben. Die Grenze wird bei 10 oder mehr betroffenen Personen gezogen. Die Kategorie „kritisch“ gilt für eine Personenzahl von weniger als 10 Personen.

Diese Annahme gilt für:

- alle Gefährdungen, die im direkten Zusammenhang mit Wartungs- oder Reparaturarbeiten zu sehen sind, bzw. bei denen eben ausschließlich das entsprechende Personal betroffen wäre;
- Gefährdungen im Zusammenhang mit der Kontamination von Personen durch toxische oder ätzende Stoffe, da die Kontamination örtlich stärker begrenzt ist, als es beispielsweise für einen Brand oder eine Explosion im öffentlich zugänglichen Bereich angenommen werden muss;
- Ansammlung von Wasserstoff in einem betroffenen Bereich und dortiger Verdrängung des Sauerstoffs.

4.6.2 Resultat der finalen Risikobewertung

In Summe wurden 158 Gefährdungen identifiziert deren finales Risiko sich nach der obigen Definition wie folgt aufteilt (Tabelle 16):

TABELLE 16: FINALES RISIKO

Risikoakzeptanzkategorie	Finales Risiko
nicht akzeptabel	0
unerwünscht	46
tolerabel	105
vernachlässigbar	7
	158

Die Anzahl der Gefährdungen in den verschiedenen Risikokategorien spiegelt die Risikobewertung nach den Minderungsmaßnahmen wider.

Entsprechend der festgelegten Risikomatrix verteilen sich die Gefährdungen wie folgt (Tabelle 17):

TABELLE 17: VERTEILUNG DES FINALEN RISIKOS NACH HÄUFIGKEIT UND SCHWERE

Häufigkeit \ Schwere	1 - katastrophal	2 - kritisch	3 - marginal	4 - unbedeutend
A - häufig	0	0	0	0
B - wahrscheinlich	0	0	0	0
C - gelegentlich	0	0	0	0
D - selten	0	0	0	0
E - unwahrscheinlich	46	69	0	0
F - sehr unwahrscheinlich	36	7	0	0

Weitere Details und Einzelheiten zur Analyse sind auch hier der Anlage 1 zu entnehmen.

Das Ergebnis der Risikobewertung (Tabelle 18) zeigt, dass die identifizierten Maßnahmen geeignet sind, ein nicht akzeptables Risiko im Zusammenhang mit Wasserstoffanwendungen in Schienenfahrzeugen auszuschließen. In den 46 Fällen, in denen das finale Risiko als unerwünscht eingestuft ist, darf das Risiko nur dann akzeptiert werden, wenn eine Minderung nicht durchführbar ist und die Zustimmung des Bahnunternehmens oder der zuständigen Sicherheitsbehörde vorliegt. Es wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen werden, dass es sich bei der hier beschriebenen Untersuchung/Bewertung um eine generische Risikobewertung handelt. Diese soll und kann eine projektspezifische Risikobewertung mit einer die tatsächlichen projektspezifischen Bedingungen berücksichtigenden Maßnahmenfestlegung nicht ersetzen. Es sollte das Ziel sein, durch weitere oder ggf. auch alternative Maßnahmen, das projektspezifische Restrisiko für alle Gefährdungen so zu senken, dass es als tolerabel oder als vernachlässigbar eingestuft werden kann.

TABELLE 18: ÜBERSICHT DES ERMITTELTEN RISIKOS

Risikoakzeptanzkategorie	Initiales Risiko	Finales Risiko
nicht akzeptabel	97	0
unerwünscht	61	46
tolerabel	0	105
vernachlässigbar	0	7
	158	158

Auch für die Gefährdungen, für die in dieser generischen Risikobewertung ein tolerables oder vernachlässigbares finales Risiko bzw. Restrisiko ermittelt wurde, sind die entsprechenden Maßnahmen und deren Bewertung hinsichtlich ihrer Risikominderung in der projektspezifischen Risikobewertung zu verifizieren.

5 Normrecherche

5.1 Allgemeines

Für die Identifikation, ob und ggf. welche bereits vorhandenen Anforderungen aus anderen H₂-Anwendungen übernommen werden können und in welchen Bereichen für die Anwendung im Schienenfahrzeugbereich noch Handlungsbedarf besteht (Anpassung von Anforderungen oder Neu-Definition), wurde zunächst eine initiale Gesamtrecherche durchgeführt.

Diese erstreckte sich über alle Sektoren, denn wie auch die folgende Abbildung 7 aus dem Vortrag von Hr. Seibicke (DIN) im Rahmen der Deutschen Wasserstoffversammlung (vom 26.01. – 27.01.2021) zeigt, ist der Einsatz der Wasserstofftechnologie und deren Normierung in anderen Sektoren sehr stark verbreitet:

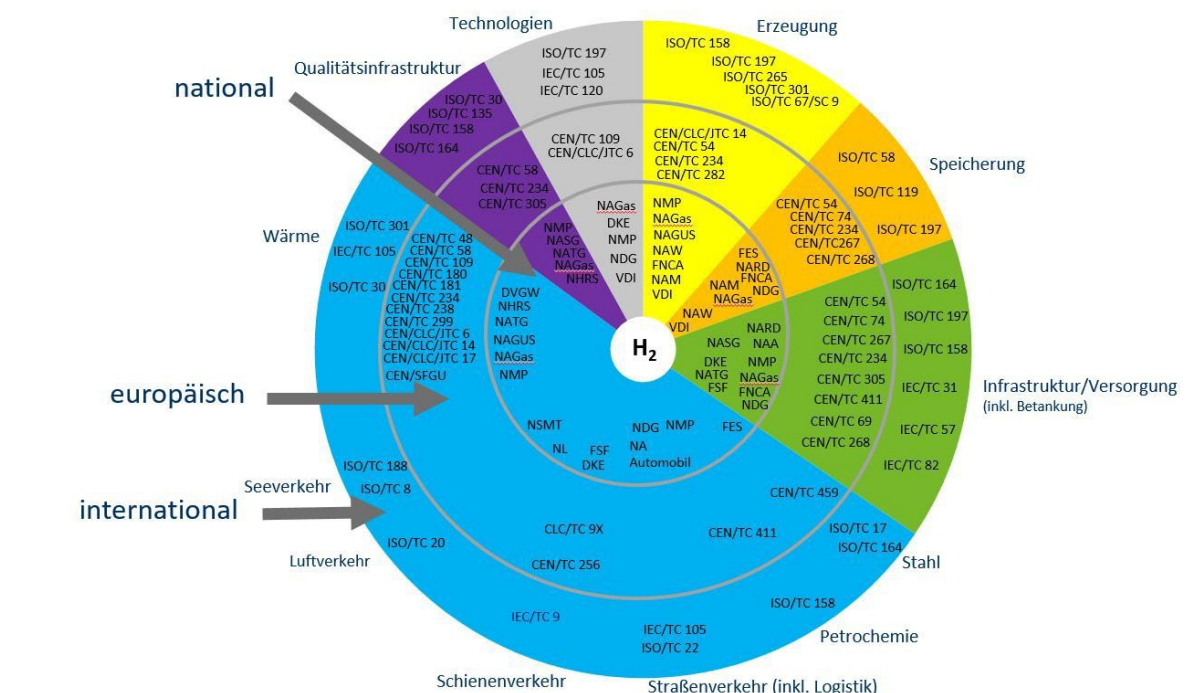


Abbildung 7: Übersicht der Normungsgremien (Quelle: DIN – Urheber der Grafik)

Im Schienenverkehr gab es erste Normungsaktivitäten, wie in der Abbildung 7 dargestellt, im CEN/TC 256 („Railway applications – Ground based services – Hydrogen refuelling equipment“ (WI=00256957))². Nach Information des zuständigen CEN-CENELEC Mitarbeiters wurde jedoch beschlossen, die Aktivitäten zu stoppen, zurückzuziehen, auf die Ebene des ISO/TC 269³ zu migrieren und dort in der Arbeitsgruppe ISO/TC 269/AHG 2 fortzusetzen. Die bereits geleistete Arbeit wird als Grundlage für eine neue ISO-Norm zum gleichen Thema dienen.

² Stand August 2021 – aktuell nicht mehr abrufbar, da die Aktivitäten zurückgezogen / gestoppt wurden): https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:22:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:6237,25&cs=1B006FA5DCF161D6A4FAD3D5A0DED08BB

³ Übersicht des ISO/TC 269 (online aufgerufen 07-2022); ISO – ISO/TC 269 – Railway applications

Diese Migration wird die Verknüpfung der normativen Verweise mit der IEC-Norm erleichtern, die derzeit im IEC/TC 69 (und parallel dazu im CLC/TC 9X) zu Brennstoffzellensystemen für Schienenfahrzeuge entwickelt wird.

