

REPORT

03B10205A

Studie zu künftigen Mindestprüfumfängen von H2-Tankstellen zur Sicherstellung der Interoperabilität

Projektzeitraum:	01.10.2023 bis 31.05.2024
Förderkennzeichen:	03B10205A
Bezeichnung:	MPInter - M indest p rüf u m f änge I nteroperabilität
Datum des Berichts:	31.05.2024
Konsortium:	ZSW Ulm TesTneT Engineering GmbH TÜV Rheinland Industrie Service GmbH
Projektkoordination:	TÜV Rheinland Industrie Service GmbH
Seiten:	87
Anhänge:	4

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des BMDV.
unter dem Förderkennzeichen 03B10205A gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren

ZSW Ulm

Markus Jenne
Günther Schlumberger
Andrii Klymovskiy

TesTneT Engineering GmbH

Sebastian Sturm
Dr. Marius Herr
Dr. Stefan Behrning

TÜV Rheinland Industrie Service GmbH

Alexander Koch
Tim Naumann
Dieter Drews

Kontakte

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
(ZSW)

Helmholtzstraße 8
89081 Ulm

Markus Jenne
markus.jenne@zsw.de
+49 731 9530-821

Günther Schlumberger
guenther.schlumberger@zse.de
+49 731 9530-834

TesTnet Engineering GmbH

Eschenallee 11
85445 Oberding

Sebastian Sturm
s.sturm@h2-test.net
+49 8122 9984998

Dr. Marius Herr
m.herr@h2-test.net
+49 8122 9984998

TÜV Rheinland Industrie Service GmbH

Am Grauen Stein
Geschäftsfeld Deutschland I.03
51105 Köln

Alexander Koch
alexander.koch1@de.tuv.com
+49 331 5680 123

Dieter Drews
dieter.drews@de.tuv.com
+49 355 8660208

Inhaltsübersicht

1	Einleitung, Motivation und Vorgehensweise	5
1.1	Allgemein	5
1.2	Gesamtziel des Vorhabens	5
1.3	Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen	6
1.4	Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens	7
2	Stand und Entwicklungen im Bereich der H ₂ -Betankungstechnologien	9
2.1	Wasserstofftankstellen heute	9
2.2	Mindestabnahmen in Deutschland und EU, Stand 2024	12
2.2.1	Grundlage der Mindestabnahme der H ₂ -Tankstellen in D und EU	12
2.2.2	Geltende Vorschriften und Betankungsprotokolle.....	14
2.2.3	Ablauf für derzeitige Mindestabnahmeprüfung (und ggf. Werksprüfung) am Standort .	16
2.2.4	Gegenwärtig durchzuführender Testumfang	17
2.2.5	Zu erfassende Parameter, Datenauswertung und Berichtserstellung	21
2.2.6	Vorhandene Abnahmehardware	22
2.2.7	Derzeitige Herausforderungen bei Mindestabnahmetests	23
2.3	Analyse absehbarer neuer Protokolle und Technologien	24
2.4	Prozessvorschlag für Verantwortlichkeiten und Abläufe	27
2.4.1	Verantwortlichkeiten, Abläufe und Kompetenzen für Abnahmetests an HRS.....	27
2.4.2	Vorschlag für den Prozessablauf der SAT und FAT an HRS.....	36
3	Ermittlung der Prüferfordernisse von nicht-öffentlichen HRS.....	38
4	Ermittlung der Erfordernisse bei zyklischen Überprüfungen nach DIN EN 17127.....	44
4.1	Einführung	44
4.2	Auswertung von Ereignis-Statistik-Datenbanken	45
4.3	Analyse von Prüfberichten	47
4.4	Ermittlung des Prüfindervalls/-zyklus	52
4.4.1	Prüfindervalle verwendungszweckähnlicher Anlagen	53
4.4.2	Prüfindervalle von technischen Anlagen mit analogen Schutzzielen.....	54
4.4.3	Prüfindervall auf Basis einer Risikoanalyse mittels Fehlerbaumethode	58
4.5	Formulierung eines Prüfindervallvorschlags	61
5	Umfänge und Anforderungen an Mindestabnahmeprüfungen.....	65
5.1	Mindest-Prüfumfänge FAT/SAT	65
5.1.1	SAT Erstabnahme – Ermittlung Anpassungsbedarf	65
5.1.2	SAT Erstabnahme – baugleiche Abgabestellen am gleichen Standort.....	68

5.1.3	FAT Erstabnahme – Optionen und potenzielle Anpassungsbedarfe	69
5.1.4	SAT Wiederholprüfungen – Vorschlag Prüfumfang	70
5.2	Anforderungen an simulierte Abnahmetests	70
5.3	Ermittlung und Evaluierung benötigter Abnahmehardware	72
5.4	Handlungsempfehlungen.....	75
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	76
7	Literaturverzeichnis	81
8	Abbildungsverzeichnis	84
9	Tabellenverzeichnis	85
10	Abkürzungsverzeichnis	86
11	Anhang A - Gefährdungsbeurteilung nach TRGS 407 für eine nicht-öffentliche Wasserstofftankstelle	87
12	Anhang B - Quantitative Risikoanalyse für eine Wasserstofftankstelle	87
13	Anhang C - ergänzende Information zu Arbeitspaket 1	87
14	Anhang D – Detailanalyse der Einzeltests nach ISO 19880-1:2020.....	87

1 Einleitung, Motivation und Vorgehensweise

1.1 Allgemein

In der EU-Richtlinie „Alternative Fuel Infrastructure Directive - AFID“ und der am 13.04.2024 vollständig in Kraft getretenen Nachfolgeverordnung „Alternative Fuel Infrastructure Regulation - AFIR“, wird auf DIN EN 17127 als Stand der Technik für H₂-Betankungstechnologie verwiesen¹. Diese schreibt eine einmalige Abnahmeinspektion bzw. -prüfung für Wasserstofftankstellen bzw. H₂-Gasfüllanlagen (engl.: Hydrogen Refuelling Stations - HRS), auch für leichte und schwere Nutzfahrzeuge, im Straßenverkehrsbereich vor und fordert regelmäßige Überprüfungen „im Zusammenhang mit der Interoperabilität“² ohne diese exakter zu spezifizieren.

Die Technologie und Abnahme von Pkw-HRS für Tankkapazitäten bis 10 kg H₂ sind etabliert, auch durch das Engagement der Clean Energy Partnership (CEP) und die Abnahmetätigkeit des Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Die Prüfung der Testberichte und die Freigabe von HRS durch eine Arbeitsgruppe der CEP ist jedoch nicht dauerhaft zielführend.

Für Heavy-Duty-HRS mit HighFlow-Betankungstechnologie bis 120 g/s wurde durch die CEP ein harmonisiertes Protokoll bis 35 MPa veröffentlicht. Seit Februar 2024 sind mit der SAE J 2601-5 Protokolle für 35 und 70 MPa bis zu H₂-Tankgrößen von 180 und 200 kg verfügbar. Parallel dazu sind auch herstellerspezifische Protokolle im Einsatz. Im Projekt PRHYDE entwickelte Protokolle könnten ab 2024 Betankungssysteme bis 120 kg H₂-Kapazität und Befüllraten bis 300 g/s ermöglichen. Diese basieren jedoch auf einer sicherheitsgerichteten Kommunikation zwischen HRS und Fahrzeug, die bisher noch nicht normativ definiert ist. Daneben gibt es Bestrebungen, tiefkalte Betankungsoptionen (sLH₂ bzw. CCH₂) einzuführen.

Die vorliegende Studie MPInter gibt einen Überblick über künftige Bedarfe an sicherheitstechnischen Abnahme- und Inspektionstätigkeiten an Wasserstofftankstellen. Künftige mittel-/langfristige Investitionen in die dafür benötigte Hardware sollen so zielgerichtet ermöglicht werden. Zusätzlich wird eine Handlungsempfehlung an das zuständige Normungsgremium zu erforderlichen (auch Wiederhol-) Inspektionen gegeben. Das Vorhaben dient in besonderem Maße der Betriebs- und Anlagensicherheit von HRS. Dies ist Voraussetzung für Akzeptanz und für Vertrauen der Öffentlichkeit für ein Hochlaufen der Wasserstoffwirtschaft.

1.2 Gesamtziel des Vorhabens

Die deutsche und europäische Politik ist sich einig, dass Wasserstoff einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Pariser Klimaziele leisten wird. Die prognostizierte hohe Nachfrage nach grünem (oder blauem) Wasserstoff betrifft auch den Sektor „Mobilität“. EU-seitig wurden für den weiteren Ausbau der

¹ Vgl. Richtlinie (EU) 2014/94, 2014 u. Verordnung (EU) 2023/1804, 2023

² Nr. 7.1, DIN EN 17127:2019, 2019

Infrastruktur für alternative Kraftstoffe durch das Europäische Parlament und den Rat der Europäischen Union am 27. März 2023 verbindliche nationale Mindestziele in der AFIR festgelegt.

Die AFIR benennt konkrete Zahlen für E-Ladestationen sowie Wasserstoff- und LNG-Tankstellen für die EU-Mitglieder. Die Infrastruktur für Pkw, Nutzfahrzeuge und Schiffe mit alternativem Antrieb soll in der EU deutlich ausgebaut werden.

EU-Vorgaben für die Errichtung von Wasserstofftankstellen:

- Bis Ende 2030 soll alle 200 Kilometer entlang des transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V-Kernnetzes) eine Wasserstofftankstelle errichtet werden.³
- An städtischen Knotenpunkten und multimodalen Verkehrsknoten soll zudem eine Infrastruktur für die Betankung mit gasförmigem Wasserstoff aufgebaut werden.⁴

Zusätzlich werden im Anhang II der AFIR-Verordnung normative technische Spezifikationen für HRS vorgegeben. Diese Spezifikationen enthalten auch Sicherheitsaspekte für die in Frage kommenden Schutzgüter (Mensch und Umwelt).

Durch die Studie soll ein Überblick über den künftigen Bedarf an sicherheitstechnischen Abnahme- und Inspektionstätigkeiten erarbeitet und dargestellt werden, um so künftige mittel-/langfristige Investitionen in die dafür benötigte Hardware zielgerichtet zu ermöglichen. Zudem soll eine Handlungsempfehlung an das zuständige Normungsgremium (s.u.) bzgl. erforderlicher Inspektionen gegeben werden (Umfänge/Zeitpunkt/Ablauf/Kompetenzen/ Qualitätssicherung/ Fälligkeiten). Ziel ist hierbei der Gewinn von Akzeptanz und Vertrauen der Öffentlichkeit durch das Bewahren und Verbessern der Betriebs- und Anlagensicherheit von HRS – eine Voraussetzung für den weiteren Ausbau der Wasserstoffwirtschaft.

1.3 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Eines der grundlegenden Ziele aller klimapolitischen Forschungsprogramme ist die Reduktion von Treibhausgasemissionen. Die vorliegende Arbeit „MPI - Mindestprüfumfänge Interoperabilität“ lässt sich in die Fördermaßnahme „NIP - Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II“ und dort in den Förderbereich „Forschung, Entwicklung und Innovation - Schwerpunkt Nachhaltige Mobilität“ einordnen.

Der aktuelle Förderschwerpunkt befasst sich hier mit der Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen mit Wasserstoff. Durch die Erprobung von Wasserstoff-Tankstellen sind weitere begleitende Themen der Forschung und Entwicklung wie z. B. eine eichfähige Mengenmessung des Wasserstoffs an der Zapfsäule, die Festschreibung einer geeigneten Wasserstoffqualität oder die Verfügbarkeit der Tankstellen identifiziert worden. Diese Themen werden, neben der weiteren Kostensenkung, insbesondere durch die

³ Vgl. Artikel 6, Abs. 1, Verordnung (EU) 2023/1804, 2023

⁴ Vgl. Artikel 6, Abs. 1, Verordnung (EU) 2023/1804, 2023

Entwicklung geeigneter Komponenten (Verdichter, Speicher, etc.) sowie durch Standardisierung der Gesamtanlagen im Rahmen der Fortsetzung des NIP betrachtet.

Treibhausgasemissionen entstehen im Mobilitätssektor insbesondere bei der kohlenstoffbasierten Kraftstoffnutzung. Durch Substitution dieser Kraftstoffe z. B. durch nachhaltig produzierten Wasserstoff lassen sich diese Emissionen deutlich senken. Es gilt daher, den Aufbau der notwendigen Tankinfrastruktur mit dem Hochlauf der Fahrzeugzahlen zu synchronisieren. Der erforderliche Ausbau eines Tankstellennetzes in Deutschland muss mit Maßnahmen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit an der Schnittstelle zwischen ortfesten HRS und mobilen Fahrzeugen flankiert werden.

Die Maßnahmen und Aktivitäten im NIP bilden die Basis für die Umsetzung des nationalen Strategierahmens im Kontext der Umsetzung der EU-Richtlinie 2014/94/EU über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe.

Als größter H₂-Nutzer im Mobilitätsbereich wird mittelfristig der Heavy-Duty-Bereich prognostiziert. Unabdingbar dafür sind jedoch nach DIN EN 17127 zugelassene Wasserstofftankstellen mit HighFlow-Betankungstechnologie, also einem Durchfluss von mehr als 60 g/s, für deren Zulassung Abnahmetests erforderlich sind. Derzeitig entwickeln sich die Betankungsprotokolle und Technologien dieser Tankstellen jedoch rasant weiter. Die zu erstellende Studie wird einen essenziell notwendigen, belastbaren Überblick über zukünftige Bedarfe skizzieren.

Das Projekt unterstützt als vorwettbewerbliche, themenfeldübergreifende Maßnahme dabei, CO₂-Emissionen im Schwerlastverkehr zu reduzieren, die Treibhausgasneutralität zu erreichen sowie das Pariser Klimaabkommen umzusetzen und dient damit direkt den Zielen der Bundesregierung.

1.4 Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens

Im Vorhaben „MPInter - Mindestprüfumfänge Interoperabilität“ wird in Form einer Studie der Bedarf und das Erfordernis von wiederkehrenden Prüfungen an HRS untersucht sowie Vorgaben dafür entwickelt. Die folgenden zentralen Ziele sollen im Vorhaben erreicht werden:

1. Analyse der HRS-Betriebsrisiken, insbesondere in sensiblen Bereichen wie Wohngebieten
2. Analyse der HRS-Betriebsrisiken insbesondere in sensiblen Bereichen wie Wohngebieten inkl. Schlussfolgerungen für Inspektions- und Prüferfordernisse zur Senkung/Beherrschung von Restrisiken im Betrieb von HRS (SOLL-Zustand)
3. Aufzeigen des Prüfprozesses nach derzeitiger Rechtslage (IST-Zustand)
4. Ableitung und Begründung von Maßnahmen zum Abbau von Abweichungen zwischen SOLL und IST / Darstellung des (angepassten) Prüfablaufes/-prozesses
5. Darstellung und Kommunikation der Ergebnisse zur Sicherstellung des Wissenstransfers
6. Aufzeigen des Aktualisierungsbedarfs von einschlägigen bestehenden Normen (DIN EN 17127)

Durch die in diesem Dokument skizzierte Vorgehensweise soll ein Überblick über den künftigen Bedarf an Abnahme- und Inspektionstätigkeiten erarbeitet und dargestellt werden, um diese Erkenntnisse in die

oben genannte Norm einzuarbeiten. Künftige mittel- und langfristige Investitionen in die dafür benötigte Hardware sollen so zielgerichtet ermöglicht werden.

Das Projekt wird einen Überblick über künftige Abnahmetests und wiederkehrende Inspektionen von Heavy-Duty HRS in Deutschland ermöglichen. Es wird außerdem dazu beitragen, Inspektionsabläufe besser zu verstehen und möglichst reibungsfrei zu organisieren. Das dabei generierte Wissen wird direkt an die die CEP und an die im Aufbau der H₂-Infrastruktur involvierten HRS-Hersteller und -Betreiber weitergegeben. Publikationen in Fachzeitschriften (z. B. „Technische Sicherheit“) und einzelne Vorträge an Fachkonferenzen wie der hy-fcell sind vorgesehen.

Eine unmittelbare Kostensenkung ist nicht die Zielsetzung des Vorhabens. Es geht primär um die Schaffung und den dauerhaften Erhalt des Vertrauens aller Beteiligten in das sichere Funktionieren der Wasserstoff-Infrastruktur im Verkehrssektor und die Sicherstellung der dauerhaften und umfassenden Betriebssicherheit an und von Wasserstofftankstellen.

2 Stand und Entwicklungen im Bereich der H₂-Betankungstechnologien

2.1 Wasserstofftankstellen heute

Wasserstofftankstellen sind ein wesentlicher Bestandteil der Wasserstoffwirtschaft und -mobilität. Für eine erfolgreiche weltweite Einführung wasserstoffbetriebener Fahrzeuge müssen die Tankstellen sicher und benutzerfreundlich sein, eine breite Palette bestehender und potenzieller zukünftiger Fahrzeuge unterstützen und kosteneffizient arbeiten. Weltweit sind derzeit etwa 1.100 Wasserstofftankstellen (Hydrogen Refuelling Stations, HRS) in Betrieb, davon ca. 90 in Deutschland (vgl. Abbildung 19 und Abbildung 20 im Anhang C - ergänzende Information zu Arbeitspaket 1).

Derzeit arbeiten Wasserstofftankstellen mit komprimiertem gasförmigem Wasserstoff (CGH₂), der durch eine kontinuierliche Erhöhung des Drucks an der Abgabestelle (Zapfpistole) mit einer vorgegebenen (tabellenbasierten) oder variablen (MC-Formel) Druckrampenrate in das Tanksystem des Fahrzeugs übertragen wird. Der korrekte Betrieb der Zapfsäule als Abgabeeinrichtung ist ein wichtiger sicherheitsrelevanter Punkt und muss daher überprüft werden, bevor die Tankstelle für den öffentlichen Verkehr freigegeben werden kann.



Abbildung 1: H₂-Zapfsäule, zwischen herkömmlichen Zapfsäulen angeordnet, mit Abnahmegarät FSTM

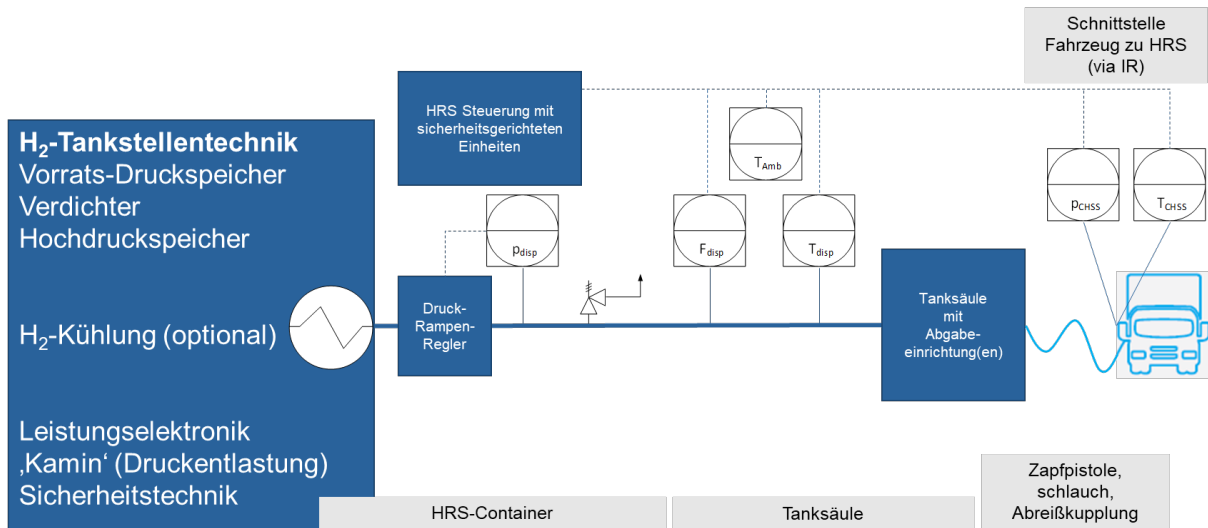


Abbildung 2: Grobschema H₂-Tankstelle, insbesondere Abgabeeinrichtung mit Messparametern

Zur Erläuterung der Parameter-Bezeichnungen des oben dargestellten Grobschemas vgl. 2.2.5.