Die Aktivitäten bei der IEC/TC 9, die im DKE K 351 national gespiegelt werden, beinhalten die Erarbeitung der Normenreihe IEC 63341 („Railway applications – Rolling stock – Fuel cell systems for propulsion“) mit mehreren Teilen. Im Teil 1 werden die normativen Anforderungen der Brennstoffzelle⁴, Teil 2: Speicherung H₂ auf dem Fahrzeug⁵ und im Teil 3: spezifische Tests der Brennstoffzelle (u. a. thermische Test, Fahrspiel) behandelt werden. Ein Committee Draft (CD) ist für Teil 1 im Januar 2023 und für Teil 2 im April 2023 geplant. Ein CD für Teil 3 der IEC 63341 ist ebenfalls für April 2023 anvisiert.

5.2 Vorgehensweise

Bei der initialen Normrecherche wurde folgende Vorgehensweise bei der Suche gewählt:

1. Nutzung der TÜV Rheinland Datenbank (WISDOM) ergänzt durch weitere qualifizierte Datenbanken wie PERINORM und dem entsprechenden Expertenwissen verknüpft mit spezifischen Deskriptoren (Schlagwörtern).
2. Bei der Suche wurde ein „Suchraum“ gewählt, der regionale Bezüge mit einbezieht wie
 - National
 - Europa
 - Nordamerika
 - Welt

Spezifische Verbände/Normungsgeber wie SAE / DIN (Beuth-Verlag) / EIGA / Berufsgenossenschaften etc. wurden dann gezielt durchsucht.

<https://www.sae.org/standards/>

<https://www.beuth.de/de>

<https://www.eiga.eu/organisation/councils/igc-industrial-gases-council/>

Die EIGA-Standards sind nicht Bestandteil von PERINORM oder WISDOM und wurden daher separat durchsucht.

Erste Ergebnisse von Regelwerken und Normen lieferten über 500 Einträge, wie der angehängten Auflistung (Anlage 2) zu entnehmen ist. Diese ist die Basis für die weiteren Arbeitsschritte und Untersuchungen.

⁴ Aktueller Stand zum Teil 1 – IEC 63341-1 ED1 (online aufgerufen 02-2022):

https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:408497623016243:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:1248,23,104369

⁵ Aktueller Stand zum Teil 2 – IEC 63341-2 ED1 (online aufgerufen 02-2022):

https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:408497623016243:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:1248,23,105233

3. Erste Sortierung und entsprechende Zuordnungen zur folgenden Struktur:

Untersystem Fahrzeug	H ₂ – Bezug
- Betankung am Fahrzeug	Tankanlage inkl. Datenschnittstellen
- Speicherung	H ₂ -Tanksystem (kryogen)
	H ₂ -Tanksystem (Druckwasserstoff)
	Tanksystem (LOHC)
- Erzeugung (von Wasserstoff)	LOHC-Dehydrierreaktor; Verdampfer für kryogenen H ₂
- Verteilung/Transport	H ₂ führende Rohrleitungen/Schläuche
- Antriebssystem und Komponenten	Brennstoffzellen
	Gasturbinen
	Gasmotoren
- Batterietechnik	Wechselwirkungen mit Brennstoffzelle
- Brandschutz/Explosionsschutz	Detektion/Löschanlagen; potentielle Zündquellen

Abbildung 8: Strukturzuordnung am Fahrzeug

4. Mittels Suchkriterien – ermittelt durch die initiale Risiko- und Gefährdungsanalyse - werden die identifizierten Regelwerke und Normen gezielt nach den relevanten Anforderungen für den Schienenverkehr gesichtet und danach gefiltert/kategorisiert.

Die Suchkriterien (im folgenden Parameter bezeichnet) wurden wie folgt abgeleitet:

- die Parameter werden aus dem Tabellenblatt „Gefährdungen BA“ übernommen,
- darauf aufbauend wurde eine Baumstruktur (Tabellenblatt) erstellt, welches die entsprechenden Hauptparameter zusammenfasst und nach System und deren Ursachen separiert,
- entsprechende Normen/Regelwerke wurden hinzugefügt und die darin festgelegten Anforderungen identifiziert und als Maßnahme für die finale Risikoanalyse übernommen.

Beispiel:

- Für die Gefährdung „Freigesetzter Wasserstoff“ wurde ein „Mechanisches Versagen“ als Hauptparameter am Funktionselement identifiziert.
- Die Ursache ist ein Konstruktionsfehler, der sich durch nachfolgende Ursachen differenzierter unterscheidet:
 - Dimensionierung
 - Ungeeignete Materialien
 - Unzureichende Auslegung
 - Druckfestigkeit
- Für diese verschiedenen Ursachen wurden basierend auf dem Hauptparameter normative Vorgaben mit den entsprechenden Anforderungen identifiziert und festgehalten.

Die identifizierten und für die Betrachtung verwendeten Normen wurden in der Anlage 2 in der Spalte „Anwendung“ entsprechend gekennzeichnet.

6 Zusammenfassung

Für den vorliegenden Bericht wurde zunächst für die Wasserstoffanwendung in Schienenfahrzeugen eine generische Systemdefinition als Grundlage der Risikobewertung erstellt. Anschließend wurden relevante Gefährdungen identifiziert und hinsichtlich ihres Risikos bewertet. Die Risikobewertung für das generische Wasserstoffsystem erfolgte in zwei Stufen:

1. Bewertung des initialen Risikos (d. h. ohne Berücksichtigung risikomindernder Maßnahmen),
2. Bewertung des finalen Risikos (d. h. Restrisiko unter Berücksichtigung risikomindernder Maßnahmen).

Für die Maßnahmenplanung wurde eine Normrecherche ergänzt durch bahnspezifische Anforderungen vorgenommen. Das Ergebnis der Risikobewertung des generischen Systems zeigt, dass die identifizierten Maßnahmen grundsätzlich geeignet sind, ein nicht akzeptables Risiko im Zusammenhang mit Wasserstoffanwendungen in Schienenfahrzeugen auszuschließen.

Die Maßnahmen werden im Anhang „Diskussionsentwurf für eine Richtlinie“ als Leitfaden für den Zulassungsprozess zusammengefasst. Dieser Leitfaden gibt basierend auf dem Ergebnis der generischen Gefährdungs- und Risikoanalyse sicherheitstechnische Hinweise zum Einbau und Verwendung von Komponenten für die Anwendung von Wasserstoff auf Schienenfahrzeugen. Da aktuell, wie unter 5.1 entsprechend ausgeführt, für den Schienenverkehr entsprechende Normen und Standards erarbeitet werden, sollten die im Leitfaden referenzierten Normen bzw. Richtlinien als Basis verwendet und um die identifizierten bahnspezifischen Prüfungen ergänzt werden. Mittels der generischen Gefährdungs- und Risikoanalyse wurden einheitliche Beurteilungskriterien geschaffen, die projektspezifisch zu überprüfen und ggf. zu ergänzen oder zu erweitern sind.

Dieser Leitfaden stellt keine nationale technische Vorschrift (NTV) dar und dient als unterstützende Hilfe für das Sicherheitsmanagement oder für die Genehmigung für das Inverkehrbringen von Schienenfahrzeugen und die Genehmigung von Schienenfahrzeugtypen.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstruktur anhand des Durchführungskonzeptes von TÜV Rheinland InterTraffic10	
Abbildung 2: Bottom-Up-Methode	11
Abbildung 3: Basis-Architektur	15
Abbildung 4: Systemschnittstellen H ₂ -Antriebssystem.....	17
Abbildung 5: Unfall-Ereigniskette.....	22
Abbildung 6: Ablaufprozess	34
Abbildung 7: Übersicht der Normungsgremien (Quelle: DIN – Urheber der Grafik)	37
Abbildung 8: Strukturzuordnung am Fahrzeug.....	39
Abbildung 9: „Schematischer Aufbau eines H ₂ -Brennstoffzellenaufbaus“ mit optionaler Leckageüberwachung mit unbestimmter Anzahl von Meßstellen	48

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Systembestandteile	14
Tabelle 2: Komponenten und Funktionen der Basis-Architektur (Ausschnitt)	16
Tabelle 3: Schnittstelle H ₂ -Antriebssystem innerhalb des Fahrzeuges	18
Tabelle 4: Schnittstelle H ₂ -Antriebssystem zur Umgebung.....	18
Tabelle 5: Schnittstelle H ₂ -Antriebssystem zu Personen.....	18
Tabelle 6: Begriffe	23
Tabelle 7: Beispiel zur Vorgehensweise anhand einer Gefährdung	25
Tabelle 8: Unfallszenarien.....	25
Tabelle 9: Unfallszenarien und Anzahl der Personen.....	27
Tabelle 10: Häufigkeitskategorien	30
Tabelle 11: Schweregradkategorien	31
Tabelle 12: Risikomatrix (Quelle: EN 50126-1:2017schweregradkategorien.....	32
Tabelle 13: Risikoakzeptanzkategorien (Quelle: EN 50126-1:2017).....	32
Tabelle 14: Initiales Risiko.....	33
Tabelle 15: Verteilung des Initialen Risikos nach Häufigkeit und Schwere.....	33
Tabelle 16: Finales Risiko	35
Tabelle 17: Verteilung des finalen Risikos nach Häufigkeit und Schwere.....	35
Tabelle 18: Übersicht des ermittelten Risikos.....	36
Tabelle 19: Kapazitäten ausgewählter Körper mit beispielhafter Aufladung (Tabelle 13 aus TRGS 727, Seite 93 (Fassung 29.07.2016)).....	46

9 Quellenverzeichnis

Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland – Arbeitskreis Grundsatzfragen: Wasserstoff und dessen Gefahren, Ein Leitfaden für Feuerwehren, Bearbeitungsstand: Oktober 2008

Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband, Reinhold Wurster (LBST), Dr. Ulrich Schmidtchen (DWV) (November 2011): DWV Wasserstoff-Sicherheitskompendium, erstellt von Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) und Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband e. V. (DWV) [Online], [Zugriff am: Februar 2021]. Verfügbar unter: https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2015/06/Wasserstoff_kompendium.pdf

Prof. Dr.-Ing. Schmidt, Thomas (2020): Wasserstofftechnik Grundlagen, Systeme, Anwendungen, Wirtschaft, Ort: Carl Hanser Verlag München

EN 50126-1:2017, European Standard (2017): Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 1: Generic RAMS Process

IEC 63341, Standard under development; „Railway applications – Rolling stock – Fuel cell systems for propulsion“ Online, [Zugriff am: Februar 2022]. Verfügbar unter: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:408497623016243::::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:1248,23,105233

10 Anlagen

Die detaillierten Ergebnisse auf die im Bericht (u. a. Kapitel „4.4.2 Resultat der initialen Risikobewertung“, „4.6.2 Resultat der finalen Risikobewertung“, „5.2 Vorgehensweise“ und „6 Zusammenfassung“) verwiesen wird, befinden sich in den Anlagen zum Bericht. Die Anhänge sind über die unten angegebenen Links direkt aufrufbar.

Anlage 1: [Anl1_Risiko- und Gefährdungsanalyse mit Matrix_Rev04.xlsx](#)

Anlage 2: [Anl2_Normenliste H2-Regelwerke.xlsx](#)

11 Anhang – Diskussionsentwurf für eine Richtlinie

11.1 Geltungsbereich

Dieser Diskussionsentwurf richtet sich primär auf die Anwendung des Wasserstoffs als Druckwasserstoffsystem. Diese Lösung mit komprimiertem (gasförmigem) Wasserstoff (Druckwasserstoff, bis zu 70 MPa / 700 bar) hat sich aktuell als bewährte Lösung durchgesetzt und wird im Folgenden behandelt.

Andere Lösungen wie beispielsweise Flüssigkeitswasserstoffspeicher werden aktuell in dieser Richtlinie nicht behandelt.

11.2 Aufbau des Dokumentes

Neben einer allgemeinen Vorstellung und Einordnung des technischen Systems werden allgemein gültige Anforderungen zum Umgang mit Wasserstoff in der Einleitung (Kapitel 11.4) festgehalten. Diese initialen Anforderungen sind auch in Hinblick auf Personenschutz und Brandschutz im Schienenfahrzeug zu berücksichtigen (Kapitel 11.5) und werden schließlich durch spezifische Anforderungen in Hinblick auf Auswahl und Qualifikation der Komponenten sowie Prüfverfahren u. ä. für den Einsatz im Schienenfahrzeug (Kapitel 11.6) ergänzt. Zusätzlich werden in diesem Kapitel auch Anforderungen an das Fahrzeuggesamtsystem gestellt. Details zu den vorgeschlagenen Prüfverfahren und deren Ablauf sind den zitierten Anhängen zu entnehmen (siehe Quellenverzeichnis Kapitel 11.8)

Abschließend werden Anforderungen an Erstprüfungen und wiederkehrende Prüfungen im Fahrzeug (Kapitel 11.7) definiert.

11.3 Begriffsbestimmungen

Absperrventil (automatisches) bezeichnet ein Ventil zwischen dem Behälter und dem Wasserstoffsystem, das automatisch aktiviert werden kann und standardmäßig „geschlossen“ ist, wenn es nicht an eine Stromquelle angeschlossen ist.

ADR – Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (Original französisch: Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route)

Behälter bezeichnet jegliches System zum Speichern von komprimiertem gasförmigem Wasserstoff, ohne sonstige wasserstoffführenden Bauteile, die am Behälter befestigt oder in diesen eingebaut sein können.

Brennstoffzellensystem bezeichnet ein System, das die Luftzufuhreinheit, Brennstoffzellenstapel und Abgasleitung umfasst.

CHG oder CGH₂ (compressed gaseous hydrogen) – verdichteter gasförmiger Wasserstoff

Energiespeicher (nach DIN EN IEC 62928 und DIN EN IEC 62864-1) ist eine physische Ausrüstung, die aus Energiespeichertechnik, insbesondere einer Lithium-Ionen-Traktionsbatterieanlage, besteht.

MFP – Höchstzulässiger Betankungsdruck (maximum fuelling pressure)

NWP – Nennbetriebsdruck (nominal working pressure)

PRD – Druckentlastungsvorrichtung (pressure relief device) bezeichnet eine Vorrichtung, die bei Aktivierung unter bestimmten Betriebsbedingungen verwendet wird, um Wasserstoff aus einem unter Druck stehenden System freizusetzen und dadurch einen Ausfall des Systems zu verhindern.

RID – Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter (Original französisch: Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses) ist der Anhang C der Übereinkommen über den internationalen Eisenbahnverkehr (original französisch: Convention relative aux transports internationaux ferroviaires – COTIF)

TPRD – Thermische Druckentlastungsvorrichtung (thermally-activated pressure relief device) bezeichnet ein nicht wieder verschließbares PRD, das durch eine bestimmte Temperatur aktiviert und geöffnet wird, um Wasserstoffgas freizusetzen.

11.4 Einleitung

Um im Umgang mit Wasserstoff entsprechende Vorgaben für die Sicherheit zu definieren, ist es hilfreich seine Gefährlichkeit im Vergleich zu anderen Stoffen/Gasen einzuordnen. Wasserstoff hat eine untere Explosions- und Zündgrenze (UEG) von 4 Vol-% wie Methan und das überwiegend aus Methan bestehende Erdgas. In der praktischen Umsetzung bedeutet dies, dass Wasserstoff in technischen Anlagen in Bezug auf Explosionsschutz in gleicher Weise sicherheitstechnisch wie Erdgas behandelt werden sollte. Darüber hinaus hat Wasserstoff mit 0,02 mJ eine um den Faktor 10 geringere Zündenergie als Methan und Erdgas. Dieser Umstand birgt jedoch kein zusätzliches, erhöhtes Risiko im Umgang mit Wasserstoff, da die in der Praxis anzutreffenden Zündquellen eine ohnehin höhere Zündenergie liefern, wie die nachfolgende Tabelle verdeutlicht. [nach Schmidt].

TABELLE 19: KAPAZITÄTEN AUSGEWÄHLTER KÖRPER MIT BEISPIELHAFTER AUFLADUNG (TABELLE 13 AUS TRGS 727 – SEITE 93 (FASSUNG 29.07.2016))

Elektrostatische Aufladung von Personen und Gegenständen im Bereich technischer Anlagen

Körper	Kapazität C [pF]	Potential V [kV]	Energie E [mJ]
Flansch	10	10	0,5
kleine Metallgegenstände	10 – 20	10	0,5 – 1
Kleinbehälter (bis 50 Liter)	50 – 100	8	2 – 3
Metallbehälter (200 bis 500 Liter)	50 – 300	20	10 – 60
Person	100 – 200	12	7 – 15

Daher sind konstruktive Maßnahmen zu schaffen, um potentielle Zündquelle zu vermeiden und auch die Ansammlung eines zündfähigen Gasgemisches auszuschließen. Daher ist bei der Auslegung des Schienenfahrzeugkonzeptes die Installation aller gasführenden Teile in geschlossenen Räumen oder in Einbauträumen (gemeint sind insbesondere konstruktive Einhausungen oder Umschließungen am Fahrzeug), in denen sich Wasserstoff ansammeln und ein zündfähiges Gemisch bilden könnte, auszuschließen.

Bei der Verwendung von Wasserstoff in der Speicherform Druckwasserstoff in Schienenfahrzeugen ist mit zusätzlichen Gefährdungen zu rechnen, die sich durch den hohen Druck ergeben. Beim Versagen der unter hohem Druck stehenden Bauteile und deren Verbindungen sowie deren Einbau dürfen keine Gefährdung der Fahrgäste und Dritter

- durch unter hohem Druck austretende Gase/Flüssigkeiten,
- durch sich lösende/umherfliegende Bauteile,
- durchschlagende lose Enden von unter Druck stehenden Leitungsverbindungen,
- durch atemluftverdrängende Wirkung bzw. gesundheitsschädliche Wirkung von Gasgemischen entstehen.