Begriffsdefinitionen

Tabelle 1: Begriffsbestimmungen laut Normen

EN 17127:2020, Auszüge aus „3 Begriffe“ (angepasst an ISO 19880-1:2020, stark verändert zur DIN EN 17127:2019-09)	ISO 19880-1:2020, Auszüge aus „3 Terms and definitions“
Reihenfolge angepasst → Systemgrenzen von „außen nach innen“	
3.7 Wasserstofftankstelle Anlage zur Abgabe von verdichtetem Wasserstoff als Kraftstoff an Fahrzeuge, häufig als Wasserstofftankstelle (HRS) bezeichnet, bestehend aus der Wasserstoffzufuhr, der Verdichtung sowie Speichersystem und Abgabeeinrichtungen	3.29 hydrogen fuelling station, fuelling station facility for the dispensing of compressed hydrogen vehicle fuel, often referred to as a hydrogen refuelling station (HRS) or hydrogen filling station, including the supply of hydrogen, and hydrogen compression, storage, and dispensing systems (3.17)
3.6 Abgabeeinrichtung dem Wasserstoffversorgungssystem nachgeschaltetes System, das alle zur Durchführung des Vorgangs zur Betankung von Fahrzeugen erforderlichen Ausrüstungen umfasst und über das der komprimierte Wasserstoff dem Fahrzeug zugeführt wird	3.17 dispensing system system downstream of the hydrogen supply system comprising all equipment necessary to carry out the vehicle fuelling operation, through which the compressed hydrogen is supplied to the vehicle
3.2 Tanksäule Gerät in der Abgabeeinrichtung, einschließlich des/der Tanksäulenschrankes/ Tanksäulen-	3.13 dispenser equipment in the dispensing system (3.17), including the dispenser cabinet(s) (3.14) and

<p>EN 17127:2020, Auszüge aus „3 Begriffe“ (angepasst an ISO 19880-1:2020, stark verändert zur DIN EN 17127:2019-09)</p>	<p>ISO 19880-1:2020, Auszüge aus „3 Terms and definitions“</p>
<p>schränke und der Tragkonstruktion, die sich physisch im Betankungsbereich befinden.</p> <p><i>Anmerkung 1 zum Begriff: Die Wasserstoff-Tanksäule umfasst üblicherweise mindestens die Betankungsbaugruppe, die erforderliche Temperatur- und Druckeinrichtungen, Filter und die Benutzerschnittstelle zur Durchführung der Fahrzeugbetankung.</i></p> <p><i>Anmerkung 2 zum Begriff: Der Hersteller der Wasserstoff-Tanksäule kann auswählen, zusätzliche Geräte in die Tanksäule einzubauen, und auch die Möglichkeit, alle Geräte in das Betankungssystem einzubauen.</i></p>	<p>support structure, that is physically located in the fuelling area</p> <p><i>Note 1 to entry: The hydrogen dispenser typically includes, as a minimum, the fuelling assembly (3.26), required temperature and pressure instrumentation, filters, and the user interface to conduct vehicle fuelling.</i></p> <p><i>Note 2 to entry: The manufacturer of the hydrogen dispenser can elect to include additional equipment in the dispenser, including the possibility of all equipment in the dispensing system.</i></p>
<p>3.3 Tanksäulenschrank Schutzgehäuse, das die Prozessrohrleitungen umschließt und auch Mess-, Steuer- und Zusatzausrüstungen für die Ausgabereinrichtung umfassen kann</p>	<p>3.14 dispenser cabinet protective housing (3.40) that encloses process piping and can also enclose measurement, control and ancillary dispenser (3.13) equipment</p>
<p>! Keine Entsprechung in der EN 17127:2020</p> <p>gebräuchliche Übersetzung: „Zapfgarnitur“, alternativ „Abgabestelle“</p>	<p>3.26 fuelling assembly part of the dispenser (3.13) providing the interface between the hydrogen fuelling station (3.29) and the vehicle - an assembly consisting of a hose breakaway device (3.5), a hose(s), a nozzle (3.53) and connections between these components</p> <p><i>Note 1 to entry: The fuelling assembly can include, or not, a nozzle vent line (with hose breakaway device and hose) depending on the type of nozzle, and communications, if used.</i></p>

Daraus folgt: werden an einer Tanksäule, wie durchaus üblich, mehrere Abgabereinrichtungen (“zwei Zapfpistolen links und rechts an einer Zapfsäule”) angeboten muss zur eindeutigen Kennzeichnung ein zusätzlicher Begriff, wie z. B. “Zapfgarnitur” oder besser “Abgabestelle”, eingeführt werden. Beispiel: “An der Tanksäule X sind die Abgabestellen Y und Z installiert”.

2.2 Mindestabnahmen in Deutschland und EU, Stand 2024

2.2.1 Grundlage der Mindestabnahme der H₂-Tankstellen in D und EU

Die DIN EN 17127:2019 „Wasserstofftankstellen im Außenbereich zur Abgabe gasförmigen Wasserstoffs und Betankungsprotokolle umfassend; Deutsche Fassung EN 17127:2018“ fordert die „*Mindestabnahme der installierten Anlage (en: Site Acceptance Test (SAT))*“ als Betankungsbestätigungsprüfungen und definiert tabellarisch den Mindestumfang dieser Prüfungen, nachzulesen in der EN 17127:2020 unter Punkt 6.1 bzw. im aktuell gültigen deutschen Derivat DIN EN 17127:2019-09 unter Punkt 7.1. Die Norm legt „*die Mindestanforderungen fest, die zur Gewährleistung der Interoperabilität (einschließlich der Betankungsprotokolle) von öffentlichen Wasserstofftankstellen, die gasförmigen Wasserstoff an Straßenfahrzeuge (z. B. Brennstoffzellenfahrzeuge) abgeben*“⁵ notwendig sind. Ebenso werden regelmäßige Inspektionen gefordert, ohne jedoch konkret auf Intervalle oder Umfänge einzugehen.

In der EU-Richtlinie „Alternative Fuel Infrastructure Directive“ (AFID, 2014/94/EU), die bis 2019 von den Mitgliedsstaaten der EU in nationales Recht umgesetzt hätte werden sollen (was nicht flächendeckend geschehen ist), wurde bereits auf die Norm EN 17127 verwiesen. Spätestens mit der am 13. April 2024 in Kraft getretenen „Alternative Fuel Infrastructure Regulation“ (AFIR, 2023/1804/EU), die ohne weitere Bestätigung innerhalb der EU gilt, wurde der darin etablierte Verweis auf die EN 17127 für die Ersteller von H₂-Tankstellen innerhalb der Europäischen Union verpflichtend.

Technologie und Abnahme von HRS für Tankkapazitäten bis 10 kg H₂ sind mittlerweile etabliert, auch durch das Engagement der CEP und die Abnahmetätigkeit des Projektpartners ZSW. Die Prüfung der Testberichte und die Freigabe von HRS durch Feststellung der Konformität mit der EN 17127 geht seit Mitte 2023 von einer Arbeitsgruppe der CEP an bereitwillige ZÜS, auch den Partner TÜV Rheinland, über. Im Nutzfahrzeugbereich mit H₂-Tankssystemen mit einer Kapazität von 20 bis 42,5 kg und Betankungsmassenströmen bis 120 g/s wurde durch die CEP ein harmonisiertes Protokoll bis 35 MPa veröffentlicht und an bisher 24 HRS in Deutschland (Zahl steigend) integriert. Es sind parallel einige wenige herstellerspezifische Protokolle bis 35 MPa, vor allem an nicht-öffentlichen Standorten, im Einsatz.

Die EN 17127 basiert - laut eigener Aussage - auf der wesentlich umfangreicheren ISO 19880-1 (vgl. Auszüge unten). Während die ISO 19880-1:2020 173 Seiten umfasst, ist die EN 17127 auf 19 Seiten beschränkt. Die Definition der „Mindestabnahmeprüfung am Standort“ (SAT) in Tabelle 1 der EN17127 entspricht der Tabelle 2 unter 12.5.4.2 der ISO 19880-1:2020 mit kleineren Abweichungen (vgl. 5.1.1). Für eine einheitliche Definition der Werksabnahme-Tests (Factory Acceptance Tests, FAT) wurde auf die im Annex C der ISO 19880-1 aufgeführten insgesamt 37 Testdefinitionen zurückgegriffen. Diese decken die Forderung der EN 17127 nach FAT in 7.1 b) ab „ohne dass sie bei der Installation am Aufstellort wiederholt werden müssen“.

⁵ Vgl. Nr. 7.1f., DIN EN 17127:2019, 2019

Auszüge aus der DIN EN 17127:2019⁶: „Wasserstofftankstellen im Außenbereich zur Abgabe gasförmigen Wasserstoffs und Betankungsprotokolle“

„Nationales Vorwort...“ „... Grundlage der Erarbeitung ist die Internationale Norm ISO 19880-1 für Wasserstofftankstellen, allerdings berücksichtigt das vorliegende Dokument die rechtlichen europäischen Gegebenheiten...“

„Anwendungsbereich...“ --> keine Begrenzung der Fahrzeugtankgröße in EN 17127 (Begrenzung im übergeordneten ADR (Abschnitt 1.1.3.2) Energieinhalt 54.000 MJ, umgerechnet 435,5 kg H₂)

“... Dieses Dokument legt die Mindestanforderungen fest, die zur Gewährleistung der Interoperabilität (einschließlich der Betankungsprotokolle) von öffentlichen Wasserstofftankstellen, die gasförmigen Wasserstoff an Straßenfahrzeuge (z. B. Brennstoffzellenfahrzeuge) abgeben, erfüllt werden müssen.

Die die gesamte Wasserstofftankstelle (en: hydrogen refuelling station (HRS)) betreffenden Sicherheits- und Leistungsanforderungen, die durch europäische und nationale Rechtsvorschriften geregelt werden, sind nicht Gegenstand dieses Dokuments. ...“

Zur detaillierten Definition der Anforderungen können und müssen weitere Dokumente herangezogen werden. Zudem ist darauf hinzuweisen, dass die seit dem 13.04.2024 gültige AFIR in ihren Verweisen auf die EN 17127:2020 Bezug nimmt, die in ihrem Anwendungsbereich die gleichen Ziele verfolgt, jedoch nicht mehr zwischen öffentlichen und nicht-öffentlichen Wasserstofftankstellen unterscheidet.

Auszüge aus der ISO 19880-1:2020⁷: *Gaseous H₂ – Fuel. Stations – Part 1: General Requirements*

“Scope: ...While this document is targeted for the fuelling of light duty hydrogen road vehicles, requirements and guidance for fuelling medium and heavy duty road vehicles (e.g. buses, trucks) are also covered. ...”

Somit hat sich ein Verfahren etabliert, insbesondere zwischen den beteiligten Parteien (Fahrzeugherstellern, HRS-Herstellern und prüfenden Stellen), das:

- die vorgeschriebenen vor-Ort-Abnahmetests (SAT) basierend auf der Tabelle 1 der (DIN) EN 17127 sowie
- die Werksabnahme (FAT) nach Annex C, Table C.2, der ISO 19880-1

definiert. Sollten einzelne oder alle FAT-Prüfungen nicht im Werk durchgeführt werden, sind sie vor Ort im Rahmen der SAT-Tests durchzuführen. Die FAT müssen in einem Typgenehmigungsverfahren nur 1x pro Tankstellentyp durchgeführt und dokumentiert werden.

Die Umsetzung der Vorgaben in detaillierte Testanweisungen wurde seit 2018 von der CEP-OEM-Gruppe, den HRS-Herstellern und dem Projektpartner ZSW erarbeitet (vgl. 2.2.4).

⁶ Vgl. DIN EN 17127:2019, 2019

⁷ Vgl. ISO 19880-1, 2020

2.2.2 Geltende Vorschriften und Betankungsprotokolle

Die folgende Abbildung 3, entnommen aus einem Online-Workshop der CEP, gibt einen Überblick über aktuelle und in naher Zukunft kommende Normdokumente, die die Betankung von H₂-Fahrzeugen und die Schnittstellen tangieren:

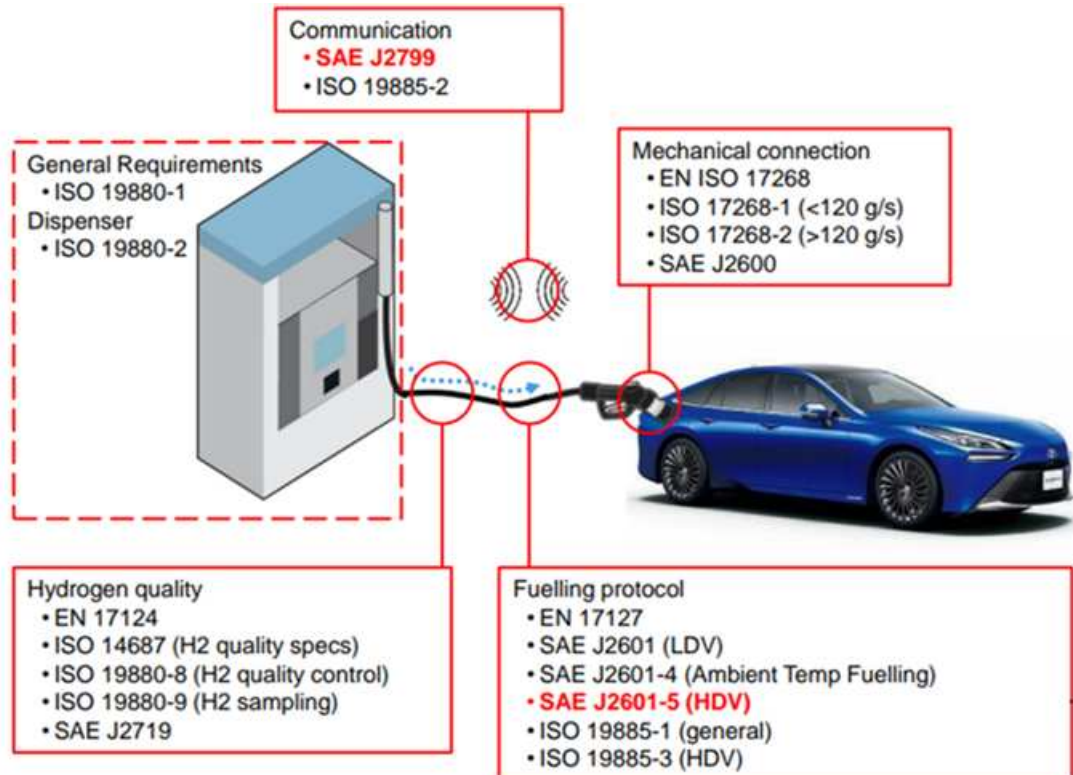


Abbildung 3: Übersicht geltender und kommender Normen rund um Wasserstoffbetankungsstationen⁸

Darüber hinaus sind weitere nationale und internationale Dokumente für den Betrieb von H₂-Tankstellen in Deutschland relevant. Die folgende Aufzählung ist ohne Anspruch auf Vollständigkeit, da z. B. baurechtliche Vorgaben teilweise Ländersache sind.

BetrSichV: Füllstelle als erlaubnispflichtige Anlage nach §18 der (letzte Änderung 2021). Bei Lagermengen >3 t oder vor Ort-Erzeugung von H₂ auch 4. BImSchV, 12. BImSchV

TRBS 3151: Detaillierung der BetrSichV, H₂-Tankstellenauslegung, Bau, Sicherheitsaspekte und Sicherheitsabstände (auch: mobile H₂-Tankstellen)

VdTÜV 514: Merkblatt Anforderungen an Wasserstofftankstellen (Ausgabe: 2009)

DVGW G 655: Leitfaden H₂-**Readiness** Gasanwendung (Ausgabe 2021), Kapitel 12: H₂Tankstellen

VdTÜV 9651-3: Anfahrerschutz oberirdischer Lagerbehälter an Tankstellen [...] mit Druckgasen ...

DIN EN 17124: Wasserstoffqualität als Kraftstoff für Straßenfahrzeuge

⁸ Vgl. Mattelaer, 2023

ISO 17268: Definition verwechslungssicherer Medienschnittstellen zwischen H₂-Tankstelle und H₂-Fahrzeug für unterschiedliche Druckstufen und Durchflusskategorien. 2024 veröffentlicht: ISO 17268-1 bis und mit 120 g/s. Die ISO 17268-2, über 120 g/s, ist in Arbeit.

SAE J2600: Medienschnittstellen, erste Version 2002, aktuell 2015, inzwischen harmonisiert mit der ISO 17268.

MessEG/MessEV: Mess- und Eichrecht; Verweise auf die (gültige) internationale OIML R 139 von 2018

Wie in 2.2.1 beschrieben, muss die Norm (DIN) EN 17127 in Europa und somit auch in Deutschland erfüllt werden. Weitere Dokumente wie die ISO 19880-1 sind ebenfalls heranzuziehen.

Eine Übersicht über aktuelle Betankungsprotokolle, also der konkreten Betankungsvorschriften, für die die EN 17127 und die ISO 19880-1 die Leitplanken setzen, zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 2: Übersicht heute anwendbarer Betankungsprotokolle

Nenn- druck MPa	Protokoll- Dokument	Temp.- Stufen	Durch- fluss [max g/s]	Tanksysteme [Bereich kg]	Interope- rabilität weltweit?	Bemerk- ungen
70	SAE J2601-1 ⁹	T20, T30, T40	60	2 ... 10	ja	etabliert
70	SAE J2601-1 ⁹	T20, T30, T40	60	>10 (CatD)	ja	Kapazität d. HSTA je nach Standort
35	SAE J2601-1 ⁹	T20, T30, T40	60	1,19 ... 5.97	ja	etabliert
35	H35 Tamb ¹⁰	Ambient	60	Dank T _{fuel} Definition (T _{fuel} = T _{amb} +/- 5K) derzeit nicht anwendbar.		
35	SAE J2601-2 ¹¹	-	120	>10 kg		
35	SAE J2601-3 ¹²		10	„18L“ 0,4 kg	Nein	Flurförder- fahrzeuge
35	CEP-Wenger-MAP H35 ¹³	A-F-MAP	120	20..42.5	Ja	Etabliert (vgl.
35	Maximator ¹⁴	Amb, weitere	[wenig Information vorliegend. Hauptsächlich in CH, also außerhalb der EU angewandt.]			
35	SAE J2601-5 H35 ¹⁵	Ta, T0, T10, T20, T30, T40	120	5,97 ... 180	ja	offen
70	SAE J2601-5 H70 Tab ¹¹	T20D, T30D, T40D	90	10 ... 201	ja	offen

⁹ Vgl. SAE J2601-1 (2020), 2020

¹⁰ Vgl. Clean Energy Partnership (CEP), 2022

¹¹ Vgl. SAE J2601-2 (2014), 2014

¹² Vgl. SAE J2601-3 (2022), 2022

¹³ Vgl. Greisel & Gebhard, 2022

¹⁴ Vgl. Maximator

¹⁵ Vgl. Clean Energy Partnership (CEP), 2024

70	SAE J2601-5 H70 MCF ¹¹	T0, T10, T20, T30, T40	300	10 ... 201	ja	offen
----	--------------------------------------	------------------------------	-----	------------	----	-------

Verwendete Abkürzungen in dieser Tabelle:

SAE = Society of Automotive Engineers, amerikanisches Standardisierungsinstitut

MAP = Minimum Ambient Precooling (MAP) Hydrogen Refueling Protocol

TAB = Tabellenbasiertes Betankungsprotokoll

MCF = MC Formula, formelbasiertes Betankungsprotokoll

2.2.3 Ablauf für derzeitige Mindestabnahmeprüfung (und ggf. Werksprüfung) am Standort

Voraussetzung für die hier beschriebenen Konformitätstests ist, dass die HRS die nach Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), §15, vorgeschriebene Prüfung vor Inbetriebnahme hinsichtlich Drucks, Explosionsschutz und elektrischer Sicherheit durch eine Zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS) erfolgreich bestanden hat und ordnungsgemäß in Betrieb ist.

Historisch wurden H₂-Tankstellen seit den 2000er Jahren durch die Fahrzeughersteller (OEMs) mit je eigenen Fahrzeugen auf die jeweiligen Anforderungen geprüft und jede einzelne HRS von jedem OEM für dessen Fahrzeuge frei gegeben. Bis 2012 wurden die Tests zentral durch ein OEM (GM) mit deren Abnahmegerät durchgeführt und die Berichte in der CEP-OEM-Arbeitsgruppe hinsichtlich Konformität mit den Betankungsprotokollen der SAE TIR 2601:2010 bewertet. Ab 2013 wurden, nach dem Ausstieg von GM/Opel, die Prüfungen von den HRS-Herstellern mit deren eigenem Equipment durchgeführt.

Zusätzlich zu den Herstellern führt das ZSW seit 2018 als unabhängige Drittpartei seit 2018 mit dem Fueling Station Test Module (FSTM, siehe Abbildung 7), einem Tandem-Anhänger mit integriertem Tanksystem bis 70 MPa / 6,7 kg H₂-Kapazität, Abnahmetests in Deutschland und Mitteleuropa durch.

Grundsätzlich sind heute die folgenden Funktionen und Stellen an Mindestabnahmetests beteiligt:

Beteiligte Funktionen



Abbildung 4: aktuell beteiligte Funktionen an HRS Abnahmen

Beteiligte Stellen (Beispiele, Stand 2024)



Abbildung 5: Beispiele für aktuell beteiligte Stellen an HRS Abnahmen

Seit 2018 hat sich folgender Ablauf etabliert: Der unabhängige Dienstleister wird entweder vom Hersteller, vom Betreiber der H₂-Tankstelle oder zunehmend von einer ZÜS beauftragt, die Betankungsprotokolle zu prüfen.



Abbildung 6: Grundsätzlicher Ablauf und Schritte einer Abnahmeprüfung

2.2.4 Gegenwärtig durchzuführender Testumfang

Wie oben im Abschnitt 2.2.1 aufgeführt, ist die Grundlage an die Mindestanforderungen nach europäischem (und deutschem) Recht in der (DIN) EN 17127 dargestellt. Die Vor-Ort-Prüfungen zur Bestätigung der Interoperabilität der Stationen stellen eine Auswahl der in der ISO 19880-1 definierten ausführlichen Testanforderungen (ISO 19880-1:2020, Annex C, Table C.2) dar.

Grundsätzlich wird getestet:

- Zieldruck und Druckanstiegsgeschwindigkeit gemäß den implementierten Protokollen (nur wenige ausgewählte Punkte bei tabellenbasierten Protokollen)
- Kühlsystemleistung für verschiedene Tanksystemgrößen
- Reaktion auf die Verletzung von Grenzwerten von Prozessparametern (Temperatur, Druck, SOC, usw.)
- Reaktion auf regelmäßige und unregelmäßige Kommunikationssignale

Tabelle 3: DIN EN 17127, Mindestprüfungen zur Gewährleistung der Interoperabilität

Name der Prüfung	Vorbereitungen	Beschreibung der Prüfung	Akzeptable Prüfung
Umgebungstemperatur, Betankungsdruck und Temperatursensor, Kalibrierungsgenauigkeitstabelle	-	Überprüfung des Umgebungs- und Betankungstemperatursensors und der Messwerte des Betankungsdrucks, Überprüfung der Kalibrierung	Sensoren zeigen einen dem Betriebszustand der Tankstelle entsprechenden Wert; die Kalibrierung wird mit OK bestätigt
Fehler: CHSS Ausgangsdruck	CHSS mit einem Ausgangsdruck, der höher ist als der zulässige NWP des tankbereiten (versuchsweise betankten) Fahrzeugs (d. h. 35 MPa oder 70 MPa) oder geringer als 0,5 MPa	Der CHSS wird mit der Zapfsäule verbunden und der Füllvorgang gestartet. Die Zapfsäule muss den vollgetankten CHSS erkennen und darf den Füllvorgang nicht starten	Der Füllvorgang darf nicht gestartet werden
Kommunikationsstörung	Es wird Kommunikation und anschließend eine Störung des Kommunikationssignals simuliert, z. B. durch Manipulation der Signalschleife	Es wird bestätigt, dass die Betankung auf nichtkommunikationsgestützte Betankung umschaltet	Tankstelle schaltet auf nichtkommunikationsgestützte Betankung um oder stoppt den Tankvorgang
Fehler: Kommunikations-Abbruchsignal	Es wird ein Kommunikations-Abbruchsignal simuliert, z. B. durch Manipulation der Signalschleife	Muss überwacht werden, selbst bei einem Füllvorgang ohne Kommunikation (sofern zutreffend)	Abbruch des Füllvorgangs innerhalb von 5 s nach Überschreitung der Grenzwerte.
Bestätigung der Betankung ohne Kommunikation für beide Druckpegel (H70 und ggf. H35)	Zwei verschiedene Startbedingungen	Zwei Prüfungen	Betankung unter einem anzunehmenden (88 % bis 95 %) SOC/Druck +/- 2 MPa durchgeführt, kein Abbruch - anhand von Tankstellen- oder Fahrzeugdaten zu prüfen
Bestätigung der Betankung mit Kommunikation	Zwei verschiedene Startbedingungen, eine davon bei einem Ausgangsdruck von weniger als 2 Mpa	Zwei Prüfungen	Betankung unter einem anzunehmenden SOC/Druck (95 % bis 100 %) durchgeführt, kein Abbruch - anhand von Tankstellen- oder Fahrzeugdaten zu prüfen

In Absprachen zwischen der OEM-Gruppe der CEP und den HRS-Herstellern wurden daraus die folgenden detaillierten Testvorschriften abgeleitet, die derzeit Verwendung finden.

Tabelle 4: derzeitige SAT-Prüfliste basierend auf DIN EN 17127, detailliert CEP / ZSW

Test-Nr. nach ISO	35/70M Pa SAT Testbeschreibung	IR	Tankgröße	p _{start}	Hinweise
3	Sensor-Plausibilitätstest. Vergleich mit den Werten der Abnahmehardware. SAT: Prüfung, ob die Werte der Sensoren plausibel sind. Wenn SAT & FAT: Zusätzlich Überprüfung der Kalibrierungszertifikate	n.d.	n.d.	n.d.	Kann während einem der ersten Tests durchgeführt werden. Für relevante Werte während des Tests; nachdem die HRS-Daten bereitgestellt wurden. Plausibilitätstest der Sensoren für T _{amb} ^{HRS} , p _{Disp} , T _{Disp} , F _{Disp} .
8	Druckstoß bei zu hohem Anfangsdruck im Fahrzeugtank (p _{CHSS} ^{Initial} > 100 % Nenndruck /NWP)	AUS (AN)	n.d.	> 100 % NWP (35/70 MPa)	<u>Druckstoss muss erfolgen</u> , danach Stopp der Betankung. Wenn Noncomm: Der Hersteller sollte bestätigen, dass die Funktion auch für COM programmiert ist (und dass sie nicht aufgrund von IR stoppt).
16	Unterbrechung der Kommunikation --> Stopp bei P _{target} ^{Noncomm} Kann mit ISO 36a (No5) kombiniert werden.	AN/ AUS	n.d.; kombiniert mit #36a: 60-70 % CHSS-Kapazität	8-15 % NWP	Ordnungsgemäße Umstellung auf Non-COMM-Betankung
18	Abort Signal --> Die Betankung stoppt innerhalb von 5 s	AN	n.d.	8-15 % NWP	ordnungsgemäßen Abbruch der Betankung überprüfen
36a	Noncomm Betankung --> Stopp bei P _{target} ^{Noncomm}	AUS	60-70 % CHSS-Kapazität	8-15 % NWP	Mit Test ISO#16 oben kombinieren
36b	Druckstoß bei hohem Anfangsdruck p _{CHSS} ^{Initial} , Noncomm--> Stopp bei P _{Target} ^{Noncomm}	AUS	60-70 % CHSS-Kapazität	60-68 % NWP	<u>Druckstoss muss erfolgen</u> , dann Start der Betankung. Aus EN (D): 88-95 % SOC
37a	Kühlleistung, alle Tanks und hohe Befüllgeschwindigkeit (APPR z. B. > 24,9 MPa/min für H70-T40)	ON	60-70 % CHSS-Kapazität	< 2 MPa	Leerlaufsituation erforderlich (keine vorgekühlten Leitungen)! Kann eventuell mit ISO#32 (Topoff) kombiniert werden. Aus EN (D): 95-100 % SOC [In der EN keine Erwähnung Kühlleistung oder Leerlaufsituation - nur Zielkorridor SOC]

Test-Nr. nach ISO	35/70M Pa SAT Testbeschreibung	IR	Tankgröße	p _{start}	Hinweise
37b	Kühlleistung, kleine Tanks und niedrige Befüllgeschwindigkeit (APRR z. B. < 15 MPa/min für H70-T40)	ON	20-40 % CHSS-Kapazität	60-68 % NWP	Leerlaufsituation erforderlich (keine vorgekühlten Leitungen) [In der EN keine Erwähnung Kühlleistung oder Leerlaufsituation - nur Zielkorridor SOC]

Nach dieser Testvorschrift, die an einigen Stellen eine Beeinflussung der Parameter an der Steuerung und Sensorik der H₂-Tankstelle erforderlich macht (z. B. Offset zur Umgebungstemperatur, um eine hohe oder niedrige Druckrampe zu erzielen), wird gegenwärtig die nach DIN EN 17127 geforderte Mindestabnahme durchgeführt.

Für die Tests von PKW-Tankstellen „H70 LF“ (bis 70 MPa / bis 60 g/s / bis 10 kg H₂-Tanksysteme) ist dieser Prozess durchgehend etabliert. Jedoch werden heutige öffentliche H₂-Nutzfahrzeugtankstellen „H35HF“ (bis 70 MPa / bis 120 g/s / 20 bis 42,5 kg H₂-Tanksysteme) mit gegenwärtig verfügbarer Abnahmehardware, auch des Projektpartners ZSW, geprüft. Da das Tanksystem aus dem Pkw-Bereich einer Kapazität von 6,7 kg H₂ bei 70 MPa bzw. von 4 kg H₂ bei 35 MPa entspricht, sind Funktionstests zwar möglich, jedoch unterhalb der im CEP-HD-Protokoll spezifizierten Tanksystemkapazität von mindestens 20 kg H₂. Der suboptimale Prozess wird derzeit durch einige wenige Tests mit größeren Fahrzeugtanks ergänzt, um die Leistungsfähigkeit der Tankstelle im realen Betrieb festzustellen. Wenn auf Fahrzeuge zurückgegriffen werden muss, sind Betankungen mit einem Startdruck von < 2 MPa, wie in der EN 17127 gefordert, real kaum darstellbar. Ein derart leerer Fahrzeugtank wird von manchen H₂-Nutzfahrzeugen steuerungstechnisch erst gar nicht zugelassen.

→ Somit ist das derzeitige Vorgehen für „H35HF“-HRS definitiv eine Übergangslösung, da die Konformität der Dispenser mit der DIN EN 17127 aus oben beschriebenen Gründen nicht durchgängig konform festgestellt werden kann.

Ein ähnliches Vorgehen – Funktionstests mit einem ‚kleinen‘ Tanksystem plus ergänzende Betankungstests mit HD-Fahrzeugen – wäre für eine Übergangszeit auch für 70 MPa Nutzfahrzeugtankstellen („H70HF“ / >=60 g/s / >10 kg H₂-Tanksysteme) denkbar. Stand März 2024 ist in Deutschland noch keine öffentliche HRS für Nutzfahrzeuge mit einem Tanksystem über 10 kg Kapazität bei 70 MPa Abgabedruck in Betrieb, jedoch werden laut Ankündigungen zeitnah einige entstehen. Die Werksabnahmen (FAT) können pro Tankstellentyp im Werk durchgeführt und dokumentiert werden. Alternativ können die Tests auch nach der Installation vor Ort durchgeführt werden. Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, basieren auch die Tests auf dem Annex C der ISO 19880-1, Table C.2 und wurden für die praktische Umsetzung von den beteiligten Parteien detailliert. Ein Tabellenausschnitt dieser derzeit gültigen Testvorschrift befindet sich (in englischer Sprache) im Anhang C - ergänzende Information zu Arbeitspaket 1.

Die vollständige Durchführung der Tests (FAT + SAT) gemäß ISO 19880-1 (2020), Annex C für eine Zapfsäule dauert in der Regel etwa 14 Stunden vor Ort. Die meiste Zeit beansprucht das Entleeren der H₂-Tanks des verwendeten Abnahmegegers nach dem Befüllen als Vorbereitung für den nächsten Betankungstest. Bei zu hohem Entleerungsmassenstrom wird, abhängig von der Umgebungstemperatur, schnell die zulässige untere Temperaturgrenze der Behälter (beim ZSW-FSTM -40 °C) erreicht. Sind mehrere baugleiche Dispenser an einem Standort zu prüfen oder wurden die FAT-Werksabnahmen bereits durchgeführt, verringert sich die Vor-Ort-Zeit pro Dispenser erheblich.

2.2.5 Zu erfassende Parameter, Datenauswertung und Berichtserstellung

Unabhängig davon, welche Stelle die Auswertung vornimmt (vgl. Abbildung 6), gelten einheitliche Anforderungen an Datensatz, Auswertung und Darstellung in einem MS-Word-Vorlagenformat¹⁶.

Die relevanten Daten werden in der HRS-Steuerung erfasst und in einem verarbeitbaren Format (ASCII, .csv, MS Excel) an die auswertende Stelle übergeben.

Definitiv mit einem Zeitstempel t_{rel} [s] zu erfassende Parameter sind:

p_{Disp} [bar]	Kraftstoffdruck der Abgabereinrichtung (gemessen bis 1 m vor Abreisskupplung)
T_{Disp} [°C]	Kraftstofftemperatur der Abgabereinrichtung (gemessen bis 1m vor Abreisskupplung)
F_{Disp} [g/s]	Kraftstoffdurchfluss, gemessen in der Abgabereinrichtung (dem Dispenser)
p_{CHSS} [bar]	Kraftstoffdruck des Wasserstoffspeichers im Fahrzeug (im Fahrzeugtank)
T_{CHSS} [°C]	Kraftstofftemperatur des Wasserstoffspeichers im Fahrzeug (im Fahrzeugtank)
p_{border}^{Low}	Disp [bar], p_{border}^{Up} Disp [bar]: von der HRS errechnete obere und untere Druckrampengrenzen gemäß gewähltem Befüllprotokoll

Weitere, pro Betankung mindestens einmal zur Verfügung gestellte Parameter:

$t_{fueling}^{start}$	Zeit, wenn die Betankung beginnt, als relative Zeit (in Spalte 1) und als absolute Zeit
$t_{fueling}^{stop}$	Zeit, wenn die Betankung beendet wird, als relative Zeit (in Spalte 1) oder als absolute Zeit.
$t_{fueling}^{event}$	Zeit, zu der die Betankung wechselt, z. B. von Com zu Noncomm oder zu Fallback oder zu Topoff.
p_0	Wert von p_{Disp} zu t_0 (Betankungsstartzeit). Der Wert wird für die Berechnung von APRR und p_{Target} verwendet
T_{amb}^{HRS}	von der HRS zu Beginn der Betankung gemessene Umgebungstemperatur [°C]. Der Wert wird für die Berechnung von APRR und p_{Target} verwendet

¹⁶ Vgl. Clean Energy Partnership (CEP), 2024

$APRR^{Disp}$	Durchschnittliche Druckrampenraten, die von der Zapfsäule verwendet werden (2 oder mehr Werte im Falle von Topoff oder fallback)
$p_{Target}^{Noncomm}$	Zieldruck für eine Betankung ohne IR-Kommunikation
p_{Target}^{Com}	Zieldruck für eine Betankung mit IR-Kommunikation
SOC_{Disp}^{stop}	Ladezustand aus Sicht des Dispensers SOC_{Disp} am Ende der Betankung
SOC_{CHSS}^{stop}	SOC_{CHSS} am Ende der Betankung (im Falle einer Betankung mit IR-Kommunikation)

Grund für den Abbruch der Betankung ($p_{Disp} > p_{Target}$ oder $SOC_{CHSS} > 95\%$ oder $SOC_{Disp} > 100\%$ oder Fehlerbezeichnung)

MC-Formula-Betankung

Die Betankungsdaten müssen entsprechend den Anforderungen des aktuellen MC Formula Validation Calculator (auf der Homepage von Wenger Engineering bei Registrierung abrufbar) bereitgestellt werden.

2.2.6 Vorhandene Abnahmehardware

Da die vorgeschriebenen Abnahmetests sowohl von einer unabhängigen dritten Partei als auch vom Hersteller der Tankstelle selbst durchgeführt werden dürfen, sind nicht alle vorhandenen Gerätschaften öffentlich publiziert.

Stand 2024 sind folgende Gerätschaften für Abnahmetests nach EN 17127 bekannt:

- KfZ-Anhänger Air Liquide France 70 MPa, ~5,5 kg H₂ (unbekannt, ob in Betrieb)
- KfZ-Anhänger Linde, 6 kg H₂ (vermutlich außer Betrieb)
- Anhänger HyStep (US)¹⁷ – Details sind online verfügbar
- Modulares System HD-FSTM des ZSW (35 MPa, 40 kg, in Erstellung)
- KfZ-Anhänger FSTM des ZSW (70 MPa, 6.7 kg, kurze Beschreibung unten)

Das Abnahmegesetz des Partners ZSW wird intern als Fuelling Station Test Module (FSTM) bezeichnet. Es verfügt über ein 70 MPa Druckwasserstoffspeichersystem, das für einen Wasserstoffeinlass von 60 g/s ausgelegt ist. An Bord befinden sich vier Fahrzeugtanks (3x Typ 4 und 1x Typ 3) mit einem Gesamtvolumen von 166 l, was ~6,7 kg Wasserstoff bei 70 MPa entspricht. Die Tanks können in frei wählbaren Kombinationen verwendet werden, um verschiedene CHSS-Volumenbereiche abzudecken. Der Befüllungsbehälter ist sowohl mit 70 MPa-Zapfpistolen als auch mit 35 MPa-LD-Zapfpistolen und einigen HD-35MPa-Zapfpistolen, die auf dem Markt erhältlich sind, kompatibel.

Temperatur und Druck des eintretenden Wasserstoffs, sowie Druck und Temperatur in allen vier Einzeltanks werden gemessen. Das FSTM verfügt über eine Infrarotschnittstelle, die nach SAE J2799¹⁸

¹⁷ Vgl. H2Tools, 2024

¹⁸ Vgl. SAE J2799, 2014

arbeitet und die "Fahrzeug"-Daten an die Tankstelle übermittelt. Die Daten der FSTM-Sensoren werden an Bord aufgezeichnet und anschließend zur Ergänzung der Tankstellendaten im Prüfbericht verwendet, insbesondere wenn die IR-Kommunikation vor oder während der Prüfung deaktiviert wird.



Abbildung 7: Abnahmegerät Fuelling Station Test Module (FSTM) des ZSW

2.2.7 Derzeitige Herausforderungen bei Mindestabnahmetests

Bekannte Herausforderungen in Stichworten zusammengefasst:

„Wer beauftragt bestimmt“ eine Geheimhaltungsvereinbarung GHV verhindert in manchen Konstellationen (vgl. Abbildung 7, die direkte Kommunikation zwischen Testdurchführenden, Betreiber und freigebender Stelle.

Übertragbarkeit und „Haltbarkeit“ der Ergebnisse: Die Funktionserfüllung ist „nur“ zum Zeitpunkt und unter den Bedingungen der Abnahme bekannt; bisher sind keine Wiederholprüfungen etabliert. Die in der EN 17127 geforderten Wiederholprüfungen finden derzeit mangels klarer Definition nicht im Feld statt. Eine genauere Definition könnte erforderlich sein, um festzulegen, welche Änderungen an der Hardware und Software der Station eine Wiederholung der Tests erfordern (anlassbezogene Prüfung) oder ein Maximalintervall festgelegt werden (vgl. Kapitel 4).

Abnahme-Hardware: Druckstufen 35/70 MPa für Fahrzeugtank-Kapazitäten LD <10 kg und HD 10 bis 200 kg sind derzeit nur teilweise vorhanden (vgl. ausführliche Beschreibung der Herausforderung am Ende des Abschnitts 5.1.1).

Zulassungsproblematik der verwendeten Tanksysteme (PED/TPED/R134). Ausführliche Beschreibung siehe im Abschnitt 2.3.

Prüfung der Steuersoftware erfolgt derzeit nur anhand der Testergebnisse.

Prüfung der Kalibration relevanter Sensorik bei Erstabnahme; danach liegt dies ausschließlich in der Verantwortung des Betreibers.

Abnahmen bei Anwendung von MC-Formula (anstatt tabellenbasierter Befüllung) sind seit 2020 in der SAE J2601 definiert. Aktuell ist dies einmal in Deutschland implementiert; die Auswertung erfolgt derzeit über freie Software (von Wenger Engineering). Der Inhalt der definierten SAT-Tests nach EN 17127 sollte für MC Formula-HRS überprüft werden (vgl. 5.1.1).