Darüber hinaus ist bei der Integration im Schienenfahrzeug zu beachten, dass sich aufgrund der Druckunterschiede und damit verbundene temperaturbezogene Effekte im System an den Bauteilen gefrierende Kondensate bilden können und dadurch zusätzliche Gefährdungen entstehen können. Zusätzlich sind die im Betrieb maximal und minimal auftretenden Temperaturen bei der Auswahl und Konfiguration aller temperaturbelasteten und -beeinflussenden Bauteile zu berücksichtigen (Verweis auf die EN 50125-1 „Umweltbedingungen für Betriebsmittel auf Bahnfahrzeugen“ in Verbindung dem projektspezifischen Lastenheft).

Das betrachtet H₂-Gesamtsystem:

- muss mit Wasserstoff befüllt werden können;
- muss den Wasserstoff unter Druck speichern können;
- muss den Wasserstoff vom Tank zur Brennstoffzelle transportieren können;
- muss beim Transport von Wasserstoff verschiedenen Drücken standhalten können;
- erzeugt mit Hilfe einer Brennstoffzelle elektrische Energie aus Wasserstoff und Sauerstoff.

Zur Umsetzung dieser Anforderungen ist folgender prinzipielle Aufbau (Abbildung 9) notwendig. Hier wird nur der Anteil für die Stromerzeugung durch eine Brennstoffzelle mit einem Speichersystem (komprimierter (gasförmiger) Wasserstoff) dargestellt.

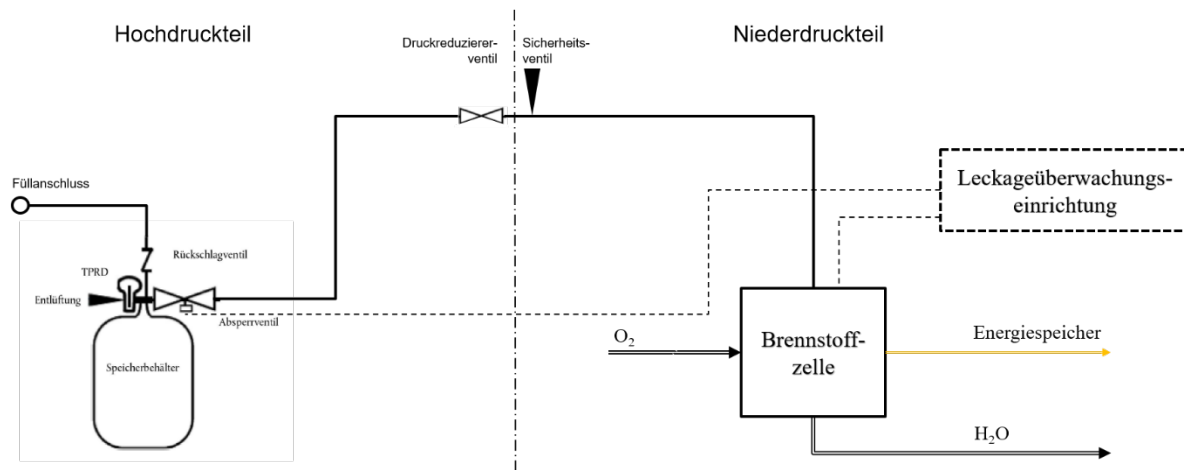


Abbildung 9: „Schematischer Aufbau eines H₂-Brennstoffzellenaufbaus“ mit optionaler Leckageüberwachung mit unbestimmter Anzahl von Meßstellen⁶

Das H₂-Gesamtsystem teilt sich in den

- **Hochdruckteil**, bestehend aus
 - Behälter mit
 - Füllanschluss (Betankungsschnittstelle),
 - Rückschlagventil in der Füllleitung,
 - automatischem Absperrventil,
 - Sicherheitseinrichtung – TPRD (Thermally-activated pressure relief device / Thermische Druckentlastungsvorrichtung),
 - Entlüftungseinrichtung,
 - Druckregler und
 - Hochdruckleitungen,

und den

- **Mittel- bzw. Niederdruckteil**, bestehend aus
 - Überdruckventil (Sicherheitsventil),
 - Brennstoffzelle mit
 - Luftzufuhreinheit (Luftansaugvorrichtung, Luftfilter, Gebläseeinrichtung, Ladeluftkühler, Luftbefeuchter),
 - Brennstoffzellenstapel und
 - Abgasanlage der Brennstoffzelle.

Darüber hinaus gehören je nach Ausführung des H₂-Gesamtsystem ein Kühl-/Abwasser-Management und Abwärme-Management sowie ein Leistungsregelungssystem hinzu.

⁶ Zur Überwachung des Systems auf eventuelle Undichtigkeiten dient eine Leckageüberwachungseinrichtung, welche die H₂-Konzentration an wesentlichen Baugruppen und Bauteilen (nur angedeutet in der Abbildung) zuverlässig bestimmen kann. Alternativ muss nach TRGS 722 4.5.2 (4) die Anlage dauerhaft technisch dicht sein.

11.5 Personenschutz und Brandschutz

Gefährdungen in Bezug auf Wasserstoff und den Umgang mit unter Druck stehenden Komponenten sind initial zu analysieren und bei der Auslegung und Konstruktion des Schienenfahrzeuges zu berücksichtigen. Das H₂-Gesamtsystem (wie in Abbildung 8 vereinfacht dargestellt) ist beim Brandschutzkonzept des Schienenfahrzeuges nach EN 45545 mit einzubeziehen und für die weitergehenden Betrachtungen zu berücksichtigen. Eine Brandrisikoanalyse des Herstellers muss besondere Maßnahmen des H₂-Gesamtsystems im Brandschutzkonzept des Fahrzeugs berücksichtigen.

Bei der Konzeption und Auslegung des H₂-Gesamtsystems steht folgendes Vorgehen im Zusammenhang mit der technischen Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff im Vordergrund:

1. Primärer Explosionsschutz als geeignete Form von Planung, Bau und Betrieb des Schienenfahrzeugs mit dem Ziel, die Bildung und Ausbreitung einer explosionsfähigen Atmosphäre zu verhindern;
2. der sekundäre Explosionsschutz durch konsequentes Vermeiden von Zündquellen und
3. der tertiäre Explosionsschutz durch geeignete bautechnische Begrenzung der Auswirkungen von Explosionen zu begegnen.

Für einen Betrieb des Schienenfahrzeuges ist der Aufbau des H₂-Systems als dauerhaft technisch dicht zu realisieren. Hierfür sind alle folgende Schritte zu berücksichtigen und notwendig:

- Verwendete Bauteile und Komponenten werden für die entsprechenden Einsatzbedingungen getestet und validiert (siehe nachfolgendes Kapitel); zusätzlicher Verweis auf die EN 45545-2 (Materialanforderungen)
- Nachweis auf Dauer technisch dichten Anlagenteile (siehe Kapitel 11.6.4)
- Erstprüfungen nach Einbau im Fahrzeug (siehe Kapitel 11.7.1)
- Wiederkehrende Prüfung (u. a. Dichtheitsüberprüfung) (siehe Kapitel 11.7.2)

11.6 Qualifikation des Wasserstoffsystems

11.6.1 Materialeigenschaften

Aufgrund der Permeationseigenschaft – Wechselwirkung vom Medium Wasserstoff und dem Werkstoff der Umhüllung – ergeben sich entsprechende Anforderungen an die Auswahl und Verwendung von Materialien im H₂-Gesamtsystem (für alle Bauteile und Komponenten). Ein entsprechender Nachweis der Materialverträglichkeit ist zu erbringen.

Die nachfolgenden Anforderungen sind dem Anhang XIV (Abschnitt F) der Verordnung (EU) 2021/535 entnommen und gelten nicht für Werkstoffe, die unter normalen Bedingungen nicht mit Wasserstoff in Berührung kommen.

11.6.1.1 Besondere Anforderungen

Die in Druckwasserstoffspeichersystemen verwendeten Werkstoffe müssen mit Wasserstoff in flüssigem und/oder gasförmigen Zustand verträglich sein. Unverträgliche Werkstoffe dürfen nicht miteinander in Berührung kommen.

Stähle

Stähle für Druckwasserstoffspeichersysteme müssen den in EN ISO 9809-1:2019, Abschnitte 6.1 bis 6.4 oder in EN ISO 9809-2:2019, Abschnitte 6.1 bis 6.3 enthaltenen Anforderungen an Werkstoffe entsprechen.

Rostfreie Stähle

Rostfreie Stähle für Druckwasserstoffspeichersysteme müssen der Norm EN 1964-3:2000, Abschnitte 4.1 bis 4.4, entsprechen.