2.3 Analyse absehbarer neuer Protokolle und Technologien

Die aktuellen Betankungsprotokolle und Technologien sind primär auf die Bedürfnisse von Personenkraftwagen (EU-Fahrzeugklasse M1), SAE J2601/1 sowie von Bussen (M2, M3) und Lkw für den Kurzstreckenverkehr (Klasse N1, N2), SAE J2601/2 ausgerichtet. Aufgrund ökonomischer Erwägungen und technischen Fortschritts werden jedoch die von den OEM am Markt gebrachten, wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge immer ausgereifter und greifen auf anwendungsfallabhängig sinnvolle Technologien (bspw. Typ 3 oder Typ 4 Druckwasserstoffspeicher) oder setzen gar neue Technologien ein (z. B. flüssiger Wasserstoff). Sie gleichen dabei konventionellen, meist dieselbetriebenen Fahrzeugen in Bezug auf Reichweite und Tankgeschwindigkeit immer mehr. Um das volle Potential dieser Automobile zu nutzen, müssen die entsprechenden Betankungsprotokolle umfassend angepasst und auch neue hinzugefügt werden. Dabei werden auch die offenbarten Unzulänglichkeiten der bestehenden Protokolle adressiert, wie z. B. der aktuell schwer kontrollier- bzw. vorhersagbare Endfüllstand (SOC), der Umgang mit Druck- und Durchflussschwankungen innerhalb einer Tankstelle und von Tankstellen untereinander, die großen Unterschieden bei den Umwelt- und Betankungsrandbedingungen sowie die teilweise langen Betankungsdauern. Die aktualisierten und neuen Protokolle werden in diesem Zusammenhang ganzheitlich konzipiert – klare Hardware-Standards und die Festlegung essenzieller Hardware, die eine enge Abstimmung zwischen Tankstellenherstellern und Fahrzeug-OEM erfordert, sind unerlässlich, um ein hohes Sicherheits- und Komfortniveau zu gewährleisten. Die folgende Tabelle 5 bietet einen Überblick über die derzeit in Entwicklung befindlichen Protokolle und zeigt die Randbedingungen und Besonderheiten auf, die diese Protokolle auszeichnen.

Tabelle 5: Übersicht neuer Füllprotokolle

<p>SAE J2601-5 (TIR: Technical Information Report)</p>	<p>HD-Betankung bis erweiterte <u>unidirektionale</u> IR-Kommunikation (Reserve Parameter (OD) SAE J2799 werden genutzt, bspw. max. Füllrate FM und ww. max. Tankvolumen TVL). H35: 120 g/s; 6 ... 180 kg H₂ Tankkapazität (50 – 1000 l Einzeltank): 5000 l in Summe H70: 60 / 90 / 120 / 300 g/s; 10 ...201 kg H₂ (50 – 800 l Einzeltank): 10.000 l in Summe</p>
--	---

	<p>Zwei Protokolle: tabellenbasierte Füllung oder mittels Berechnung (MC-formula) Mit (SAE J2799) oder ohne Kommunikation Neue Berechnungsverfahren für Volumenmessung und Füllverlauf („taper“ approach) Veröffentlichung der Norm wird für Anfang bis Mitte 2025 erwartet Harmonisierung mit ISO 19885-3 angestrebt (vgl. Bemerkung unten)</p>
ISO 19885-2	<p>sicherheitsgerichtete Kommunikation: IR, NFC, WLAN, Bluetooth; Arbeit aktuell eingestellt, mglw. Wiederaufnahme Ende 2024/Anfang 2025 Einrichtung geeigneter Schutz- und Sicherheitsvorkehrungen für den Informationsaustausch zwischen Fahrzeug und Zapfsäule während der Betankung. Diese Schutzmaßnahmen müssen die Integrität, Authentizität und Vertraulichkeit der Daten gewährleisten. Definiert Sicherheitsanforderungen an das Betankungs-/Kommunikationsprotokoll, um die ausgetauschten Informationen zw. Tankstelle und Fahrzeug zu schützen Definiert Sicherheitskontrollen = (Sicherheits)Maßnahmen, die im Betankungs-/Kommunikationsprotokoll implementiert werden müssen, um die Sicherheit der Kommunikation zu gewährleisten.</p>
ISO 19885-3	<p>High flow hydrogen fuelling protocols for heavy duty road vehicles Protokolle 60 bis 300 g/s, bis 70 MPa, bis 180 kg (35 MPa) bzw. 200 kg (70 MPa) H₂-Kapazität; PRHYDE, RTR HF, ANN-MPC, Twin-Nozzle und Safety Watchdog Projekte dienen als Basis, Voraussetzung veröffentlichte ISO 19885-2; Arbeit aktuell eingestellt, mglw. Wiederaufnahme Ende 2024/Anfang 2025 Entwicklung diverser Protokolle (Hardware, Software, Kommunikation), die einzeln oder kombiniert verwendet werden können Fokus: Nutzfahrzeuge und Busse Kommunikation: statisch und dynamisch Paradigmenwechsel: Fahrzeug bestimmt (vgl. Ergebnisse aus PRHYDE EU-FoVo)</p>
(sLH ₂) (CEP-Whitepaper-Dokument; schon recht konkret)	<p>Betankung mittels unterkühlten Wasserstoffs (T ca. -245 °C, überkritisch, unter Überdruck > 1,3 MPa stehend, Zielwert im Fahrzeugtank bspw. 1,6 MPa) Ohne Gasrückfluss aus Fahrzeugtank in Tankstelle und ohne Abbruchsignal von Fahrzeug Speichergröße/Tank: bis zu 120 kg sLH₂ (sLH₂-Dichte ca. 62 kg/1000 l) Protokoll berücksichtigt unterschiedl. Anfangszustände (Speichergrößen, Füllzustände, Druck (Fzg.-Tank, Füllkupplung), Temp. (intern/extern) usw.)</p>

	<p>3 Phasen: Vorfüllung (Spülen, Leckagetest, Druckermittlung usw.) Hauptfüllung, 3stufig: reduzierter Gasfluss zur Kühlung des Systems, dann berechneter Gasfluss, dann wieder reduzierter Gasfluss Nachfüllung (Spülen, Leckagetest, Druckermittlung usw.) Einfachste Kommunikation</p>
<p>CcH₂ (CEP-Whitepaper-Dokument; noch recht unkonkret)</p>	<p>Kryo-verdichteter Wasserstoff (35-50 MPa, T ca. -240 °C bis -73 °C) Mit Gasrückfluss aus Fahrzeugtank in Tankstelle und ohne Abbruchsignal von Fahrzeug Speichergröße/Tank: bis zu 100 kg CcH₂ (CcH₂-Dichte ca. 61 kg/1000 l bis 72 kg/1000 l) 3 Phasen: Vorfüllung (Spülen, Leckagetest, Druckermittlung usw.) Hauptfüllung (basierend auf einem noch zu bestimmenden Füllprotokoll; prinzipielle Parameter und Vorgabewerte sind vorgeschlagen) Nachfüllung (Spülen, Leckagetest, Druckermittlung usw.) Ohne Kommunikation</p>

Es ist zu erwarten, dass nach der offiziellen Verabschiedung und Veröffentlichung dieser Protokolle in den „Abnahmenormen für Wasserstofftankstellen“ EN 17127, ISO 19880-1 und ISO 19880-2 entsprechende Verweise erfolgen werden. Hinsichtlich der Abnahme und der hierfür erforderlichen Abnahmehardware ergeben sich bereits jetzt sinnvolle Konsequenzen, die in Kapitel 5.3 für CGH₂ diskutiert werden.

2.4 Prozessvorschlag für Verantwortlichkeiten und Abläufe

2.4.1 Verantwortlichkeiten, Abläufe und Kompetenzen für Abnahmetests an HRS

Verantwortlichkeiten

Um die Verantwortlichen für Abnahmetests an HRS zu ermitteln, ist zuerst in Erfahrung zu bringen, welche Parteien am Prozess beteiligt sind. Diese Überlegung führt zu Folgefragen, welche im Prozessschema vermerkt wurden:

- Wer hat Interesse an den Abnahmetests?
- Wer führt die Abnahmetests durch oder wer lässt sie durchführen?
- Wer wertet die Abnahmetests aus bzw. wer ist an der Auswertung beteiligt?

Für diese Kernfragen gilt es, die Parteien unter Angabe von Begründungen zu bestimmen.

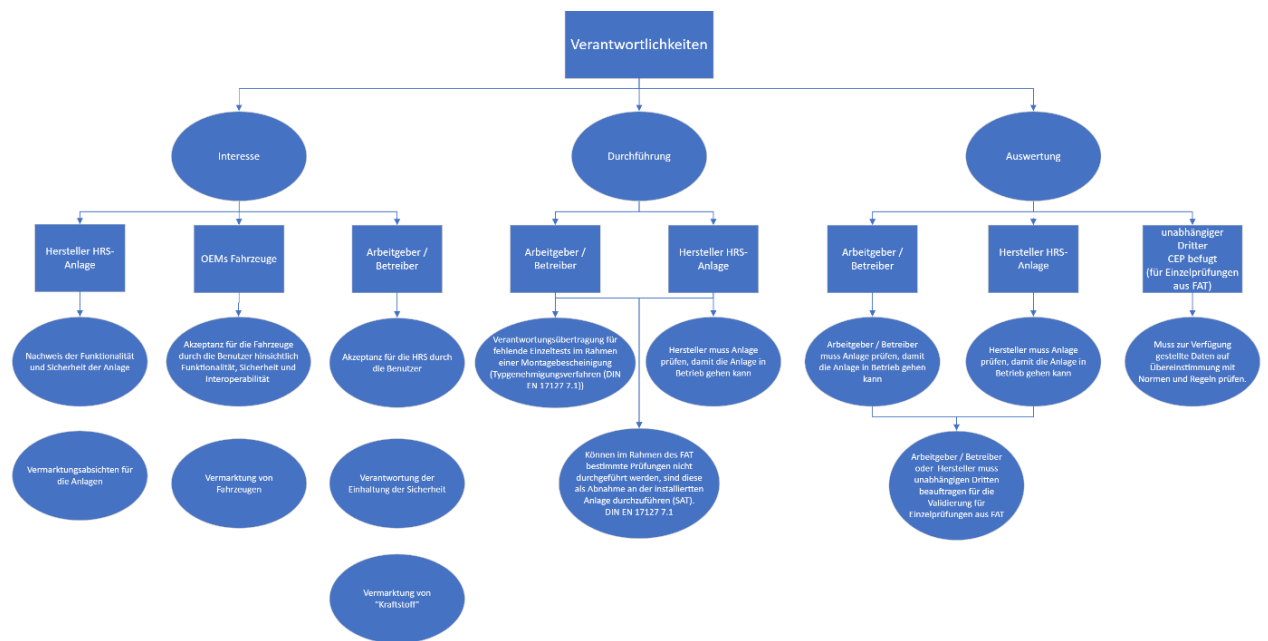


Abbildung 8: Übersicht zu Verantwortlichkeiten bei FAT nach ISO 19880-1 an HRS

Interesse

Zur ersten Frage „Wer hat Interesse an den Abnahmetests?“ lassen sich drei Interessensgruppen identifizieren. Zunächst ist der Hersteller der HRS zu nennen, der seine Anlage als Produkt vermarkten möchte und daher ein übergeordnetes Interesse an der Funktionalität und Sicherheit der HRS hat.

Die zweite zu nennende Partei ist der Betreiber bzw. der Arbeitgeber im Falle einer betrieblich genutzten, nicht öffentlichen HRS. Während der Arbeitgeber als Betreiber einer nicht öffentlichen Zapfstelle sein Hauptaugenmerk auf die Einhaltung des Arbeitsschutzes richten muss, hat der Betreiber einer öffentlichen HRS das Interesse, mit seiner Anlage möglichst viele Kunden zu versorgen. Das Ziel, mit der Anlage Geld zu verdienen, kann nur über eine allgemeine Kundenakzeptanz der HRS erfolgen. Zu dieser

Akzeptanz gehört auch die Interoperabilität der Anlage. Jeder Kunde muss die Möglichkeit haben, unabhängig von seinem Fahrzeug an der betreffenden HRS Wasserstoff zu tanken.

Auch die Fahrzeughersteller, deren Produkte uneingeschränkt an öffentlichen Tankstellen betankt werden sollen, teilen dieses Interesse. Über eine gewährleistete Interoperabilität können die möglichen Kunden Sicherheit darüber erlangen, auf ein möglichst großes Netz an Wasserstofftankstellen zugreifen zu können und damit uneingeschränkt mobil zu bleiben. Ein gesteigertes Interesse an harmonisierten Abnahmeprüfungen zur Wahrung der Interoperabilität hat diese Partei besonders durch ihre Beteiligung in der CEP, vgl. 2.1 zum Ausdruck gebracht. Bestrebungen hin zu gleichbleibenden Standards und eine Integration und Konkretisierung des Themengebiets in die bestehende Normenlandschaft werden seit 2012 durch die CEP vorangetrieben.

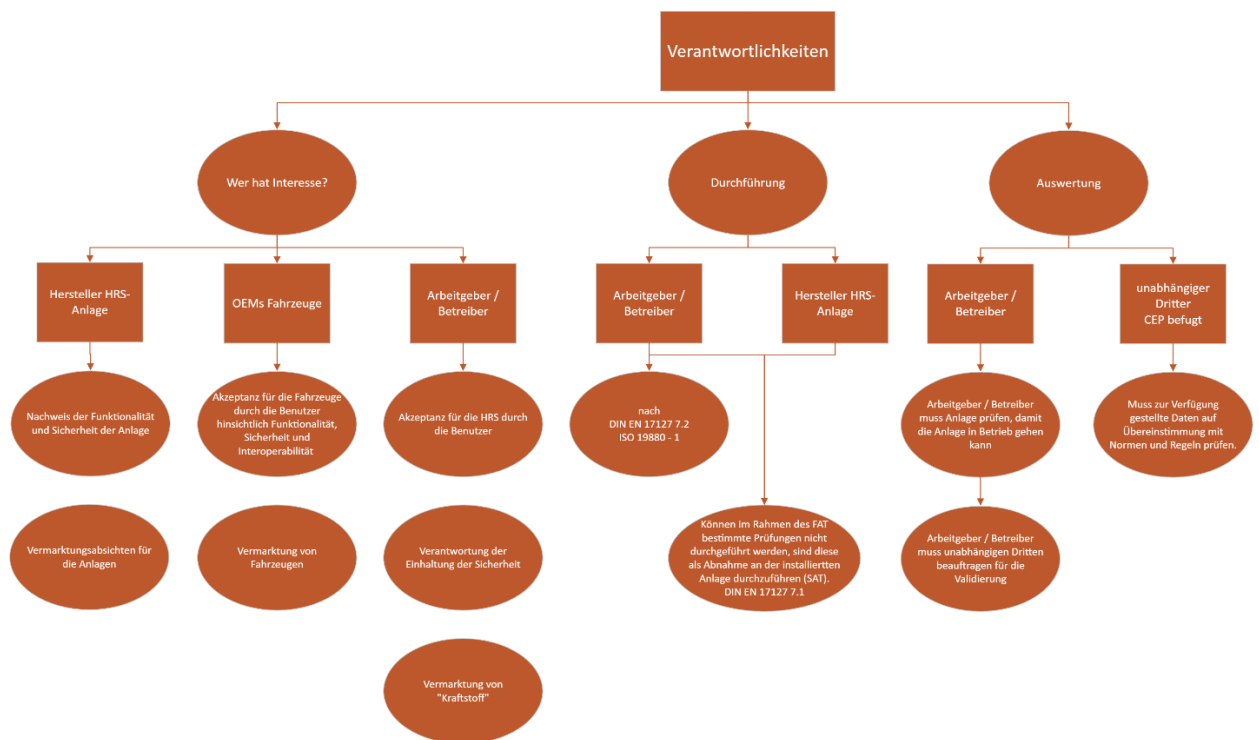


Abbildung 9: Übersicht zu Verantwortlichkeiten bei SAT nach (DIN) EN 17127 an HRS

Durchführung

Für die Beantwortung der zweiten Frage „Wer führt die Abnahme durch oder wer lässt sie durchführen?“ kann grundlegend auf die Parteien der ersten Frage zurückgegriffen werden. Verantwortlich sind hierbei die unmittelbar am Bau der Wasserstofftankstelle Beteiligten, d.h. auf der einen Seite der Hersteller der Anlage und auf der anderen Seite der zukünftige Betreiber. Eine detailliertere Übersicht zu den Beteiligten findet sich unter Punkt 2.2.3 in Abbildung 4. Wie beschrieben, wird für die Prüfung in den meisten Fällen, insbesondere beim SAT, ein Prüfdienstleister, wie z. B. das ZSW, beauftragt. Ein Prüfdienstleister wird in

dieser Betrachtung als Teil der jeweils verantwortlichen Partei gesehen und ist im Prozessschema des entsprechenden Inbetriebnahme-Teils nicht extra aufgeführt.

Die Auswahl der Beteiligten ermöglicht eine klare Zuordnung der Verantwortlichkeiten für die unterschiedlichen Teile der Abnahmeprüfungen, wie unter 2.2.1 beschrieben. Diese Struktur spiegelt sich auch in den Prozessschemata für "Site Acceptance Tests" (SAT) und "Factory Acceptance Tests" (FAT) wieder. Während der Hersteller die Verantwortung für den Inhalt des FAT trägt, ist der Betreiber verpflichtet, vor der Freigabe der HRS für die Öffentlichkeit einen SAT durchzuführen bzw. durchführen zu lassen.

Der Hersteller der Anlage steht also grundsätzlich vor der Auslieferung seines Produkts in der Verantwortung, die geforderten Vorgaben einzuhalten. Laut der Beschreibung in 2.2.1 kann es vorkommen, dass einzelne Tests im Stadium der Werksabnahme noch nicht möglich sind. Dies kann zum Beispiel im Aufbaustadium oder der Art und Weise der Produktion begründet liegen. Daher besteht in einzelnen Fällen die Notwendigkeit, bestimmte Einzeltests aus Tabelle C.2 der ISO 19880-1 vor Ort zu durchzuführen.

Wie bereits ausgeführt, werden diese Tests dann im Rahmen des SAT als Teil der Inbetriebnahme nachgeholt. In den Prozessschemata ist diese Besonderheit jeweils aus der Sicht der betreffenden Testreihe unter dem Punkt „Durchführung“ aufgelistet.

Auswertung

Bei der Auswertung wird zur Wahrung der Objektivität ein unabhängiger Teilnehmer hinzugezogen. Die Frage „Wer wertet die Abnahmetests aus bzw. wer ist an der Auswertung beteiligt?“ ist also mit den für die Abnahmeprüfungen verantwortlichen Parteien und einem unabhängigen Dritten zu beantworten. Dieser wird benötigt, um eine unabhängige Überprüfung der Abnahmeprüfung des Betankungsprotokolls vorzunehmen. Neben dem Vertrauen, das eine unabhängige Überprüfung gegenüber einer rein internen Validierung, z. B. durch den Hersteller der Anlage, mit sich bringt, findet sich eine Grundlage für diese unabhängige Überprüfung in der EU-Verordnung 2023/1804/EU (AFIR). Unter Punkt 37 steht folgende Aussage als Beweggrund: „Endnutzern sollte der Zugang zu öffentlich zugänglichen Ladestationen und deren Nutzung unabhängig von der Marke ihres Fahrzeugs und in benutzerfreundlicher und diskriminierungsfreier Weise möglich sein.“ Diese Verpflichtung zur Interoperabilität und deren unabhängige Überprüfung definiert die CEP, als Vertreterin führender Unternehmen der Wasserstoffindustrie, als Voraussetzung für die Erlaubnis der Benutzung der entsprechenden HRS durch die Produkte ihrer Mitglieder. Die CEP hat daher in einer Schulungsreihe mit eigens entwickelten Workshops unabhängige Prüfunternehmen in Deutschland zur Abnahme von Inbetriebnahmeprüfungen der Betankungsprotokolle an Wasserstoff-Tankstellen zertifiziert. Als eines der ersten Unternehmen konnte der TÜV Rheinland im Juli 2023 eine solche Zertifizierung erlangen. Seitdem kann der Prozess, wie in Abbildung 5 und Abbildung 6 in Kapitel 2.2.3 dargestellt, beschrieben werden.

Abläufe

Zur Herleitung des Ablaufs der Abnahmeprüfungen muss mit einem Blick auf die Forderungen von Normen und Verordnungen der allgemein benötigt Umfang ermittelt werden. Hierzu wird auf die oben genannte EU-Verordnung Bezug genommen. Gemäß der Verordnung (EU) 2023/1804 des Europäischen Parlaments und Rates vom 13. September 2023 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU, Anhang II, Artikel 3, müssen alle neuen und erneuerten Wasserstoffzapfstellen folgende Normen erfüllen:

1. HRS im Freien müssen mindestens den Interoperabilitätsanforderungen nach der Norm EN 17127:2020 entsprechen (3.1)
2. Qualitätseigenschaften des abgegebenen Wasserstoffs müssen den Anforderungen der Norm EN 17124:2022 entsprechen (3.2)
3. Betankungsalgorithmus muss den Anforderungen der Norm EN 17127:2020 entsprechen
4. Betankungsanschlüsse müssen der Norm EN ISO 17268:2020 entsprechen.

Für die FAT und SAT im Rahmen der Inbetriebnahmeprüfung sind hier Punkt 1 und Punkt 3 von Bedeutung. Es wird auf die EN 17127:2020 verwiesen. Wie oben beschrieben, ist dies in der EN 17127:2020 unter Punkt 6.1 bzw. im deutschen Derivat DIN EN 17127:2019-09 (basierend auf der EN 17127:2018) unter Punkt 7.1 geregelt. Es wird sowohl eine „Mindestabnahme der installierten Anlage SAT, als auch eine „Mindestabnahme und Prüfung auf Kompatibilität mit dem verwendeten Protokoll unter Berücksichtigung der Verfahrensgrenzen unter 5.3.1 (durchführbar als „Werksabnahme (FAT) verlangt. Anders als die klaren Durchführungsanweisungen aus DIN EN 17127:2019-09, Tabelle 1 (vgl. Tabelle 3), bzw. aus EN 17127:2020, Table 1, für den SAT, werden solche Vorgaben für den FAT nicht beschrieben. Hierzu ist ein Rückschluss der Herkunft der Vorgaben aus Tabelle 1 bzw. Table 1 nötig. Diese stammen aus ISO 19880-1:2020, 12.5.4.2 SAT overview, “Table 2 – Option 1 for minimum site acceptance testing” mit dem klaren Verweis auf Tabelle C.2 im gleichen Dokument in der letzten Spalte der Tabelle. Aufgrund dieser Herleitung wird, wie in Kapitel 1.1/1.2 beschrieben, heutzutage die Tabelle C.2 als Referenz für die mindestens notwendigen Testprozedere der Abnahmeprüfungen verwendet. Sie finden damit als anerkannte Regel Anwendung.

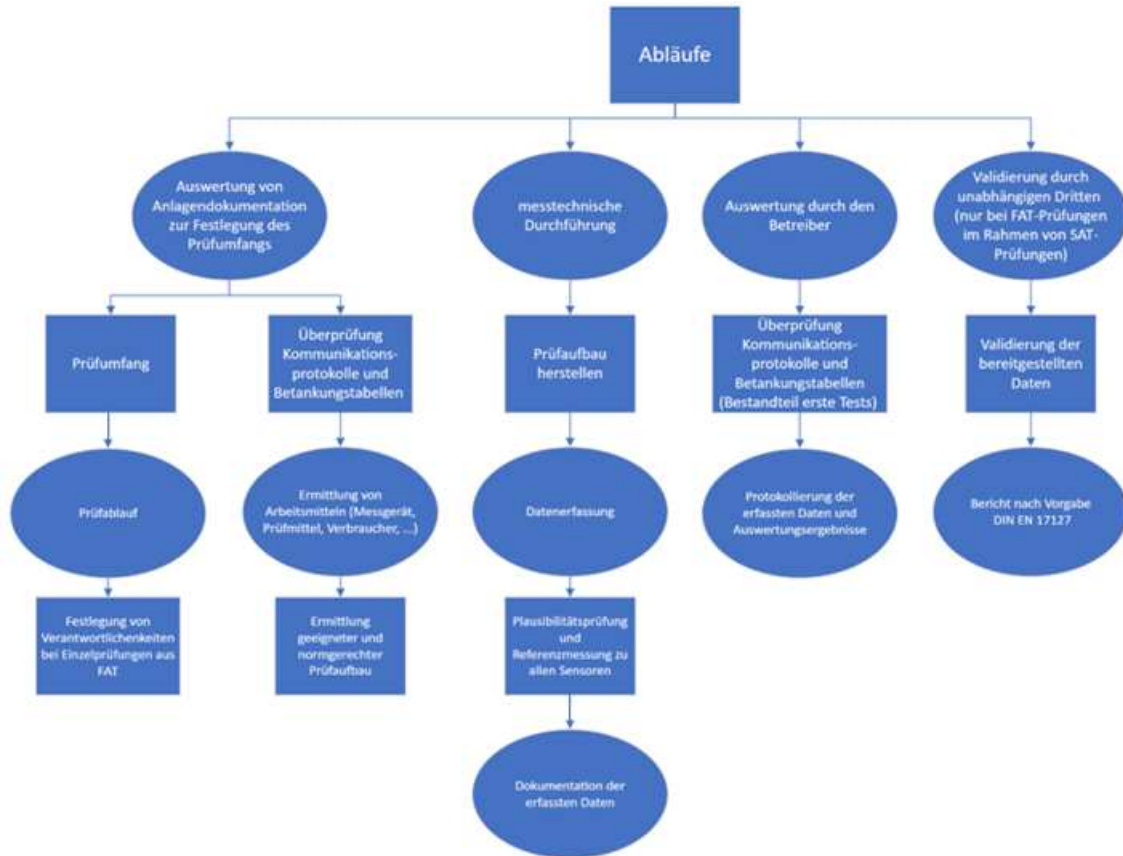


Abbildung 10: Übersicht zu Abläufen bei FAT nach ISO 19880-1 an HRS

Ein FAT ist bei korrekter Durchführung und Dokumentation als Typgenehmigungsverfahren für jeden Anlagentyp, definiert als die Summe gleicher Teile im vollständig gleichen Aufbau, nur einmal notwendig. Einzelne Prüfungen des FAT können bereits im Rahmen der Produktion durchgeführt werden. So können z. B. Tests Nr. 1 und Nr. 2 bereits werkseitig bestätigt werden und auch Tests, welche ausschließlich die Softwarereaktionen abprüfen, sind zu großen Teilen bereits produktionsseitig durchführbar. Entscheidend sind hier ein geeigneter und normgerechter Prüfaufbau inklusive der Verwendung geeigneter Messgeräte und die Dokumentation der erfassten Daten. Alle nicht während des Produktionsprozesses durchführbaren Tests aus Tabelle C.2 der ISO 19880-1 sind dann spätestens am Aufstellungsort zusammen mit dem SAT durchzuführen.

Um die jeweils übrigen Prüfumfänge des FAT beziehungsweise die zusätzlich zum SAT durchzuführenden Tests korrekt festzustellen, ist eine Analyse und Auswertung der Anlagenausstattung und -dokumentation durchzuführen. So können Schlüsse auf einen Prüfablauf erfolgen und Verantwortlichkeiten für Einzelprüfungen des FAT oder SAT festgelegt werden. Außerdem kann hiermit auf die Notwendigkeiten für einen normgerechten und geeigneten Prüfaufbau inklusive der zur Prüfung benötigten Arbeitsmittel geschlossen werden. Eine Prüfung am Aufstellungsort besteht daher mindestens aus dem in Tabelle 1 der (DIN) EN 17127 beschriebenen Prüfablauf für den Site Acceptance Test, sie kann jedoch auch noch offen

gebliebene Einzeltests aus Tabelle C.2 der ISO 19880-1 enthalten. Natürlich sind die erfassten Daten auch beim SAT zu dokumentieren.

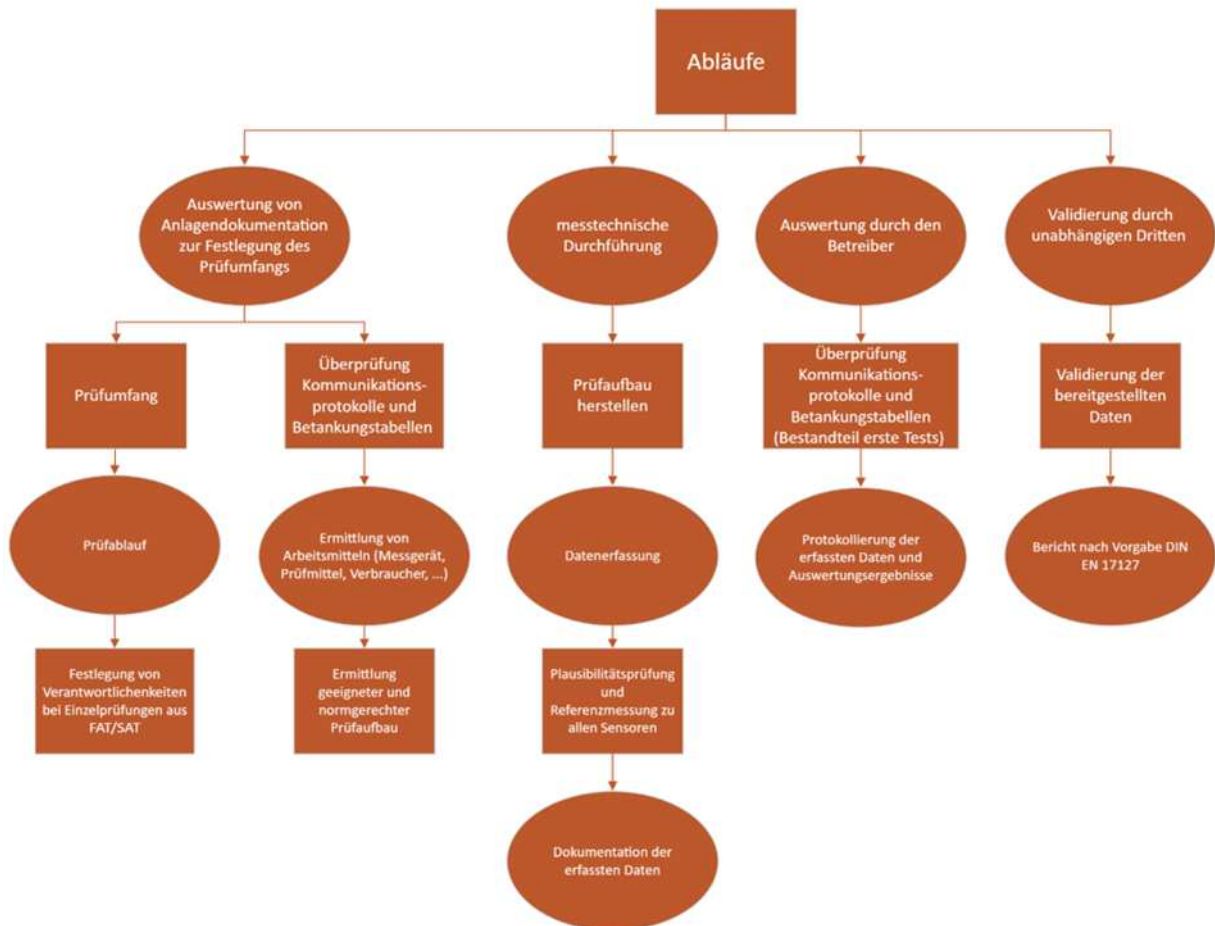


Abbildung 11: Übersicht zu Abläufen bei SAT nach (DIN) EN 17127 an HRS

Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Prozesse beider Teile der Inbetriebnahmeprüfung einander ähneln. Eine Differenz zwischen beiden Prozessen findet sich nur in den durchzuführenden Einzeltests und dem Ort der Durchführung. Die in den Prozessschemata aufgezeigten Übersichten zu den Abläufen sind daher für FAT und SAT gleich.

Kompetenzen

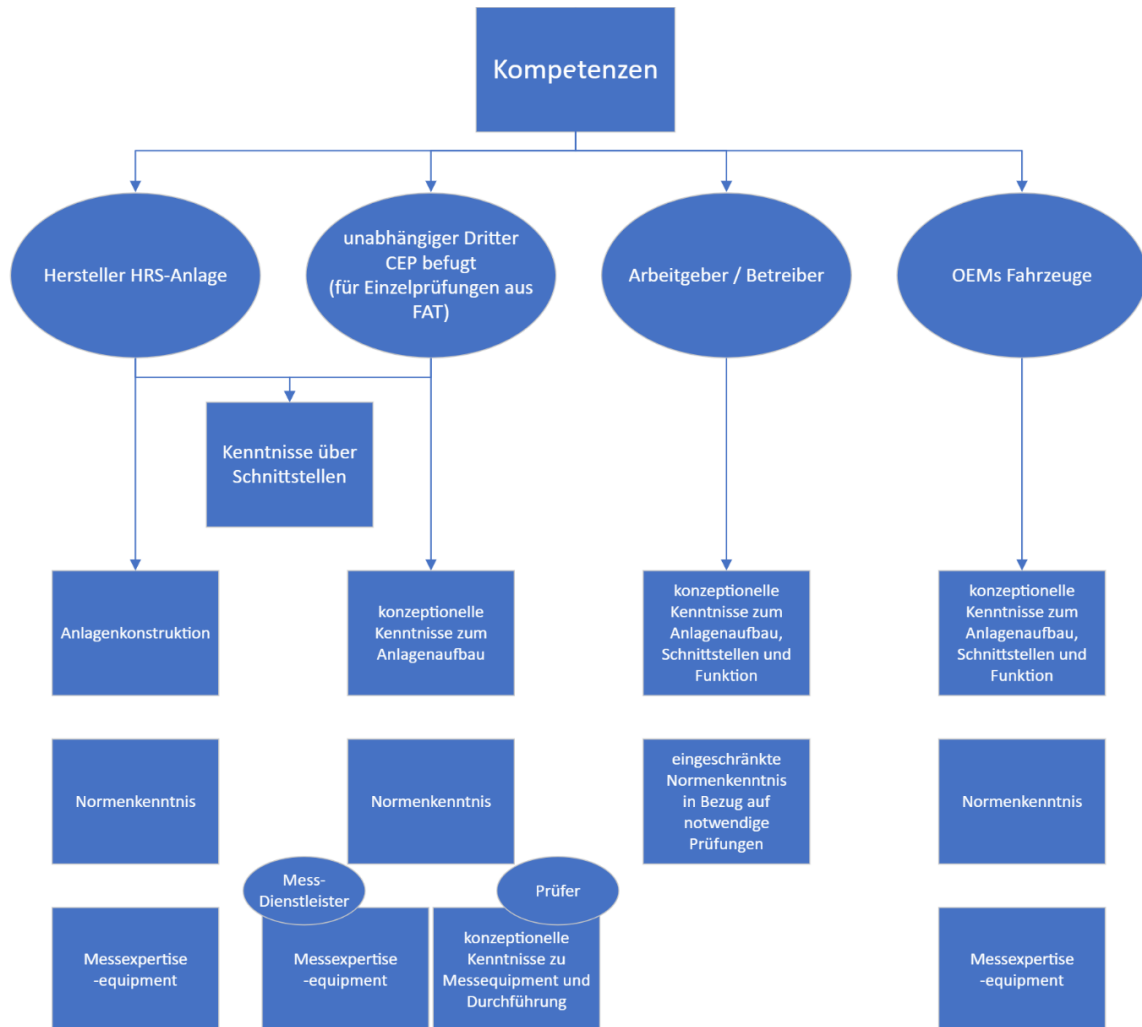


Abbildung 12: Übersicht zu Kompetenzen bei FAT nach ISO 19880-1 an HRS

Bei der Analyse der notwendigen Kompetenzen wurde vom Status quo ausgegangen. Dabei wurden die vier zuvor ermittelten Parteien betrachtet. Selbstverständlich ist die zur Testdurchführung notwendige Kenntnis jedoch auch den ausführenden Dienstleistern zuzuschreiben. Daher wurden die zur Messung beauftragten Dienstleister, wie in Abbildung 11 und Abbildung 12 sichtbar, als Mess-Dienstleister unter der passenden Partei - dem unabhängigen Dritten - aufgeführt und mit der Aufgabe der Messung von der Prüfauswertung differenziert.

Zusammengefasst konnten drei Themengebiete herausgearbeitet werden, die für die benötigten Kompetenzen maßgeblich sind:

- Kenntnisse zu Konstruktion, Aufbau und Funktionsweise der Anlage
- Kenntnis zu Gesetzen, Normen und Richtlinien
- Kenntnisse zu Messung, Equipment und Prüfaufbau.

Anhand dieser Themengebiete lassen sich die Aufgaben der beteiligten Parteien identifizieren. So ist z. B. erkennbar, dass die Fahrzeughersteller nur marginal mit den Wasserstoffbetankungseinrichtungen zu tun haben. Das benötigte Wissen beschränkt sich auf die Schnittstellen zum Fahrzeug, die Kommunikation zum Fahrzeug und den Vorgang der Betankung sowie die spezifischen Anforderungen an das Fahrzeug. In diesen Bereichen ist jedoch fundiertes Wissen erforderlich. Der Betreiber muss im Wesentlichen über seine Pflichten informiert sein, den Überblick über notwendige Prüfungen behalten und sich um deren Einhaltung kümmern. Da die Tests für FAT und SAT derzeit von Anlagenherstellern oder von Dienstleistern wie z. B. dem ZSW durchgeführt werden, wird die Messexpertise den durchführenden Parteien zugeschrieben. Der unabhängige Dritte in prüfender Funktion muss jedoch mindestens über Kenntnisse zum Messequipment und zur Testdurchführung verfügen, um die übermittelten Testergebnisse vollständig und korrekt bewerten zu können. Ebenso sind fundierte Kenntnisse über Gesetze, Normen und Richtlinien sowie zumindest konzeptionelle Kenntnisse über die Auslegung der Anlage hinsichtlich ihrer Funktion für den unabhängigen Dritten zwingend erforderlich. Umfangreiche Kenntnisse zu den oben genannten Themen sind auch für den HRS-Hersteller selbstverständlich von großer Bedeutung.

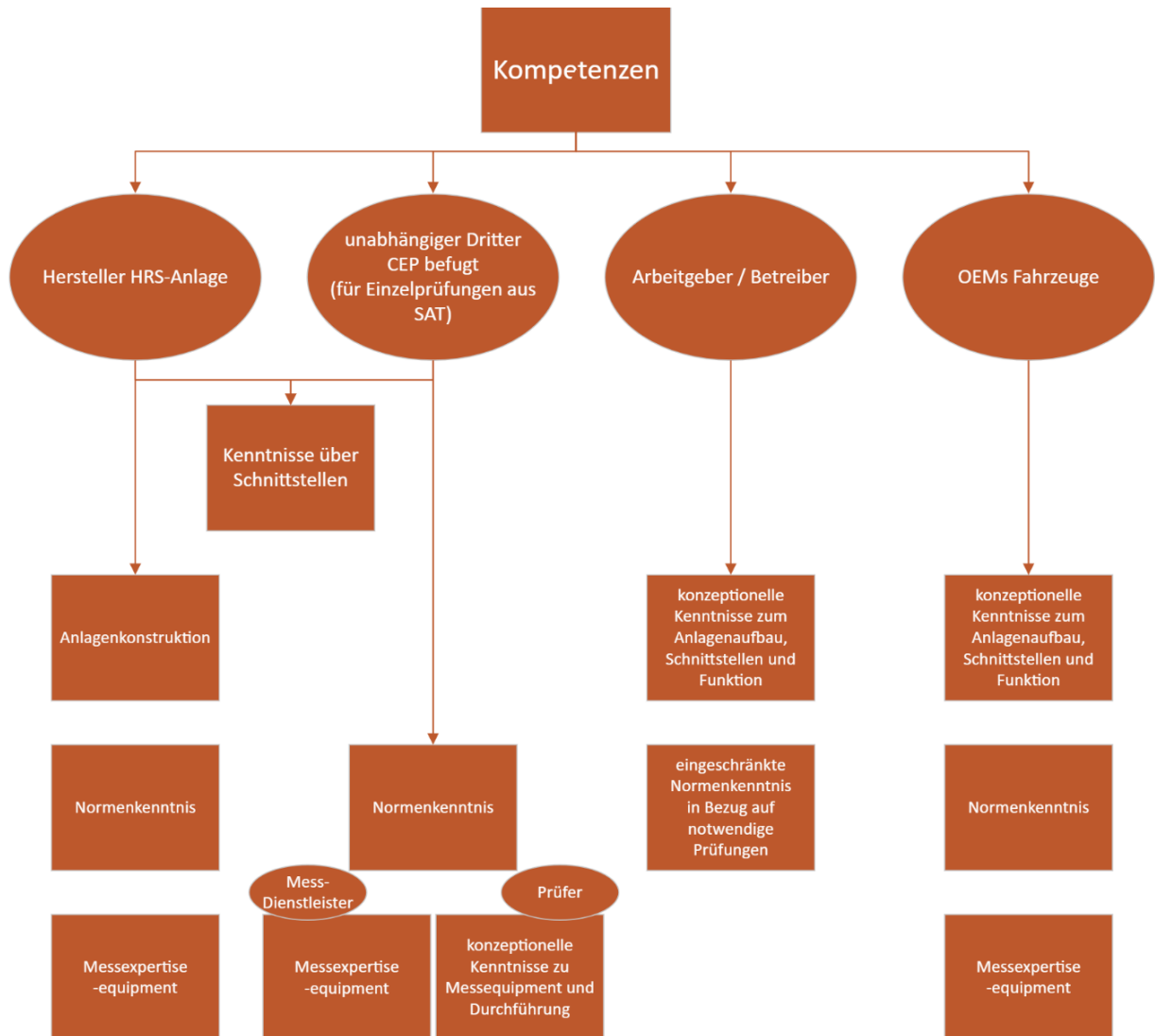


Abbildung 13:Übersicht zu Kompetenzen bei SAT nach (DIN) EN 17127 an HRS

Fazit

Die Erarbeitung der Verantwortlichkeiten, Abläufe und Kompetenzen konnte sowohl Unterschiede als auch die Gemeinsamkeiten zur Herangehensweise und Durchführung der Factory und Site Acceptance Tests hervorheben. Es wurde festgestellt, dass die größten Unterschiede zwischen beiden Testreihen in den Verantwortlichkeiten liegen. Die konzeptionelle Vorgehensweise bei der Durchführung ist zwar von Einzeltest zu Einzeltest unterschiedlich, kann in ihrer Gesamtheit jedoch durchaus als gleichartig bezeichnet werden.