Geschweißte rostfreie Stähle zur Verwendung als Liner von Behältern müssen der Norm EN 13322-2:2006, Abschnitte 4.1 bis 4.3 beziehungsweise Abschnitte 6.1, 6.2 und 6.4, entsprechen.

Aluminiumlegierungen

Aluminiumlegierungen für Druckwasserstoffspeichersysteme müssen den in der internationalen Norm EN ISO 7866:2012, Abschnitte 6.1 und 6.2 enthaltenen Anforderungen an Werkstoffe entsprechen.

Geschweißte Aluminiumlegierungen zur Verwendung als Liner von Behältern müssen den Abschnitten 4.2 und 4.3 sowie den Abschnitten 4.1.2 und 6.1 der Norm EN 12862:2000 entsprechen.

Werkstoffe für Kunststoffinnenbehälter

Für Kunststoffinnenbehälter von Wasserstoffspeicherbehältern sind aushärtende oder thermoplastische Werkstoffe zu verwenden. Die Verträglichkeit muss über die Qualifikation der Norm EN ISO 11114-2 nachgewiesen werden. Zum Nachweis ist die Norm EN ISO 11114-5, Prüfverfahren zur Bewertung der Kunststoffinnenbehälter heranzuziehen.

Fasern

Der Hersteller des Behälters ist verpflichtet während der gesamten vorgesehenen Betriebsdauer der Behälterkonstruktion die veröffentlichten Spezifikationen für Verbundwerkstoffe einschließlich der wichtigsten Prüfergebnisse (Zugprüfung) sowie die Empfehlungen des Materialherstellers zu Lagerung, Bedingungen und Haltbarkeitsdauer aufzubewahren.

Der Hersteller des Behälters ist verpflichtet während der gesamten vorgesehenen Betriebsdauer jedes Behälterloses die Bescheinigung des Faserherstellers, dass jede Lieferung den Produktspezifikationen des Herstellers entspricht, zu den Akten zu nehmen.

Der Hersteller muss auf Verlangen der für die Marktüberwachung zuständigen nationalen Behörde sowie auf Verlangen der Kommission die Informationen unverzüglich zur Verfügung stellen.

Harze

Bei dem zur Imprägnierung der Fasern verwendeten Polymerwerkstoff kann es sich um aushärtendes oder thermoplastisches Harz handeln.

11.6.1.2 Prüfung auf Wasserstoffverträglichkeit

Nach Anhang XIV (Abschnitt F) der Verordnung (EU) 2021/535 ist für metallische Werkstoffe, die in Druckwasserstoffspeichersystemen verwendet werden, eine Wasserstoffverträglichkeit gemäß den internationalen Normen EN ISO 11114-1:2017 und EN ISO 11114-4:2017 nachzuweisen. Hierbei sind die Prüfungen, die in Wasserstoffumgebungen durchgeführt werden, unter den Bedingungen wie sie im Betrieb zu erwarten sind, umzusetzen (bei 70 MPa-Systemen beispielsweise wird die Prüfung auf Wasserstoffverträglichkeit in einer Umgebung von 70 MPa bei einer Temperatur von -40°C durchgeführt).

Der Nachweis der Einhaltung der vorgenannten Bestimmungen ist nicht erforderlich für:

- a) Stähle gemäß der Norm EN ISO 9809-1:2018 Absätze 6.3 und 7.2.2;
- b) Aluminiumlegierungen gemäß der internationalen Norm EN ISO 7866: 2012, Absatz 6.1
oder
- c) bei vollumwickelten Behältern mit nichtmetallischem Liner.

11.6.1.3 Prüfung der Spannungsrisskorrosion

Darüber hinaus müssen Metalle und Legierungen eine Resistenz gegenüber Wasserstoffversprödung und wasserstoffverursachten Brüchen besitzen. Die EN ISO 7539-11 enthält einen Leitfaden zur Ermittlung der Schlüsselfaktoren, die bei Planung und Durchführung von Prüfungen zur Beurteilung der Beständigkeit von Metallen und Legierungen gegen Wasserstoffversprödung und wasserstoffinduzierte Rissbildung berücksichtigt werden sollten. Die einzelnen Prüfverfahren sind in den entsprechenden Normen beschrieben.

11.6.2 Komponentenqualifikation

Zur Qualifikation der Komponenten empfiehlt es sich die Anforderungen an das Druckwasserstoff-Speichersystem gemäß „Teil I – Spezifikation des Druckwasserstoff Speichersystems“ der UN-Regelung Nr. 134 (EU 2019/ECE 134 im Folgenden mit „UN ECE R134“ abgekürzt) initial zu übernehmen und mit bahnspezifische Prüfungen zu ergänzen.

Das Druckwasserstoff-Speichersystems definiert sich durch folgende Komponenten:

- 1. Druckbehälter
- 2. Primäre Verschlussvorrichtungen, drei Absperrvorrichtungen
 - TPRD,
 - Rückschlagventil und
 - Absperrventil

Jedes Absperrventil und TPRD, das zum primären Verschluss des Durchflusses aus dem Vorratsbehälter dient, muss direkt an oder in jedem Behälter installiert werden. Mindestens ein Bauteil mit Rückschlagventilfunktion muss direkt an oder in jedem Behälter installiert sein.

Die Komponenten müssen folgende Anforderungen erfüllen.

11.6.2.1 Druckbehälter

Im Allgemeinen sind folgende Überprüfungen durchzuführen.

- Vergleichswert des erstmaligen Berstdrucks (gemäß UN ECE R134 – 5.1.1.)
- Vergleichswert der erstmaligen Druckzyklus-Lebensdauer (gemäß UN ECE R134 – 5.1.2.)
- Überprüfungen der Leistungsbeständigkeit (hydraulische Folgeprüfungen) (gemäß UN ECE R134 – 5.2)
 1. Druckprüfung (gemäß UN ECE R134: Absatz 5.2.1 & Prüfverfahren Anhang 3 Absatz 3.1)
 2. Fall-(Stoß-)Prüfung (gemäß UN ECE R134: Absatz 5.2.2 & Prüfverfahren Anhang 3 Absatz 3.2)
 3. Prüfung auf Oberflächenschäden (gemäß UN ECE R134: Absatz 5.2.3 & Prüfverfahren Anhang 3 Absatz 3.3)
 4. Chemische Einwirkung und Druckzyklusprüfung bei Umgebungstemperatur (Medienbeständigkeitsauswahl nach den Vorgaben des Bahnbetriebes – gemäß UN ECE R134: Absatz 5.2.4 & Prüfverfahren Anhang 3 Absatz 3.4)
 5. Statische Druckprüfung bei hohen Temperaturen (gemäß UN ECE R134: Absatz 5.2.5 & Prüfverfahren Anhang 3 Absatz 3.4)
 6. Druckzyklus bei extremen Temperaturen (gemäß UN ECE R134: Absatz 5.2.6 & Prüfverfahren Anhang 3 Absatz 3.5)
 7. Prüfung des verbleibenden hydraulischen Drucks (gemäß UN ECE R134: Absatz 5.2.7 & Prüfverfahren Anhang 3 Absatz 3.1)
 8. Prüfung der verbleibenden Berstfestigkeit (gemäß UN ECE R134: Absatz 5.2.8 & Prüfverfahren Anhang 3 Absatz 2.1)
- Alternative Anforderungen für Behälter aus Verbundwerkstoffen können den Anforderungen der ISO 11119 (Gasflaschen – wiederbefüllbare Flaschen und Großflaschen aus Verbundwerkstoffen – Auslegung Bau und Prüfungen) bzw. EN 12245 (Ortsbewegliche Gasflaschen – vollumwickelte Flaschen aus Verbundwerkstoffen) und EN 12257 (Ortsbewegliche Gasflaschen – nahtlose umfangsgewickelte Flaschen aus Verbundwerkstoffen) entsprechen. Hierbei sind die jeweiligen Ausführungen umfangsumwickelt, vollumwickelt mit lasttragenden, metallischen Linern und vollumwickelt mit nicht lasttragenden, metallischen oder nichtmetallischen Linern oder ohne Liner zu berücksichtigen.

11.6.2.2 Primäre Verschlussvorrichtungen

Folgende Überprüfungen sind für die primären Verschlussvorrichtungen durchzuführen.