2.4.2 Vorschlag für den Prozessablauf der SAT und FAT an HRS

Im Folgenden wird ein Vorschlag für den künftigen Prozessablauf aufgezeigt. Ziel ist es, einen möglichst allgemeingültigen Prozessvorschlag zu formulieren. Es wird daher nicht zwischen den unterschiedlichen Möglichkeiten der Testdurchführung (simulativ, im Testlabor oder vor Ort) unterschieden.

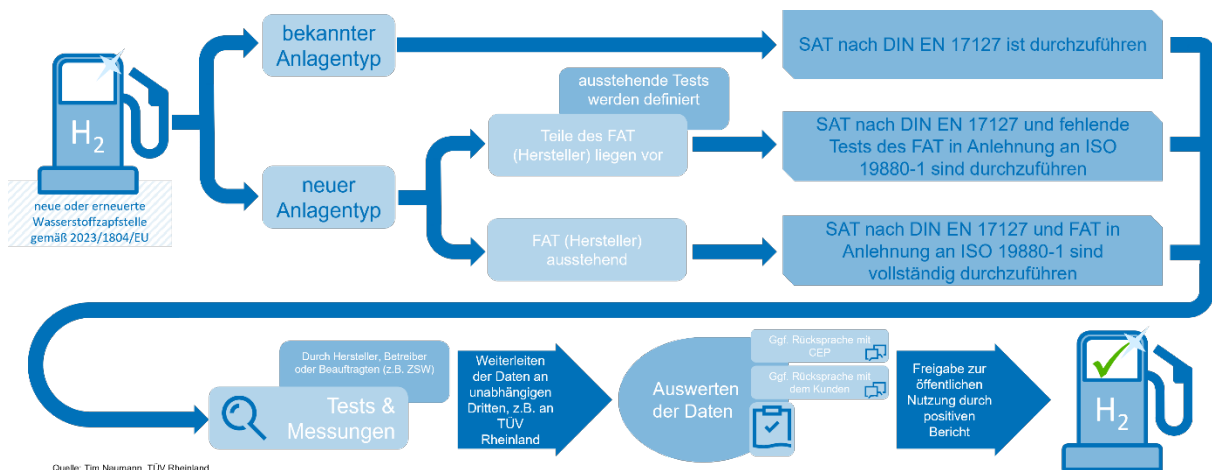


Abbildung 14: Prozessvorschlag für zukünftige SAT und FAT

Gemäß der Verordnung 2023/1804/EU müssen neu errichtete oder erneuerte Wasserstoffzapfstellen einer Abnahmeprüfung des Betankungsprotokolls unterzogen werden. Hierfür können gemäß den Ergebnissen der vorhergehenden Kapitel zwei grundsätzliche Fälle unterschieden werden:

1. Es wird ein bereits bekannter Anlagentyp verbaut.
2. Der verbaute Anlagentyp ist neu beziehungsweise wird zum ersten Mal für den Betrieb als öffentlich zugängliche HRS eingesetzt.

Im ersten Fall ist nach DIN EN 17127:2019, 7.1 lediglich der Site Acceptance Test durchzuführen, sofern ein vollständiger FAT im Vorfeld bereits als „Werksabnahme“¹⁹ stattgefunden hat und entsprechend dokumentiert wurde. Dies entspricht der bereits in Kapitel 2.2.1 erläuterten aktuellen Vorgehensweise. Der zweite Fall lässt sich in zwei weitere Unterfälle gliedern: Falls der Hersteller der Anlage noch keinen Factory Acceptance Test (FAT) durchgeführt hat, kann dieser auch nach der Installation vor Ort durchgeführt werden (siehe Kapitel 2.2.4). Alternativ kann es vorkommen, dass nur Teile des FAT vom Hersteller durchgeführt wurden. In diesem Fall besteht die Notwendigkeit, die Einzeltests zu vervollständigen und somit einen vollständigen FAT abzubilden.

In Abbildung 14 wird diese Fallunterscheidung am Anfang des Prozesses dargestellt. Danach definiert sich der Prüfaufwand vor Ort. Derzeit werden die erforderlichen Tests und Messungen an der Zapfstelle dann durch Hersteller, Betreiber oder einen Beauftragten durchgeführt. In allen Fällen ist jedoch eine uneingeschränkte Datenintegrität entscheidend. Anschließend erfolgt derzeit die Datenauswertung durch eine der genannten Parteien, bevor sie zur nochmaligen Überprüfung an einen unabhängigen Dritten

¹⁹ Vgl. 7.1 DIN EN 17127:2019, 2019

übermittelt wird (vgl. Abbildung 6). Der in Abbildung 14 vorgesehene Prozessvorschlag sieht hingegen eine Datenauswertung direkt durch den unabhängigen Dritten vor, da die derzeitige Überprüfung der Auswertung durch Hersteller, Betreiber oder einen Beauftragten in Verbindung mit den Rohdaten erfolgt. Hierbei werden teilweise auch schon heute parallele Auswertungen erstellt, wenn sich die Erkenntnisse unterscheiden. Eine Bündelung würde also einen Mehraufwand für den unabhängigen Dritten bedeuten, jedoch die übrigen Stellen im Arbeitsaufkommen entlasten und durch Vermeidung von doppelter Arbeit für einen insgesamt schlankeren und beschleunigten Prozess sorgen. Etwaige Rückfragen an Wissenspools wie die CEP beziehungsweise Rücksprachen mit dem entsprechenden Kunden wurden hierbei mit eingeplant.

Die Freigabe der HRS erfolgt dann in Bezug auf das Betankungsprotokoll mittels eines positiven Berichts.

3 Ermittlung der Prüferfordernisse von nicht-öffentlichen HRS

Zunächst ist eine Einordnung der Anlagenart „Wasserstofftankstelle“ in das gegebene nationale Rechtskataster für Anlagenprüfungen erforderlich. Dabei wird hier allein auf die Phase nach Inbetriebsetzung der Anlage abgestellt, das bedeutet, dass gesetzliche Herstell- und Errichtungsvorgaben nicht betrachtet werden. Auch Prüfpflichten der gesetzlichen Unfallversicherer, privatrechtlichen Sachversicherer sowie personenbezogene Arbeitsschutzprüfungen werden hier nicht betrachtet.

Nicht-öffentliche Wasserstofftankstelle

Die hier einschlägige AFIR-Verordnung²⁰ definiert unter dem Erwägungsgrund 11 den Begriff „öffentlich“ wie folgt:

„Öffentlich zugängliche Ladepunkte oder Zapfstellen sind z. B. auch in Privateigentum befindliche, öffentlich zugängliche Ladepunkte oder Zapfstellen, die sich auf öffentlichem oder privatem Grund befinden, etwa auf öffentlichen Parkplätzen oder Parkplätzen von Supermärkten. Ladepunkte oder Zapfstellen, die sich auf öffentlich zugänglichem privatem Grund befinden, sollten auch dann als öffentlich zugänglich angesehen werden, wenn der Zugang auf eine bestimmte allgemeine Nutzergruppe, z. B. Kunden, beschränkt ist. Ladepunkte oder Zapfstellen im Rahmen von Car-Sharing-Systemen sollten nur dann als öffentlich zugänglich angesehen werden, wenn Dritten der Zugang ausdrücklich gestattet ist. Ladepunkte oder Zapfstellen auf privatem Grund, zu denen nur ein begrenzter, bestimmter Personenkreis Zugang hat, z. B. Parkplätze von Bürogebäuden, zu denen nur Beschäftigte oder befugte Personen Zugang haben, sollten nicht als öffentlich zugängliche Ladepunkte oder Zapfstellen betrachtet werden.“²¹

Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal ist also die Nutzergruppe bei nicht-öffentlichen Wasserstofftankstellen sowie gegebenenfalls die Art der Beaufsichtigung. Ausgehend davon ist anzunehmen, dass es sich bei den Nutzern an nicht-öffentlichen Wasserstofftankstellen um geschultes Personal handelt²².

Es ist wichtig, dass die nachfolgend aufgeführten Rechtsquellen, insbesondere die BetrSichV, auch für nicht-öffentliche Wasserstofftankstellen anzuwenden sind.

Produktsicherheit

Für die Bereitstellung von Produkten auf dem deutschen Markt ist das Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) anzuwenden. Daneben wurde für spezielle Produkte präzisierende Gesetzgebung geschaffen. Dazu zählt das Gesetz über überwachungsbedürftige Anlagen (ÜAnIG).

Laut der Definition des ÜAnIG sind überwachungsbedürftige Anlagen solche Anlagen,

- a) die gewerblichen oder wirtschaftlichen Zwecken dienen oder durch die Beschäftigte gefährdet werden können und

²⁰ 2023/1804/EU, 2023

²¹ Erwägungsgrund (11), 2023/1804/EU, 2023

²² Vgl. §7 GefStoffV, 2010

- b) von denen beim Betrieb erhebliche Risiken für die Sicherheit und die Gesundheit insbesondere Beschäftigter ausgehen können.²³

Arbeitsschutz

Neben diesem Anlagenbezug im ÜAnIG besteht durch das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) die unmittelbare Regulierung des Arbeitsschutzes in Deutschland für solche Anlagen. Dieses Gesetz ermächtigt den Gesetzgeber, weitere präzisierende Verordnungen zu erlassen.

Eine dieser Verordnungen ist die BetrSichV (aufgrund der § 18 und § 19 des Arbeitsschutzgesetzes erlassene Verordnung). Die BetrSichV wiederum regelt derzeit im Einzelnen, welche Anlagenarten den überwachungsbedürftigen Anlagen zuzurechnen sind und wann und wie Arbeitsmittel bei ihrer Verwendung bestimmten Prüfpflichten unterliegen.²⁴

Dazu zählen gemäß Anhang 2 Abschnitt 3 der BetrSichV auch „Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen“ (Ex-Anlagen). Ex-Anlagen sind zu verstehen als „Gesamtheit der explosionschutz-relevanten Arbeitsmittel“²⁵. Dazu gehören neben verfahrenstechnischen Anlagen auch erlaubnispflichtige Anlagen wie zum Beispiel Füllanlagen²⁶, Tankstellen oder Flugfeldbetankungsanlagen sowie Lageranlagen mit Tanks. Wasserstofftankstellen sind als Gasfüllanlage („Gasfüllanlage für Wasserstoff“) einzuordnen.²⁷ Das bedeutet, dass sie regelmäßig geprüft werden müssen.

Anlagengrenze

Die Festlegung von Anlagengrenzen wird durch den Gesetzgeber an den Anlagenbetreiber bzw. Arbeitgeber adressiert. Bei Druckanlagen werden Abgrenzungsmerkmale durch die TRBS 1201 Teil 2 gegeben.²⁸ Bewährt haben sich ingenieurtechnische Überlegungen, wonach es sich bei Anlagen um räumlich miteinander verbundene und sicherheitstechnisch unmittelbar im Zusammenhang stehende Anlagenteile, Geräte, Maschine und technische Einrichtungen, deren Verbindungselementen sowie zugehörigen sicherheitsrelevanten Ausrüstungs- und Gebäudeteilen handelt.

Zur Anlage zu zählen sind dabei auch sicherheitsrelevante MSR-Einrichtungen. Dies sind Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen an Arbeitsmitteln, die deren sicherer Verwendung dienen. Sie bestehen aus Sensor-, Aktor- und Logikeinheiten sowie zugehörigen Verbindungseinrichtungen inkl. Software.

Die physische Anlagengrenze zum Befüllgegenstand (hier: Kraftfahrzeug) stellt dabei die Zapfpistole der Tanksäule (Dispenser) dar. Betrachtet werden in diesem Bericht nur die Gasfüllanlagen-seitigen Aspekte bzw. Gefährdungssituationen.

²³ §2, Nr. 1, ÜAnIG, 2021

²⁴ Vgl. §2, Abs. 1 & 2, BetrSichV, 2015

²⁵ Anh.2, Abschnitt 3, Nr. 2, BetrSichV, 2015

²⁶ Vgl. Anh. 2, Abschnitt 4, Nr. 2.1 c), BetrSichV, 2015

²⁷ Vgl. §18, Abs. 1, BetrSichV, 2015

²⁸ Vgl. Nr. 2.1, TRBS 1201 Teil 2, 2018

Prüfpflichten nach BetrSichV

Die Pflichten zur Prüfung von Anlagen mit Explosionsgefährdungen werden durch die Regelungen der BetrSichV festgelegt.

Eine ZÜS prüft erlaubnispflichtige Anlagen (u.a. Gasfüllanlagen) erstmalig vor ihrer Inbetriebnahme und im laufenden Betrieb in regelmäßigen Abständen.

Geräte, Schutzsysteme, Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen im Sinne der harmonisierten Rechtsvorschriften in der EU (ATEX-Richtlinie) müssen mindestens alle drei Jahre geprüft werden. Spätestens alle sechs Jahre muss eine Anlage auf Explosionssicherheit geprüft werden. Für Lüftungs- und Gaswarnanlagen sowie sogenannte Inertisierungsanlagen sind jährliche Prüf Fristen vorgeschrieben.²⁹

Stand der Technik

Der Stand der Technik ist für überwachungsbedürftige Anlagen alleiniger Sicherheitsmaßstab und somit wird gegen diesen Maßstab der Prüfumfang und die Prüftiefe festgelegt.

Dieser Stand der Technik wird durch den Ausschuss für Betriebssicherheit ermittelt und durch das Bundesministerium für Arbeit und Soziales bekannt gemachten Regeln (Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) definiert.³⁰ Der Betreiber kann von der Vermutung ausgehen, dass bei Berücksichtigung dieser Regeln die Vorschriften der BetrSichV eingehalten werden.

Für Gasfüllanlagen ist dies die Technische Regel für Betriebssicherheit (TRBS) 3151 / TRGS 751 in der aktuellen Fassung vom 26. März 2024.

Wesentlich ist, dass die TRBS 3151 / TRGS 751 technische Anforderungen enthält, die allein auf die Beschaffenheit und Funktion der Gasfüllanlage (und hier exakt auch für Abgabeeinrichtungen) für sich abstellt.³¹ Die Interaktion mit dem Befüllgegenstand (hier: Kraftfahrzeug) wird anforderungsseitig nicht untersetzt (auch kein Verweis auf einschlägige Normen wie DIN EN 17127).

Vielmehr wird der Betreiber darauf hingewiesen, dass er im Rahmen seiner Gefährdungsbeurteilung nach §3 BetrSichV die bei der Verwendung der Abgabeeinrichtung vorhandenen Gefährdungen selbst zu ermitteln hat und entsprechende Schutzmaßnahmen festlegen muss. Die Ermittlung dieser Gefährdungen umfasst dann neben dem Normalbetrieb bei bestimmungsgemäßer Verwendung (z. B. der Betankungsvorgang), auch vorhersehbare Abweichungen vom Normalbetrieb (Betriebsstörungen).

Betriebsstörungen sind u. a.:

1. vernünftigerweise nicht auszuschließende Abweichungen vom Normalbetrieb, z. B. vorhersehbare Fehlbedienung,
2. das Versagen von sicherheitstechnisch bedeutsamen Mess-, Steuer- und Regelvorrichtungen,
3. das Rückströmen von Kraft- oder Betriebsstoffen bzw. deren Dämpfen,
4. Luft- oder Feuchtigkeitszutritt,
5. der Ausfall der Versorgung mit Energie, Roh- und Hilfsstoffen,

²⁹ Vgl. Anh. 2, Abschnitt 3, Nr.4 & 5, BetrSichV, 2015

³⁰ Vgl. §22, Abs. 5, BetrSichV, 2015

³¹ Vgl. TRBS 3151/TRGS 751, 2024

6. die unbeabsichtigte Freisetzung von Kraftstoffen aus Lagerbehältern, Rohrleitungen, Abgabeeinrichtungen,
7. Defekte an mit Kraftstoffen oder deren Dämpfen gefüllten Bauteilen, z. B. Tanks, Rohrleitungen, Zapfventile.³²

Ursächlich für Betriebsstörungen unter dem Anstrich „Versagen von sicherheitstechnisch bedeutsamen Mess-, Steuer- und Regelvorrichtungen“ sind schädigende Einflüsse auf das Arbeitsmittel „Dispenser“ als Teil der Gesamtanlage. Zu nennen sind verschiedene Einflussfaktoren.

Äußere Einflussfaktoren:

- Schwankungsbreite der Außentemperaturen
- Luftfeuchtigkeit
- Luftzusammensetzung/Luftverunreinigungen (z. B. Autoabgase)
- Ultraviolettes Licht
- noch nicht in Ereignis-/Mängelstatistiken erfasst: Cyberangriffe/Cybergefährdung

Innere Einflussfaktoren:

- elektrostatische Felder
- weitere - siehe dazu: DIN EN 62435-2 „Schädigungsmechanismen an elektronischen Bauteilen“

und zusätzliche Erfahrung als Prüfstelle:

- Umbau und Veränderungsmaßnahmen ohne erforderliche Prüfaktivitäten

Dies führt im Betrieb zu einer steigenden Ausfallwahrscheinlichkeit dieser Schutzvorrichtungen.

Gefahrstoffrecht

Aufgrund des Vorhandenseins von Gefahrstoffen i.S. des §2 Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) sowie Tätigkeiten die an Gasfüllanlagen betriebs- und nutzungsbedingt durchgeführt werden, sind auch Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten und anderer Personen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen durch Arbeitgeber festzulegen (§2 Abs.3 GefStoffV).

Die GefStoffV beschreibt alle Maßnahmen der Explosionssicherheit und ergänzt so die BetrSichV.

Ähnlich wie §3 BetrSichV ist nach §6 GefStoffV eine Gefährdungsbeurteilung zu erarbeiten die im Ergebnis technische und organisatorische Schutzmaßnahmen festlegt. Darüber hinaus bestehen nach §7 GefStoffV eine Reihe von Grundpflichten. Dazu gehört nach §7 Abs.7 GefStoffV:

„Der Arbeitgeber hat die Funktion und die Wirksamkeit der technischen Schutzmaßnahmen regelmäßig, mindestens jedoch jedes dritte Jahr, zu überprüfen. Das Ergebnis der Prüfungen ist aufzuzeichnen und vorzugsweise zusammen mit der Dokumentation nach § 6 Absatz 8 aufzubewahren.“

Die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, einschließlich deren Einstufung und Kennzeichnung, wieder.