TPRD

1. Druckzyklusprüfung (gemäß UN ECE R 134: Anhang 4 Absatz 1.1)
2. Beschleunigter Lebensdauertest (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 1.2)
3. Temperaturzyklusprüfung (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 1.3 und unter Berücksichtigung IEC 60068-2-14, Umgebungseinflüsse – Teil 2-14: Prüfverfahren – Prüfung N: Temperaturwechsel (IEC 60068-2-14:2009); Deutsche Fassung EN 60068-2-14:2009)
4. Prüfung der Salzkorrosionsbeständigkeit (EN 60068-2-11:2021, Umweltprüfungen – Teil 2: Prüfungen – Prüfung Ka: Salznebel, Beanspruchungsdauer 4 Wochen)
5. Prüfung auf Einflüsse der Fahrzeugumgebung auf Zersetzung (R 134 Anhang 4 Absatz 1.5)
6. Prüfung der Spannungsrisskorrosion (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 1.6)
7. Schwingungsprüfung (gemäß EN 61373:2010 + AC:2017-09, Bahnanwendungen – Betriebsmittel von Bahnfahrzeugen – Prüfungen für Schwingen und Schocken)

8. Dichtheitsprüfung (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 1.8)
9. Aktivierungsprüfung für TPRD (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 1.9)
10. Durchsatzprüfung (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 1.10)

Rückschlagventile und automatische Absperrventile

1. Prüfung der hydrostatischen Belastbarkeit (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 2.1)
2. Dichtheitsprüfung (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 2.2)
3. Druckzyklusprüfung bei extremen Temperaturen (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 2.3)
4. Prüfung der Salzwasserkorrosionsbeständigkeit: EN 60068-2-11:2021, Umweltprüfungen – Teil 2: Prüfungen – Prüfung Ka: Salznebel, Beanspruchungsdauer 4 Wochen)
5. Prüfung auf Einflüsse der Fahrzeugumgebung (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 2.5)
6. Prüfung auf Einflüsse der Umgebungsluft (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 2.6)
7. Elektrische Prüfungen (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 2.7 und unter Berücksichtigung der Vorgaben in 5.4.2)
8. Prüfung mit vorgekühltem Wasserstoff (gemäß UN ECE R 134 Anhang 4 Absatz 2.10).

Kennzeichnung

Folgende Mindestanforderungen müssen gekennzeichnet sein.

- **Behälter:**

Auf jedem Behälter ist ein Etikett mit mindestens den folgenden Angaben fest anzubringen: Name des Herstellers, Seriennummer, Herstellungsdatum, Höchstzulässiger Betankungsdruck (Maximum fuelling pressure, MFP), Nennbetriebsdruck (Nominal working pressure, NWP), Kraftstoffart (z. B. „CHG“ für gasförmigen Wasserstoff) und Datum der Außerbetriebnahme. Jeder Behälter ist außerdem mit der Anzahl der Zyklen zu kennzeichnen, die im Prüfprogramm gemäß 16.2.1 vorgesehen sind.

Jedes Etikett, das gemäß diesem Absatz am Behälter angebracht wird, ist so anzubringen, dass es für die Dauer der vom Hersteller empfohlenen Lebensdauer des Behälters an Ort und Stelle bleibt und lesbar ist. Der Zeitpunkt der Außerbetriebnahme darf nicht später als 15 Jahre nach dem Herstellungsdatum sein.

- **Primäre Verschlussvorrichtung:**

Mindestens die folgenden Informationen: MFP und Kraftstoffart (z. B. „CHG“ für gasförmigen Wasserstoff) sind auf jedem Bauteil, das als primäre Verschlussvorrichtung dient, deutlich lesbar und unauslöschlich anzugeben.

11.6.3 Prüfung des Druckwasserstoff-Speichersystems

Druckwasserstoff-Speichersystem: (Druckbehälter + primäre Absperreinrichtungen)

Das Wasserstoffspeichersystem besteht aus dem Hochdruck-Speicherbehälter und primären Absperrvorrichtungen für Öffnungen des Hochdruck-Speicherbehälters.

Die Absperrvorrichtungen müssen folgende Funktionen beinhalten, die kombiniert werden können:

- a) TPRD
- b) Rückschlagventil, das den Rückfluss zur Einfüllöffnung verhindert

- c) automatisches Absperrventil, das sich schließen kann, um den Fluss vom Behälter zur Brennstoffzelle zu verhindern.

Jedes Absperrventil und TPRD, das zum primären Verschluss des Durchflusses aus dem Vorratsbehälter dient, muss direkt an oder in jedem Behälter installiert werden.

Mindestens ein Bauteil mit Rückschlagventilfunktion muss direkt an oder in jedem Behälter installiert sein.

Alle Druckwasserstoff-Speichersysteme, die für den Schienenfahrzeugbetrieb hergestellt werden, müssen einen NWP von 70 MPa oder weniger und eine Lebensdauer von 15 Jahren oder weniger aufweisen und die nachfolgenden Anforderungen erfüllen.

Folgende Überprüfungen sind für das Druckwasserstoff-Speichersystem durchzuführen:

1. Überprüfungen der Vergleichskennzahlen (gemäß UN ECE R 134 Absatz 5.1 und Anhang 3 Absatz 2 ff.)
2. Überprüfung der Leistungsbeständigkeit (hydraulische Folgeprüfungen, gemäß UN ECE R 134 Absatz 5.2 und Anhang 3 Absatz 3 ff.)
3. Überprüfung der zu erwartenden Systemleistung (pneumatische Folgeprüfungen, gemäß UN ECE R 134 Absatz 5.3 und Anhang 3 Absatz 4 ff.)
4. Überprüfung der Leistung des Betriebsabbruchsystems im Brandfall (gemäß UN ECE R 134 Absatz 5.4 und Anhang 3 Absatz 5 ff.)
5. Überprüfung der Leistungsbeständigkeit von primären Verschlüssen (gemäß UN ECE R 134 Absatz 5.5)

11.6.4 Fahrzeugesamtsystem

Die Festigkeit der systembedingten Anbauteile der H₂-Gesamtanlage muss bei der Bewertung der Festigkeit des Fahrzeugesamtsystems entsprechend der Norm EN 12663 berücksichtigt werden:

Folgende Lastfälle sind hierfür anzunehmen:

- statische Lastfälle: EN 12663-1:2010+A1:2014 mit den Tabellen 13, 14 und 15
- dynamische Lastfälle: EN 12663-1:2010+A1:2014 mit den Tabellen 16, 17 und 18
- aerodynamische Lastfälle (Verweis auf die notifizierte nationale Anforderung: NNTR 02.1)

Das Verhalten im Crashfall der systembedingten Anbauteile der H₂-Gesamtanlage muss bei der Bewertung der Crash Szenarien gemäß EN 15227:2020 Crash Szenarien Kapitel 6.4 Tabelle 5 – und der hieraus resultierenden Beschleunigung berücksichtigt werden. Im Ergebnis müssen auch diese Ergebnisse bei der Positionierung der systembedingten Anbauteile der H₂-Gesamtanlage im/am Schienenfahrzeug berücksichtigt werden. Ferner ist die Anlage in/an das Schienenfahrzeug so einzubauen, dass es vor Beschädigung geschützt ist, wie etwa vor Beschädigung durch bewegliche Fahrzeugteile, Anprall von Gegenständen/Objekten, Be- und Entladen des Fahrzeugs oder Verschiebung von Lasten.

Zusätzlich verwendete Absperreinrichtung (PRD) müssen dem geplanten Druckeinsatzbereich entsprechen (entsprechende Qualifikationen nach ADR/RID).

Der Auslass der Entlüftungsleitung, falls vorhanden, für die Ableitung von Wasserstoffgas durch die TPRD des Speichersystems muss durch eine Abdeckung geschützt sein.

Der Wasserstoffgasausstoß aus den TPRD des Speichersystems darf nicht gerichtet sein (dies ist mittels projektspezifischer Gefährdungsanalyse zu betrachten und festzulegen):

1. auf freiliegende elektrische Anschlüsse, freiliegende elektrische Schaltelemente oder andere Zündquellen
2. auf oder in Richtung des Fahrgastraums oder des Gepäckraums des Schienenfahrzeugs
3. auf Druckwasserstoffbehälter

Andere Druckentlastungsvorrichtungen (wie z. B. Berstscheiben) können außerhalb des Wasserstoffspeichersystems verwendet werden. Die Wasserstoffgasabgabe aus anderen Druckentlastungsvorrichtungen darf, wie die TPRDs, nicht gerichtet sein:

1. auf freiliegende elektrische Anschlüsse, freiliegende elektrische Schaltelemente oder andere Zündquellen
2. auf oder in Richtung des Fahrgastraums oder des Gepäckraums des Fahrzeugs
3. auf Druckwasserstoffbehälter

Das Wasserstoffsystem hinter dem Druckregler (Richtung Brennstoffzelle) muss gegen Überdruck durch einen möglichen Ausfall des Druckreglers geschützt sein. Der Einstelldruck der Überdruck-Schutzvorrichtung muss niedriger oder gleich dem höchstzulässigen Betriebsdruck für den entsprechenden Abschnitt des Wasserstoffsystems sein.

Da die H₂-Gesamtanlage als dauerhaft technisch dicht ausgelegt ist, muss ein entsprechender Nachweis vorliegen. Nach TRGS 722 4.5.2 (4) gelten Anlagenteile als auf Dauer technisch dicht, wenn:

1. sie so ausgeführt sind, dass sie aufgrund ihrer Konstruktion technisch dicht bleiben
oder
2. ihre technische Dichtheit durch Wartung und Überwachung (Leckageüberwachung) ständig gewährleistet wird.

Die brandschutztechnischen Anforderungen die sich aus der EN 45545 für die H₂-Gesamtanlage ergeben, müssen entsprechend im Brandschutzkonzept des Gesamtfahrzeugs sowie einer Brandrisikoanalyse berücksichtigt und bewertet werden.

11.6.4.1 Betankungsschnittstelle

Für die Betankung des Fahrzeuges mit gasförmigen Wasserstoff ist ein zugelassenes, veröffentlichtes Betankungsprotokoll, wie z. B. SAE J2601 zu verwenden.

Die entsprechenden Parameter für das Betankungsprotokoll (u.a. Volumen, Druck, Temperatur) sind zwischen Fahrzeug und Tankstelle über eine Kommunikationsschnittstelle auszutauschen. Die Ausrüstung (Betankungsanschlüsse) sind den entsprechenden Normen zu entnehmen.

- SAE J2601 legt das Protokoll und die Prozessgrenzen für die Wasserstoffbetankung von Fahrzeugen mit einem Gesamtvolumen von 49,7 Litern oder mehr fest
- EN ISO 17268:2020, Betankungsanschlüsse für gasförmigen Wasserstoff zur Betankung von Landfahrzeugen (ISO 17268)
- EN 17127:2018, Wasserstofftankstellen im Außenbereich zur Abgabe gasförmigen Wasserstoffs und Betankungsprotokolle umfassend

Die Wasserstoffqualität muss zwischen Tankstellenbetreiber und Schienenfahrzeug-hersteller/Komponentenlieferanten festgelegt werden. Mögliche Vorgabe kann die ISO 14687:2019 sein.

11.6.4.2 Brennstoffzelle und Energiespeichersystem

Aktuell wird beim TC 9 der IEC eine Normenreihe IEC 63341 für die Bahnanwendung von Brennstoffzellenantriebe erarbeitet (wie unter 5 Normrecherche beschrieben). Im Teil 1 sollen die Anforderungen an die Brennstoffzelle formuliert werden. Da diese Normenreihe noch nicht veröffentlicht ist, kann auf diese nicht Bezug genommen werden.

Daher kann nur auf vorhandene Normen Bezug genommen werden und entsprechende Analogien getroffen werden. Das Brennstoffzellenmodul muss initial die Anforderungen der EN IEC 62282-2-100:2020 erfüllen und bei der Konstruktion/Auslegung des Brennstoffzellenmoduls und der gesamten Brennstoffzelle sind die nachfolgend aufgelisteten bahnspezifischen Anforderungen zu berücksichtigen:

- Umweltbedingungen für Betriebsmittel auf Bahnfahrzeugen - Teil 1: Betriebsmittel auf Bahnfahrzeugen (EN 50125-1:2014)
- Betriebsmittel von Bahnfahrzeugen – Prüfungen für Schwingen und Schocken (EN 61373:2010)
 - Kategorie 1: Am Fahrzeugkasten angebaut (Klasse A und B)
 - Kategorie 2 und 3: Am Drehgestell angebaut und/oder am Radsatz angebaut sind aufgrund der initialen Risiko- und Gefährdungsanalyse und den potentiellen Zündquellen durch diese Anbauorte (heiße Oberflächen) auszuschließen
- Schutzmaßnahmen in Bezug auf elektrische Gefahren (EN 50153:2014)
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Normreihe EN 50121 Teil 1 bis 5; insbesondere Teil 3-1 (2017/A1:2019) und Teil 3-2 (2016/A1:2019)
 - Störfestigkeit nach EN 50121-3-2:2016/A1:2019 muss berücksichtigt werden und im EMV-Plan umgesetzt sein
 - Einzelprüfungen je Gerät in Bezug auf die Störfestigkeit betrachtet werden
 - Prüfungen müssen reproduzierbar und festgelegt sein

Darüber hinaus ist ein Zellspannungs-Überwachungssystem oder eine andere sicherheitsbedingte Regelfunktion zu implementieren, die ein Signal zur Einleitung einer Prozedur abgibt und die das Brennstoffzellen-Modul in einen sicheren Zustand führt bevor ein gefährdender Zustand erreicht wird.

Warnhinweise sind anzubringen, die auf folgende Gefahren (Anwendbarkeit ist entsprechend zu prüfen) hinweisen:

- Gefährdung durch elektrischen Schlag
- Hohe Temperaturen
- Entzündbare Gase oder Flüssigkeiten
- Korrosive, toxische Medien

Der Auslass des Abgassystems und die Wasserableitung müssen außerhalb des Schienenfahrzeugs und von angrenzenden Oberflächen entsprechend isoliert sein, so dass das abfließende Wasser/Wasserdampf nicht an sensible Komponenten/Bereiche gelangen kann. Eine äußere Ableitung muss auch konstruktiv so ausgeführt sein, dass die Bildung von gefrierendem Kondensat vermieden wird bzw. sich dadurch keine zusätzliche Gefahrenquelle ergibt.

Am Abgasausstoß des Fahrzeugabgassystems muss das Wasserstoffkonzentrationsniveau wie folgt sein:

- Nicht mehr als vier Volumenprozent im Durchschnitt während jedes Drei-Sekunden-Zeitintervalls im Normalbetrieb einschließlich An- und Abschalten;
- und zu keinem Zeitpunkt mehr als acht Prozent (gemäß UN ECE R134 Anhang 5 Absatz 4 Prüfverfahren)

Für die Auslegung und Sicherheit des Energiespeichers (insbesondere Lithium-Ionen-Traktionsbatterien) sind für den Bahnsektor entsprechende Normen verfügbar, auf die entsprechend verwiesen wird:

- EN 62864-1 Bahnanwendungen – Schienenfahrzeuge – Stromversorgung durch Energiespeichersysteme auf Schienenfahrzeugen – Teil 1: Serienhybridsystem (IEC 62864-1:2016)
- EN IEC 62928 Bahnanwendungen – Betriebsmittel auf Bahnfahrzeugen – Lithium-Ionen-Traktionsbatterien

Ein Brandereignis innerhalb des Energiespeichers darf keine unmittelbare Auswirkung auf Anlagenteile des H₂-Gesamtsystems darstellen. Dieses Ereignis ist in der Brandrisikoanalyse zu betrachten und es empfiehlt sich eine bauliche (örtliche) Trennung der Anlagenteile (Energiespeicher und H₂-Gesamtsystem) bei der Auslegung zu berücksichtigen.

11.6.5 Zusätzliche Montageanforderungen

Alle Einrichtungsarbeiten dürfen nur von fachlich geeigneten Personen mit nachgewiesenen Kenntnissen durchgeführt werden, die sicherstellen, dass alle geltenden Bestimmungen eingehalten werden. Jede Anlage für brennbare Gase/Flüssigkeiten ist nach Einbau oder Änderung durch Fachkräfte bevor sie in Betrieb genommen werden, durch eine unabhängige Stelle zu prüfen.

11.6.6 Dokumentation

Die Bauartbeschreibung umfasst neben den einzelnen Komponenten auch die Gesamtanlage und ist durch den Fahrzeughersteller zu erbringen. Neben entsprechenden Beschreibungen zur Auslegung der Anlage, sind insbesondere Informationen für den Betrieb und die Wartung der H₂-Gesamtanlage zur Verfügung zu stellen.

11.7 Validierung/Prüfungen am Fahrzeug

Überwachungsbedürftige Anlagen müssen nach § 33 (1) der EBO „nach einer zugelassenen Bauart ausgeführt sein; sie müssen vor Inbetriebnahme sowie planmäßig wiederkehrend geprüft werden.“

11.7.1 Erstprüfungen

Ordnungsprüfung (Feststellung, dass die Dokumentation vollständig ist und die Übereinstimmung der Komponenten mit der Bauartbeschreibung)

Überprüfung der Funktionalität der H₂-Anlage einschließlich Dichtheitsprüfung mittels Leckage Suchgerät.

11.7.2 Wiederkehrende Prüfungen

Überwachungsbedürftige Anlagen müssen nach § 33 (1) der EBO planmäßig wiederkehrend geprüft werden.