³² Nr. 3.1, Abs. 3, TRBS 3151/TRGS 751, 2024

Für Tätigkeiten mit Gasen und zur Erarbeitung der Gefährdungsbeurteilung für Gasanlagen ist die TRGS 407 anzuwenden. Die TRGS 407 enthält dezidierte Vorgaben zur Art und Weise und zum Umfang der Gefährdungsermittlung.

Hierbei sind u.a. Gefährdungen durch Freisetzung von Gasen bei bestimmungsgemäßem Betrieb und, ähnlich wie in §3 BetrSichV, auch bei vernünftigerweise nicht auszuschließenden Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb zu bewerten.³³

Die Freisetzung von Gasen ist ein Gefährdungsfaktor, der zu einem erheblichen Schadensausmaß, z. B. durch Brand- und Explosionsereignisse und zu Verletzungsrisiken der tätigkeitsbedingt in unmittelbarer Nähe handelnden Personen führen kann.

Tabelle 6: Übersicht zu wiederkehrenden Prüferfordernissen von nicht-öffentlich Wasserstofftankstellen mit Bezug zur Explosionssicherheit bzw. technischer Schutzmaßnahmen

Prüfgegenstand	Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)			Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)
	Anhang 2 Abschnitt 3			
	Nummer 5.1	Nummer 5.2 ^a	Nummer 5.3 ^a	§7 Abs.7
Lüftungs-, Gaswarn- und Inertisierungseinrichtungen, sofern sie Maßnahmen des Explosionsschutzes darstellen	-	-	x	x
Geräte, Schutzsysteme, Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen im Sinne der Richtlinie 2014/34/EU und ihre Verbindungselemente	-	x	-	
Explosionssicherheit	x	-	-	-
Wirksamkeitsprüfung von technischen Schutzmaßnahmen	-	-	-	x ACHTUNG: Die betroffenen Prüfgegenstände können von denen durch die BetrSichV erfassten Nr.5.1 und Nr.5.2 abweichen.
Prüfumfang				
	TRBS 1201 Teil 1 Abschnitt 5.1 Prüfung der Explosionssicherheit	TRBS 1201 Teil 1 Abschnitt 5.2 Zustand und Funktion	TRBS 1201 Teil 1 Abschnitt 5.3 Zustand	LV 45 Leitlinien zur GefStoffV Punkt G 1.2 Funktion und Wirksamkeit
Prüffrist				
	6 Jahre	3 Jahre	1 Jahr	max. 3 Jahre

^a - Bei Verwendung eines Instandhaltungskonzeptes nach Anhang 2 Abschnitt 3 Nummer 5.4 BetrSichV kann die Prüfung entfallen.

³³ Vgl. Nr. 3.2.4, TRGS 407, 2016

Der Anhang A - Gefährdungsbeurteilung nach TRGS 407 für eine nicht-öffentliche Wasserstofftankstelle dieses Berichtes zeigt für eine modellhafte Wasserstofftankstelle in Verbindung mit einem betrachteten Betankungs-/Befüllvorgang potenzielle Gefährdungslagen im bestimmungsgemäßen Betrieb und für Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb auf.

Diese Abweichungen können - müssen aber nicht - zu Freisetzungen von Wasserstoff während des Betankungsvorganges führen.

Alle nach Anhang A - Gefährdungsbeurteilung nach TRGS 407 für eine nicht-öffentliche Wasserstofftankstelle ermittelten Gefährdungslagen wiederum sind Grundlage für die Herleitung der näher zu untersuchenden Szenarien mit und ohne vorhandenen individuellen Risiken nach Anhang B - Quantitative Risikoanalyse für eine Wasserstofftankstelle.

4 Ermittlung der Erfordernisse bei zyklischen Überprüfungen nach DIN EN 17127

4.1 Einführung

Im Nationalen Vorwort der Norm DIN EN 17127 heißt es:

„Dieses Dokument hat Betankungsanlagen für Wasserstoff zur Betankung von Landfahrzeugen zum Gegenstand und betrachtet auch die Betankungsprotokolle, die dafür sorgen sollen, dass nur Fahrzeuge betankt werden, die für den von der Betankungsanlage abgegebenen Wasserstoff einschließlich des Abgabedruckes geeignet sind. Grundlage der Erarbeitung ist die Internationale Norm ISO 19880-1 für Wasserstofftankstellen, allerdings berücksichtigt das vorliegende Dokument die rechtlichen europäischen Gegebenheiten.“³⁴

Dieses Dokument regelt Wasserstofftankstellen im Außenbereich, die gasförmigen Wasserstoff abgeben sowie deren Betankungsalgorithmen und -geräte.

Zwischenzeitlich wurde diese Norm durch die in Deutschland geltende „Verordnung über die technischen Standards für Wasserstofftankstellen für Kraftfahrzeuge (Wasserstofftankstellenverordnung - WTV)“ übergangsweise auch in einen rechtlich verbindlichen Status überführt (§§ 3 und 4).

In Folge wurde durch das Inkrafttreten der VERORDNUNG (EU) 2023/1804 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. September 2023 (AFIR-Verordnung) und deren Anhang II Nummer 3.1 und Nummer 3.3 diese Vorgabe übernommen.

Mit der Erstausgabe der einschlägigen Norm DIN EN 17127 im September 2019 wurde auch eine normative Vorgabe für die Durchführung von wiederkehrenden Inspektionen festgelegt (Abschnitt 7.1 der Norm).

Die Regelung hinsichtlich wiederkehrender Inspektionen lautet:

„Es müssen regelmäßig Inspektionen im Zusammenhang mit der Interoperabilität durchgeführt werden. Nach Modifikationen oder Instandhaltungsarbeiten, die sich auf die Interoperabilität der Wasserstofftankstelle, wie nach diesem Dokument bestimmt, auswirken können, müssen geeignete Inspektionen durchgeführt werden.“³⁵

Der Begriff „Inspektion“ wurde in der deutschen Fassung aus dem englischen Original der EN 17127 worttreu übersetzt („*periodical inspection*“³⁶). Dies ist insofern irreführend, als das in Deutschland die Einordnung einer betreiberseitigen „Inspektion“ - als Teil der Instandhaltung (siehe DIN EN 1306 bzw. DIN 31051) - nicht mit der unabhängigen Prüfung durch kompetente bzw. zugelassene Dritte (Wortlaut „Prüfung“) gleichzusetzen ist.

Die Prüfumfänge/-inhalte einer solchen wiederkehrenden Inspektion müssen sich zwangsläufig an die in dieser Norm genannten Inhalte richten (Abschnitte 6.1 und 6.2 der Norm).

Das bedeutet, dass das hier vorgeschlagene Prüfprozedere zum einen die Forderung der verbindlich anzuwendenden Norm DIN EN 17127 nach wiederkehrenden Kontrollen erfüllt und zum anderen dem

³⁴ Nationales Vorwort, DIN EN 17127:2019, 2019

³⁵ Nr. 7.1, DIN EN 17127:2019, 2019

³⁶ Nr. 6.1, EN 17127:2020, 2020

durch die CEP bevorzugten präqualifizierten Prüfverfahren mit einer zweistufigen unabhängigen Prüfkompetenz entspricht.

4.2 Auswertung von Ereignis-Statistik-Datenbanken

Da Betriebserfahrungen mit Wasserstofftankstellen in Deutschland seit nunmehr ca. 10 Jahren vorliegen und diese in Gefährdungsbeurteilungen sowie Risikobeurteilungen zu berücksichtigen sind, wurden einschlägige Ereignis-Datenbanken und Mängel-Statistiken analysiert.

Folgende Datenbanken* wurden herangezogen:

Tabelle 7: Zur Auswertung verwendete Datenbanken

Datenbank	Ersteller	Anmerkungen
HIAD 2.1 ³⁷ Hydrogen Accidents and Incidents Database	Joint Research Centre (JRC)	weltweite Ereignisdatensammlung
ZEMA ³⁸ Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen	Umweltbundesamt	nur Störfälle nach 12.BImSchV Anhang 6
Anlagensicherheitsreport ³⁹	TÜV-Verband	keine Ereignis-Datenbank sondern Mängelstatistik für überwachungsbedürftige Anlagen (inkl. Gasfüllanlagen)

* Weitere existente Datenbanken, wie z. B. die nordamerikanische „H2Tools“, wurden für diese Auswertung nicht betrachtet.

Als wesentliche Erkenntnisquelle für Ereignisse - im Sinne von Schadenseintritten mit Schäden oder Beinahe-Schäden für Leib und Leben sowie an Sachgütern - wurde die HIAD-Datenbank des EU Joint Research Centre (JRC), in der Fassung von 2023, herangezogen. Grund dafür ist, dass die beiden anderen Datenbanken nur eingeschränkt die Ereignisse an Wasserstofftankstellen, insbesondere detailliert das Versagen von Betankungsvorgängen, erfassen.

Die aktuelle Version der Datenbank erfasst 1.083 Ereignisse, die bis September 2023 in der Datenbank enthalten waren. Insgesamt 753 dieser Ereignisse wurden als statistisch relevant eingestuft und bildeten die Grundlage für die statistischen Analysen, um daraus Lehren zu ziehen und Empfehlungen abzuleiten.

³⁷ Vgl. European Commission, Joint Research Centre (JRC), 2023

³⁸ Vgl. Umweltbundesamt, 2024

³⁹ Vgl. TÜV-Verband e. V., 2023

Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich in die folgenden vier Hauptkategorien einteilen:

- Entwurf des Systems
- Herstellung, Installation und Änderung von Systemen
- menschliche Faktoren
- Notfallmaßnahmen

In der aktuellen Version lassen sich direkt 13 Ereignisse den Betankungsprozessen an Wasserstofftankstellen zuordnen.

Beispiel:

Event-ID: 463

Event-Title: Release at a dispenser of a HRS / Freigabe an einem Dispenser eines HRS

Event full description:

Geringfügiges Leck in der Abreißkupplung der 35MPa-Zapfsäule einer Bustankstelle.

Das Leck entstand in der Abreißkupplung während einer kontrollierten Testbetankung.

Der Test wurde von den Mitarbeitern des Tankstellenbetreibers begleitet. Das Leck trat auf, als die Temperatur sank (der Wasserstoff wird vor dem Eintritt in die Zapfsäule auf -33°C bis -40°C vorgekühlt). Die Zapfsäule wurde außer Betrieb genommen, bis der Hersteller eine neue Abreißkupplung eingebaut hatte. Die 70-MPa-Zapfsäule blieb in Betrieb. Das Zapfsäulensystem war während der Installations-/Inbetriebnahmephase auf Dichtheit geprüft worden, allerdings nur bei Umgebungstemperatur. Es wird angenommen, dass das Leck nur bei niedrigen Temperaturen auftrat.

Causes: Material/ manufacturing error, Job factors and Management factors

Die ZEMA-Datenbank des Umweltbundesamtes erfasst bislang 16 nach Störfallverordnung meldepflichtige Ereignisse im Zusammenhang mit Wasserstoff seit 1993. Alle diese Ereignisse haben keinen Bezug zu Wasserstofftankstellen.

Neben solchen Ereignissen, bei denen Beschäftigte und Dritte zu Schaden oder beinahe zu Schaden gekommen sind, sind auch Mängelsituationen (noch kein personenbezogener/sächlicher Schaden entstanden) für die Bewertung der Sicherheit einschlägig.

Im vom TÜV-Verband geführten „Anlagensicherheitsreport“ (ASR) der Zugelassenen Überwachungsstellen (ZÜS) haben Sachverständige der ZÜS im Jahr 2022 insgesamt 12.260 Ex-Anlagen und deren Anlagenteile vor Inbetriebnahme und wiederkehrend geprüft: 3.530 Tankstellen, 861 Gasfüllanlagen, 962 Lageranlagen, 221 Füll- und Entleerungsstellen sowie 6.686 sonstige Ex-Anlagen.

Bei den Gasfüllanlagen war mit 57,7 Prozent deutlich mehr als die Hälfte der geprüften Anlagen ohne Mängel. Etwa ein Drittel dieser Anlagen (29,6 %) wurde von den Sachverständigen der Mängelkategorie „geringfügig“ zugeordnet. 12,6 Prozent der Gasfüllanlagen wurden in die Kategorie der „erheblichen Mängel“ eingestuft und 0,1 Prozent gelten als gefährlich.⁴⁰

⁴⁰ Vgl. Kapitel 2, TÜV-Verband e.V., 2022

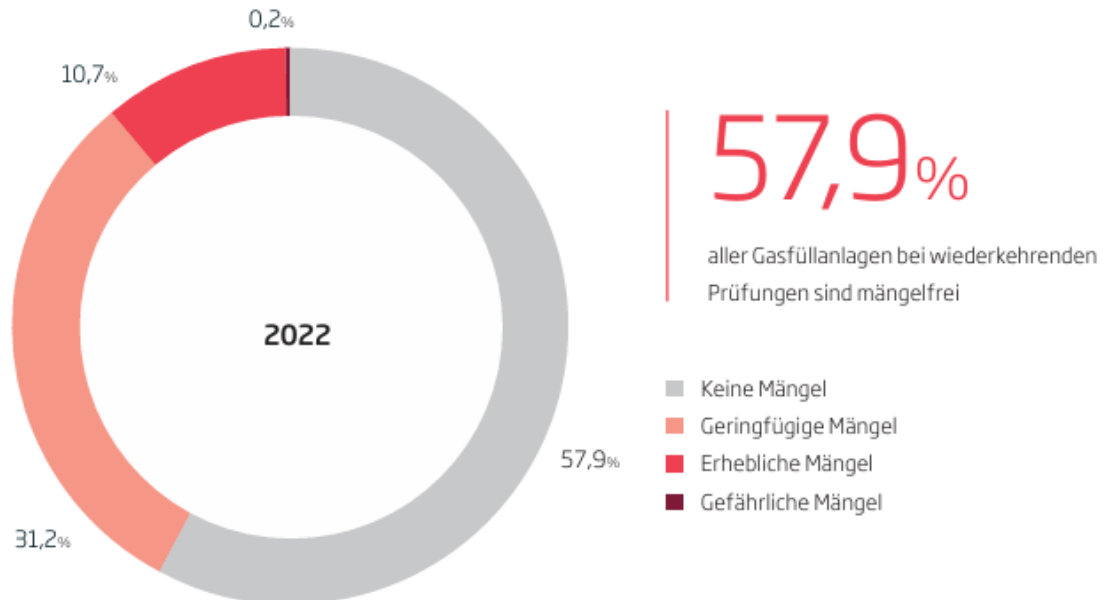


Abbildung 15: Festgestellte Mängel bei wiederkehrenden Prüfungen an Gasfüllanlagen in 2022⁴¹

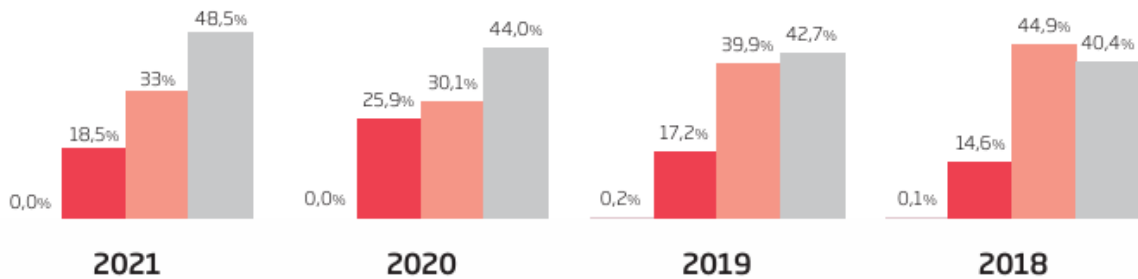


Abbildung 16: Festgestellte Mängel bei wiederkehrenden Prüfungen an Gasfüllanlagen seit 2018⁴²

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein Mangel- und Ereignisgeschehen an HRS vorliegt, dieses aber nicht mehr oder weniger stark ausgeprägt ist, als an anderen Anlagen.

4.3 Analyse von Prüfberichten

Zur Auswertung wurde auf Prüfbescheinigungen, -aufzeichnungen- und -berichte vom TÜV Rheinland Industrie Service GmbH zurückgegriffen, die im Rahmen von Prüfungen vor Inbetriebnahme und wiederkehrend an HRS-Tankstellen erstellt wurden. Die Auswertung sollte in mehreren Abschnitten erfolgen, da die zur Verfügung gestellte Datenmenge über die geprüften Anlagen umfangreich ist und eine strukturierte Abarbeitung im Vordergrund stand.

⁴¹ S.49, TÜV-Verband e. V., 2023

⁴² S.49, TÜV-Verband e. V., 2023

Aus diesem Grund wurden zunächst vier Anlagen identifiziert, bei denen die Auswertung durchgeführt werden sollte. Die erste Auswahl der Berichte erfolgte unter verschiedenen Gesichtspunkt. Die Kriterien zur Auswahl der Berichte waren:

- Anlagen Hersteller
- verschiedene Betreiber/Arbeitgeber
- wechselnde Prüfer vom TÜV Rheinland
- Standorte
- Art der Prüfung
- Umfänge der Prüfungen

Unter diesen Kriterien wurden die vier Anlagen ausgewählt und anschließend ausgewertet:

Aus Gründen des Datenschutzes werden diese Anlagen nur als Anlage 1 bis 4 benannt

Anlagenbezogene Betrachtung mit Hilfe von Prüfberichten

Bei der Anlage 1 wurden Prüfungen vor Inbetriebnahme im Gefahrenfeld Druck und Explosion durchgeführt. Zusätzlich erfolgte die Prüfung nach DIN EN 17127 als Abnahme der installierten Anlage (SAT). Zusätzlich erfolgte die Prüfung gemäß DIN EN 17127 als Abnahme der installierten Anlage (SAT). Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts war die Prüfung nach der Betriebssicherheitsverordnung noch nicht vollständig abgeschlossen; eine Rücksprache mit den verantwortlichen Prüfern ergab jedoch, dass sowohl bei diesen Prüfungen als auch bei der Prüfung des SAT keine Mängel festgestellt wurden. Die einzelnen Prüfungen und deren Mangelstatus sind in der nachfolgenden Tabelle einsehbar.^{43, 44, 45, 46}

Tabelle 8: Übersicht der Prüfungen am Standort Anlage 1

Anlage 1		
Art der Prüfung	Prüfgrundlage	Mängelstatus
Füllanlage	§ 15, Anhang 2 Abs. 4 Punkt 2.1	Nicht abgeschlossen
Inbetriebnahmeprüfung Explosionssicherheit	§ 15, Anhang 2 Abs. 3 Punkt 4.1 BetrSichV	Nicht abgeschlossen
Inbetriebnahmeprüfung Explosionsschutz Geräte	§ 15, Anhang 2 Abs. 3 Punkt 4.1 Satz 7 BetrSichV	Nicht abgeschlossen
Inbetriebnahmeprüfung MSR-Einrichtung	§ 15, BetrSichV § 7 Abs. 7 GefStoffV	Nicht abgeschlossen
Validierung der FAT-Tests	DIN EN 17127 ISO 19880-1	Nicht abgeschlossen
Validierung der SAT-Tests	DIN EN 17127 ISO 19880-1	Nicht relevant

⁴³ Vgl. Prüfbescheinigung Explosionssicherheit – EQ 4318053, 11.2023

⁴⁴ Vgl. Prüfbescheinigung sekundärer Explosionsschutz – EQ 4577835, 11.2023

⁴⁵ Vgl. Plausibilitätsprüfung nach DIN EN 17127 - Validierung der FAT-Tests – EQ 4597374, 12.2023

⁴⁶ Vgl. Plausibilitätsprüfung nach DIN EN 17127 - Validierung der SAT-Tests – EQ 4597377, 12.2023

An der HRS der Anlage 2 fand eine Inbetriebnahmeprüfung statt, nachdem die bestehende Anlage demontiert und eine neue Anlage am gleichen Standort errichtet wurde. Auch bei dieser Anlage wurden die relevanten Gefahrenfelder Druck und Explosion betrachtet. Im Zuge dessen erfolgte zudem die Überprüfung der sicherheitsrelevanten MSR-Einrichtung gemäß TRGS 1115. Darüber hinaus wurde ein Site Acceptance Test (SAT) entsprechend der DIN EN 17127 durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Auswertung waren alle Prüfungen abgeschlossen und ließen sich vollumfänglich analysieren. Die Ergebnisse, einschließlich des Mangelstatus der einzelnen Prüfungen, sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.⁴⁷
 , 48, 49, 50, 51

Tabelle 9: Übersicht der Prüfungen am Standort Anlage 2

Anlage 2		
Art der Prüfung	Prüfgrundlage	Mängelstatus
Füllanlage	§ 15, Anhang 2 Abs. 4 Punkt 2.1	Geringfügige Mängel
Inbetriebnahmeprüfung Explosionssicherheit	§ 15, Anhang 2 Abs. 3 Punkt 4.1 BetrSichV	Geringfügige Mängel
Inbetriebnahmeprüfung Explosionsschutz Geräte	§ 15, Anhang 2 Abs. 3 Punkt 4.1 Satz 7 BetrSichV	Geringfügige Mängel
Inbetriebnahmeprüfung MSR-Einrichtung	§ 15, BetrSichV § 7 Abs. 7 GefStoffV	Keine Mängel
Validierung der FAT-Tests	DIN EN 17127 ISO 19880-1	Keine Mängel
Validierung der SAT-Tests	DIN EN 17127 ISO 19880-1	Nicht relevant

Bei den festgestellten Mängeln der Füllanlage handelt es sich um anlagenspezifische Dokumente, welche keine Projektrelevanz haben. Die im Rahmen der Prüfung der Explosionssicherheit festgestellten Mängel sind ebenfalls Dokumentationsmängel, die für dieses Projekt nicht relevant sind.