Vorschlag für eine Prüffrist:

- 4 Jahre nach Erstprüfung (Inbetriebnahme) – keine Verlängerung möglich
- Danach alle 2 Jahre (kürzere Abstände können vereinbart werden)

Prüftätigkeiten (vergleichbar zu den Tätigkeiten bei der Hauptuntersuchung im KfZ-Bereich⁷):

- Visuelle Überprüfung der H₂-Anlage auf Auffälligkeiten (Beschädigungen, Korrosion u. ä.)
- Überprüfung der Zyklenanzahl durch Betankungsvorgänge
- Überprüfung der Funktionalität der H₂-Anlage einschließlich Dichtheitsprüfung mittels Leckage Suchgerät

11.8 Quellenverzeichnis

EBO, Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 5. April 2019 (BGBl. I S. 479) geändert worden ist

EN 12245, Europäische Norm vom CEN, Ortsbewegliche Gasflaschen – Vollumwickelte Flaschen aus Verbundwerkstoffen, 2022

EN 12257, Europäische Norm vom CEN, Ortsbewegliche Gasflaschen – Nahtlose umfangsgewickelte Flaschen aus Verbundwerkstoffen, 2002

EN 12663-1, Europäische Norm vom CEN, Bahnanwendungen – Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen – Teil 1: Lokomotiven und Personenzüge (und alternatives Verfahren für Güterwagen), 2010 mit Berichtigung von September 2014

EN 12862, Europäische Norm vom CEN, Ortsbewegliche Gasflaschen – Gestaltung und Konstruktion von wiederbefüllbaren ortsbeweglichen geschweißten Gasflaschen aus Aluminiumlegierung, 2000

EN 13322-2, Europäische Norm vom CEN, Ortsbewegliche Gasflaschen – Wiederbefüllbare geschweißte Flaschen aus Stahl; Gestaltung und Konstruktion – Teil 2: Flaschen aus nichtrostendem Stahl, 2006

EN 15227, Europäische Norm vom CEN, Bahnanwendungen – Anforderungen an die Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen, 2020

EN 17127, Europäische Norm vom CEN, Wasserstofftankstellen im Außenbereich zur Abgabe gasförmigen Wasserstoffs und Betankungsprotokolle umfassend, 2018

EN 1964-3, Europäische Norm vom CEN, Ortsbewegliche Gasflaschen – Gestaltung und Konstruktion von nahtlosen wiederbefüllbaren ortsbeweglichen Gasflaschen aus Stahl mit einem Fassungsraum von 0,5 Liter bis einschließlich 150 Liter – Teil 3: Nahtlose Flaschen aus nichtrostendem Stahl mit einem Rm-Wert von weniger als 1100 MPa, 2000

EN 45545, Europäische Norm vom CEN, Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Normenreihe mit Teil 1 bis Teil 7, 2013

EN 50121, Europäische Norm vom CENELEC, Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit – Normenreihe mit Teil 1 bis Teil 5, 2017

EN 50121-3-1, Europäische Norm vom CENELEC, Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit – Teil 3-1: Bahnfahrzeuge – Zug und gesamtes Fahrzeug, 2017 mit Berichtigung von 2019

⁷ Richtlinie für die Durchführung von Hauptuntersuchungen (HU) und die Beurteilung der dabei festgestellten Mängel an Fahrzeugen nach §29, Anlagen VIII und VIIIa StVZO

EN 50121-3-2, Europäische Norm vom CENELEC, Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit – Teil 3-2: Bahnfahrzeuge – Geräte, 2016 mit Berichtigung von 2019

EN 50125-1, Europäische Norm vom CENELEC, Bahnanwendungen – Umweltbedingungen für Betriebsmittel – Teil 1: Betriebsmittel auf Bahnfahrzeugen, 2014

EN 50153, Europäische Norm vom CENELEC, Bahnanwendungen – Fahrzeuge – Schutzmaßnahmen in Bezug auf elektrische Gefahren, 2014 mit den Berichtigungen von 2017 und 2020

EN 60068-2-11, Europäische Norm vom CENELEC, Umgebungseinflüsse – Teil 2-11: Prüfverfahren – Prüfung Ka: Salznebel, 2021

EN 60068-2-14, Europäische Norm vom CENELEC, Umgebungseinflüsse – Teil 2-14: Prüfverfahren – Prüfung N: Temperaturwechsel, 2009

EN 61373, Europäische Norm vom CENELEC, Bahnanwendungen – Betriebsmittel von Bahnfahrzeugen – Prüfungen für Schwingen und Schocken, 2010 mit Berichtigung von September 2017

EN IEC 62282-2-100, Europäische Norm vom CENELEC, Brennstoffzellentechnologien – Teil 2-100: Brennstoffzellenmodule – Sicherheit, 2020

EN 62864-1, Europäische Norm vom CENELEC, Bahnanwendungen – Schienenfahrzeuge – Stromversorgung durch Energiespeichersysteme auf Schienenfahrzeugen – Teil 1: Serienhybridsystem (IEC 62864-1:2016), 2016

EN 62928, Europäische Norm vom CENELEC, Bahnanwendungen – Betriebsmittel auf Bahnfahrzeugen – Lithium-Ionen-Traktionsbatterien auf Bahnfahrzeugen (IEC 62928:2017), 2017

EN ISO 11114-1, Europäische Norm vom CEN, Gasflaschen – Verträglichkeit von Werkstoffen für Gasflaschen und Ventile mit den in Berührung kommenden Gasen – Teil 1: Metallische Werkstoffe, 2020

EN ISO 11114-2, Europäische Norm vom CEN, Gasflaschen – Verträglichkeit von Werkstoffen für Gasflaschen und Ventile mit den in Berührung kommenden Gasen – Teil 2: Nichtmetallische Werkstoffe, 2021

EN ISO 11114-4, Europäische Norm vom CEN, Ortsbewegliche Gasflaschen – Verträglichkeit von Werkstoffen für Gasflaschen und Ventile mit den in Berührung kommenden Gasen – Teil 4: Prüfverfahren zur Auswahl von Stählen, die gegen Wasserstoffversprödung unempfindlich sind, 2017

EN ISO 11114-5, Europäische Norm vom CEN, Gasflaschen – Verträglichkeit von Werkstoffen für Gasflaschen und Ventile mit den in Berührung kommenden Gasen – Teil 5: Prüfverfahren zur Bewertung der Kunststoffinnenbehälter, 2022

EN ISO 17268, Europäische Norm vom CEN, Gasförmiger Wasserstoff – Anschlussvorrichtungen für die Betankung von Landfahrzeugen (ISO 17268:2020), 2020

EN ISO 7539-11, Europäische Norm vom CEN, Korrosion der Metalle und Legierungen – Prüfung der Spannungsrisskorrosion Teil 11: Leitfaden für die Prüfung der Resistenz von Metallen und Legierungen gegen Wasserstoffversprödung und wasserstoffverursachte Brüche, 2014

EN ISO 7866, Europäische Norm vom CEN, Gasflaschen – Wiederbefüllbare nahtlose Gasflaschen aus Aluminiumlegierungen – Auslegung, Bau und Prüfung, 2012

EN ISO 9809-1, Europäische Norm vom CEN, Gasflaschen – Auslegung, Herstellung und Prüfung von wiederbefüllbaren nahtlosen Gasflaschen aus Stahl – Teil 1: Flaschen aus vergütetem Stahl mit einer Zugfestigkeit kleiner als 1100 MPa, 2019

EN ISO 9809-2, Europäische Norm vom CEN, Gasflaschen – Auslegung, Herstellung und Prüfung von wiederbefüllbaren nahtlosen Gasflaschen aus Stahl – Teil 2: Flaschen aus vergütetem Stahl mit einer Zugfestigkeit größer als oder gleich 1100 MPa, 2019

EU 2019/ECE 134, (2019): Einheitliche Bestimmungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeugbauteilen hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Eigenschaften von mit Wasserstoff und Brennstoffzellen betriebenen Fahrzeugen (HFCV) [2019/795] [Online], [Zugriff am: 22.09.2021]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42019X0795&from=EN>

SAE J2601, SAE International, Surface Vehicle Standard, Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles, 2020

ISO 11119, ISO, Gasflaschen – Wiederbefüllbare Flaschen und Großflaschen aus Verbundwerkstoffen – Auslegung, Bau und Prüfungen – Normenreihe mit Teil 1 bis Teil 4, 2020

ISO 14687, ISO, Beschaffenheit von Wasserstoff als Kraftstoff – Spezifizierung des Produkts, 2019

Schmidt, Thomas (2020): Wasserstofftechnik Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft, 1. Auflage, Ort: Carl Hanser Verlag München

Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 722), Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Gemische, Ausgabe Februar 2021, GMBI 2021 S. 399-415 [Nr. 17-19] (vom 16.03.2021)

Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 727), Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen, Ausgabe Januar 2016, GMBI 2016 S. 256-314 [Nr. 12-17] (vom 26.04.2016), berichtigt: GMBI 2016 S. 623 [Nr. 31] (vom 29.07.2016)

Verordnungen (EU) 2021/535, EU Kommission (2021): Durchführungsverordnung (EU) 2021/535 der Kommission vom 31. März 2021 mit Durchführungsbestimmungen zur Verordnung (EU) 2019/2144 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich einheitlicher Verfahren und technischer Spezifikationen für die Typgenehmigung von Fahrzeugen sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge im Hinblick auf ihre allgemeinen Baumerkmale und ihre Sicherheit [Online], [Zugriff am: 22.09.2021]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R0535&from=EN>