Nachfolgend wird die Anlage 3 mit den dazugehörigen Prüfungen nach Betriebssicherheitsverordnung und den Betankungsprotokollen nach DIN EN 17127 betrachtet. Die Prüfberichte waren zum Zeitpunkt der Auswertung fertiggestellt und standen zur Verfügung. Die nachfolgende Tabelle zeigt die durchgeführten Prüfungen und ihre Mängel. An dieser Anlage wurden die Gefahrenfelder Druck und Explosion sowie die dazugehörige MSR-Einrichtung betrachtet. Eine Prüfung nach DIN EN 17127 des SAT oder des FAT hatte zum Zeitpunkt der Prüfung noch nicht stattgefunden.^{52, 53, 54, 55}

⁴⁷ Vgl. Bescheinigung über die Prüfung einer Füllanlage – EQ 4552595, 05.2023

⁴⁸ Vgl. Prüfbescheinigung Explosionssicherheit – EQ 4552618, 05.2023

⁴⁹ Vgl. Prüfbescheinigung sekundärer Explosionsschutz – EQ 4552619, 05.2023

⁵⁰ Vgl. Bericht über die Prüfung von sicherheitsrelevanten Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen – EQ 4552621, 05.2023

⁵¹ Vgl. Plausibilitätsprüfung nach DIN EN 17127 - Validierung der SAT-Tests – EQ 4599479, 11.2023

⁵² Vgl. Bescheinigung über die Prüfung einer Füllanlage – EQ 4617664, 11.2023

⁵³ Vgl. Prüfbescheinigung Explosionssicherheit – EQ 2961865, 11.2023

⁵⁴ Vgl. Prüfbescheinigung sekundärer Explosionsschutz – EQ 4617709, 11.2023

⁵⁵ Vgl. Bericht über die Prüfung von sicherheitsrelevanten Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen – EQ 4617710, 11.2023

Tabelle 10: Übersicht der Prüfungen am Standort Anlage 3

Anlage 3		
Art der Prüfung	Prüfgrundlage	Mängelstatus
Füllanlage	§ 15, Anhang 2 Abs. 4 Punkt 2.1	Keine Mängel
Inbetriebnahmeprüfung Explosionssicherheit	§ 15, Anhang 2 Abs. 3 Punkt 4.1 BetrSichV	Keine Mängel
Inbetriebnahmeprüfung Explosionsschutz Geräte	§ 15, Anhang 2 Abs. 3 Punkt 4.1 Satz 7 BetrSichV	Keine Mängel
Inbetriebnahmeprüfung MSR-Einrichtung	§ 15, BetrSichV § 7 Abs. 7 GefStoffV	Keine Mängel
Validierung der FAT-Tests	DIN EN 17127 ISO 19880-1	-
Validierung der SAT-Tests	DIN EN 17127 ISO 19880-1	-

Im Rahmen des ersten Durchganges zur Auswertung der vorhandenen Prüfberichte für HRS -Anlagen wurde der Standort der Anlage 4 gewählt. Wie auch bei den vorherigen Anlagen wurde das Gefahrenfeld Druck und Explosion mit der dazugehörigen sicherheitsrelevanten MSR-Einrichtung betrachtet. Auch die Prüfung und Validierung der Prüfergebnisse im Rahmen der Prüfung nach DIN EN 17127 FAT und SAT wurden durchgeführt. Der SAT und der FAT waren zur Auswertung noch nicht vollständig abgeschlossen, da die bereitgestellten Daten unplausibel waren. Aus diesem Grund mussten einzelne Test wiederholt werden. Nach Rücksprache mit dem Prüfer wurden bei den ordnungsgemäß durchgeführten und dokumentierten Prüfungen keine Mängel festgestellt.^{56, 57, 58, 59, 60, 61}

Tabelle 11: Übersicht der Prüfungen am Standort Anlage 4

Anlage 4		
Art der Prüfung	Prüfgrundlage	Mängelstatus
Füllanlage	§ 15, Anhang 2 Abs. 4 Punkt 2.1	Keine Mängel
Wiederkehrende Prüfung Explosionssicherheit	§ 15, Anhang 2 Abs. 3 Punkt 4.1 BetrSichV	Keine Mängel
Wiederkehrende Prüfung Explosionsschutz Geräte	§ 15, Anhang 2 Abs. 3 Punkt 4.1 Satz 7 BetrSichV	Keine Mängel
Wiederkehrende Prüfung MSREinrichtung	§ 15, BetrSichV § 7 Abs. 7 GefStoffV	Keine Mängel
Validierung der FAT-Tests	DIN EN 17127 ISO 19880-1	Nicht abgeschlossen

⁵⁶ Vgl. Bescheinigung über die Prüfung einer Füllanlage – EQ 4143989, 07.2022

⁵⁷ Vgl. Prüfbescheinigung Explosionssicherheit – EQ 4437481, 07.2022

⁵⁸ Vgl. Prüfbescheinigung sekundärer Explosionsschutz – EQ 4437480, 07.2022

⁵⁹ Vgl. Bericht über die Prüfung von sicherheitsrelevanten Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen – EQ 4437482, 07.2022

⁶⁰ Vgl. Plausibilitätsprüfung nach DIN EN 17127 - Validierung der FAT-Tests – EQ 4599476, 11.2023

⁶¹ Vgl. Plausibilitätsprüfung nach DIN EN 17127 - Validierung der SAT-Tests – EQ 4599478, 01.2024

Validierung der SAT-Tests	DIN EN 17127 ISO 19880-1	Nicht abgeschlossen
---------------------------	-----------------------------	---------------------

Zwischenfazit:

Nachdem nun beispielhaft vier Anlagen betrachtet und ausgewertet wurden, wird zunächst angenommen, dass es vorerst nicht notwendig ist, weitere Anlagen zu betrachten. Grund für die Annahme ist, dass bei den betrachteten Anlagen keine Mängel in den Bereichen Sensorik, Logik oder Aktorik dokumentiert wurden. Speziell wurden auch keine Mängel dokumentiert, die bei den Betankungsprotokollen aufgetreten sind. Weiterhin kann aus Erfahrung gesagt werden, dass Mängel, die für dieses Projekt relevant wären, nicht in den Prüfberichten auftauchen, da diese bereits vor der Prüfung durch die Wartungsfirmen oder den Betreiber behoben werden.

Um dennoch projektrelevante Daten zu erhalten, wurde ein Fragenkatalog, zu den Themenschwerpunkten zu Sensorik, Logik und Aktorik erarbeitet. Dieser wurde im Anschluss von Herstellern, Betreibern und Wartungsfirmen von HRS-Anlagen beantwortet. Nachfolgend werden die einzelnen Antworten der Personengruppen ausgewertet und die Erkenntnisse abgebildet.

Auswertung und Betrachtung der Interviewdaten / Fragenkataloge

Auswertung der Befragung bei Herstellern von HRS-Anlagen

Die Befragung der Hersteller hat ergeben, dass es aus diversen Gründen zum Abbruch der Betankungsvorgänge kommen kann. Am häufigsten wurde hierbei das technische Versagen einzelner Komponenten genannt. Weiterhin ist erkennbar, dass es mehrfach zu Unterbrechungen der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Dispenser kommt. Dies führt zwar nicht zum Abbruch des Tankvorganges, aber zur Reduzierung der Betankungsgeschwindigkeit sowie des Füllgrades. Diese Einschränkung wird vom Nutzer und in Bezug auf die Leistung der Anlage als negativ bewertet.⁶²

Auswertung der Befragung bei Betreibern von HRS-Anlagen

Die Befragung der Betreiber ergab Erkenntnisse, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes berücksichtigt werden sollten. Leider gab es zu Ausfallraten, Betankungsabbrüchen oder auch Problemen an der Anlage wenig Auskunft. Aus diesem Grund kann hier nicht weiter auf Erkenntnisse aus den Interviews eingegangen werden.^{63, 64}

Auswertung der Befragung bei Wartungsfirmen von HRS-Anlagen

Aussagekräftiger sind die Interviewdaten der Wartungsfirmen. Es ist deutlich erkennbar, dass die Anlagen nicht ohne Ausfälle der Sensorik, Logik und Aktorik oder anderweitige Störungen betrieben werden können. Diese Erkenntnisse lassen auf eine teilweise ungenügende Performance der Anlagen schließen.

⁶² Vgl. Fragenkatalog - Hersteller – Linde Hydrogen FuelTech GmbH, 2024

⁶³ Vgl. Fragenkatalog - Betreiber – H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG – 21.03.2024, 2024

⁶⁴ Vgl. Fragenkatalog - Betreiber – APEX Energy Teterow GmbH, 2024

Auch die Abbrüche der Kommunikation während der Betankung, wurden durch die Wartungsfirmen bestätigt.⁶⁵

Neben den Herstellern, Betreibern und Wartungsfirmen wurden auch die Erfahrungen der Prüfer aufgenommen und ausgewertet. Hauptaussage war auch hier, dass sich Abnehmer bzw. Kunden beschwerten, die Betankung werde teilweise nicht bis zum Ende durchgeführt, sondern der Tankvorgang breche vorzeitig ab, wodurch eine vollständige Füllung des Fahrzeuges nicht möglich sei.

4.4 Ermittlung des Prüfindervalls/-zyklus

Arbeitsmittel müssen während ihrer gesamten Lebensdauer sicher sein. Deshalb müssen sie instandgehalten und falls notwendig, repariert werden. Regelmäßig wiederkehrende Prüfungen sollen sicheres Funktionieren gewährleisten und das frühzeitige Erkennen von Schäden ermöglichen.

Bei der Festlegung von Prüfungsintervallen sind die folgenden Faktoren zu berücksichtigen:

- rechtliche Bestimmungen für das Arbeitsmittel oder Anlagenteil
- Gefahren, die mit dem Einsatz des Arbeitsmittels verbunden sind
- Betriebs- bzw. Arbeitsplatzbedingungen
- vorgesehene Nutzung und Bereiche der Betriebsparameter
- Anweisungen des Herstellers oder Lieferanten
- Herstellungsqualität des Arbeitsmittels/Anlagenteils
- Betriebserfahrung und Ergebnisse aus vorangegangenen Prüfungen.

Neue und bereits in Betrieb befindliche Anlagen erfüllen, wie oben beschrieben, die Anforderungen des ProdSG. Der Hersteller hat die Anlagen bzw. Anlagenteile so in Verkehr gebracht, dass ein sicherer Betrieb möglich ist. Entsprechende Schutzmaßnahmen wurden umgesetzt.

Durch den Betrieb kann sich jedoch der Anlagenzustand ändern, so dass getroffene Schutzmaßnahmen in ihrer Wirksamkeit reduziert werden. Dadurch können erhebliche Risiken für Beschäftigte entstehen. Weiterhin kann sich die Leistungsfähigkeit der Anlagen, z. B. hinsichtlich Betankungsdauer oder auch erreichbare Füllstände, negativ ändern.

Nachfolgend wird untersucht, ob und gegebenenfalls welche Prüfaufgaben und -intervalle an technisch ähnlichen Anlagen wie HRS bestehen.

Weiterhin wird aus der Sicht der allgemeinen Schutzziele aufgezeigt, wie die Festlegung von Prüfintervallen an PLT-Anlagen mit Sicherheitsfunktion in verschiedenen Rechtsbereichen bzw. Branchen in Deutschland geregelt ist.

⁶⁵ Vgl. Fragenkatalog - Wartungsfirma – KR-Technik, 2024

4.4.1 Prüfindteralle verwendungszweckähnlicher Anlagen

Neben der Betankung mit Druckwasserstoff an Wasserstofftankstellen existieren am Markt aktuell weitere Gasfüllanlagen-Typen:

- Tankstellen für Flüssigwasserstoff (LH₂)
- Tankstellen für Liquid-Pressure-Gas (Flüssiggas - LPG)
- Tankstellen für Compressed-Natural-Gas (CNG)
- Tankstellen für Liquid-Natural-Gas (LNG)

Für die folgenden Anlagen existieren spezielle normative Regelungen:

- Tankstellen für verflüssigtes Erdgas (LNG-Tankstellen) nach DIN EN ISO 16924 und
- CNG-Tankstellen nach DIN EN ISO 16923.

Zusätzlich zu diesen normativen Vorgaben gibt es in Deutschland folgende Arbeitsblätter, herausgegeben vom Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW):

- DVGW-G 712 CNG-Füllanlagen; Betrieb und Instandhaltung
- DVGW-G 721 LNG-Füllanlagen; Planung, Bau, Prüfung und Inbetriebnahme

Der Begriff „Betankungsprotokoll“ wird im Anwendungsbereich dieser Anlagen nicht verwendet. Die nachfolgende Tabelle enthält die aufgeführten Vorgaben für wiederkehrende Prüfungen bzw. Inspektionen.

Tabelle 12: Analyse bestehender normativer Prüfintervalle an technisch ähnlichen Anlagen

Anlage	Norm/Standard	Prüfumfang wiederkehrende Inspektion	Prüfintervall
LNG-Tankstelle	DIN EN ISO 16924	Kapitel 20.1.1.6: - Sicherheitseinrichtungen gegen Überdruck; - Sicherheitseinrichtungen; - Messgeräte und - Steuereinrichtungen	Kapitel 20.1.1.5: max. 3 Jahre für Zusatzeinrichtungen von LNG-Behältern
	DVGW-G 721	Verweis auf DVGW-G 722; G 722 liegt noch nicht vor	k.A.
CNG-Tankstelle	DIN EN ISO 16923	Anhang E „Zapfsäule“	alle 6 Monate
	DVGW-G 712	Verweis auf §§15, 16 BetrSichV sowie TRBS 3151; Für Anlagen unter dem EnWG: Verweis auf zusätzliche Prüferfordernisse in Kapitel 5.2.2.2 und 5.2.4	siehe BetrSichV Für Anlagen unter dem EnWG: Verweis auf zusätzliche Prüferfordernisse in Kapitel 5.2.3.2 Ohne Angaben von Prüfintervallen

4.4.2 Prüfintervalle von technischen Anlagen mit analogen Schutzziele

Neben den verwendungszweckähnlichen Anlagen gibt es zahlreiche Anlagen bzw. Arbeitsmittel, die ebenfalls Überwachungsfunktionen übernehmen und für die Sicherstellung der Erreichung erforderlicher Schutzziele einer wiederkehrenden Prüfpflicht unterliegen. Solche Anlagen finden sich bspw. im Baurecht im Kontext des abwehrenden oder anlagenbezogenen Brandschutzes.

Auch im Bereich der elektrischen Sicherheit werden Vorgaben durch die gesetzlichen Unfallversicherer für spezielle Belastungs- oder Beanspruchungssituationen an elektrischen Betriebsmitteln hinsichtlich erforderlicher wiederkehrender Prüfungen getroffen. Eine Übersicht in Tabelle 13, Tabelle 14 und Tabelle 15 auf den folgenden Seiten zeigt diese in der Praxis erprobten Prüfintervalle je Anlagenart auf.

Tabelle 13: Übersicht über erforderliche Prüfintervalle verschiedener technischer Anlagen mit Überwachungsfunktionen - Teil A

Nr.	Prüfaspekt	Sicherheitstechnische Anforderungen zur Betriebssicherheit (Auszug)	Prüfzyklus Überprüfung der Anforderung	Berücksichtigung im überprüften Regelwerk	Bewertung Relevanz für wk. Betankungsprotokoll-Überprüfung
A	Überprüfte technische Vorschrift: VDE-0105-100 i.V.m. DIN VDE 0105-100/A1 sowie DIN VDE 0105-100/A1 Berichtigung 1 Abschnitt 5.3 und VDE 0700er Gruppe				
1	Elektrische Gefährdung	<i>Bspw.:</i> Potentialausgleich Gebäude innerer Blitzschutz äußerer Blitzschutz Not-Aus-Systeme Isolation und Verdrahtung Störlichtbogen / Kurzschluss Abschaltung/Trennung	<input checked="" type="checkbox"/> flexibel <i>z. B. nach GBU des Betreibers oder Herstellervorgaben</i> <input type="checkbox"/> fester Zyklus: <input type="checkbox"/> nicht erforderlich <input type="checkbox"/> keine Aussage	<input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Besichtigen <input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Erproben <input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Messen <input type="checkbox"/> Prüfaspekt nicht enthalten	<input type="checkbox"/> relevant <input checked="" type="checkbox"/> nicht relevant
2	Brandgefährdung	<i>Bspw.:</i> Trennung von Anlagenteilen (z. B. Brandschutzabstände, Zustand von Brandschutzwänden)	ACHTUNG: Berufenossenschaftliche Vorgabe (DGUV V3/V4) ist: <i>„Die Fristen sind so zu bemessen, dass entstehende Mängel, mit denen gerechnet werden muss, rechtzeitig festgestellt werden.“</i> Praxis: Zyklus 12-48 Monate z. B. Elektroladestationen DC/AC	<input type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Besichtigen <input type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Erproben <input type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Messen <input type="checkbox"/> Prüfaspekt nicht enthalten	<input type="checkbox"/> relevant <input checked="" type="checkbox"/> nicht relevant
3	Bautechnische Gefährdung	<i>Bspw.:</i> Statik/Standsicherheit der baulichen/techn. Anlagen; Schutz gegen äußere Gefährdungen; Betriebsumgebung	Sachversicherer (VdS 3602): 12-24 Monate	<input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Besichtigen <input type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Erproben <input type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Messen <input checked="" type="checkbox"/> Prüfaspekte z.T. auch nicht enthalten	<input type="checkbox"/> relevant <input checked="" type="checkbox"/> nicht relevant
4	Funktionale Sicherheit Cybersicherheit	<i>Bspw.:</i> Beschaffenheit und Funktion sicherheitsrelevanter PLT-Sicherheits- und Schadensbegrenzungseinrichtungen; Abschaltkriterien bzw. Funktionssicherheitsprüfung	Sachversicherer (VdS 3602): 12-24 Monate	<input type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Besichtigen* <input type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Erproben <input type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Messen* <input checked="" type="checkbox"/> Prüfaspekt nicht enthalten	<input checked="" type="checkbox"/> relevant <input type="checkbox"/> nicht relevant

Tabelle 14: Übersicht über erforderliche Prüfintervalle verschiedener technischer Anlagen mit Überwachungsfunktionen - Teil B

Nr.	Prüfaspekt	Sicherheitstechnische Anforderungen zur Betriebssicherheit (Auszug)	Prüfintervall Überprüfung der Anforderung	Berücksichtigung im überprüften Regelwerk	Bewertung Relevanz für wiederkehrende Betankungsprotokoll-Überprüfung (Aspekt aus DIN EN 17127)
B	Überprüfte technische Vorschrift: VDI/VDE 2180 Blatt 2 „Funktionale Sicherheit in der Prozessindustrie - Planung, Errichtung und Betrieb von PLT-Sicherheitsfunktionen*“ Abschnitte 7.12 und 9.1				
1	Funktionale Sicherheit <i>Prüfung der Sensorik Prüfung der Aktorik</i>	Bei der wiederkehrenden Prüfung ist eine hohe Prüftiefe (proof test coverage, PTC) anzustreben und durch entsprechende Maßnahmen sicherzustellen. Die erforderliche Prüftiefe ist bereits bei der Planung der Instandhaltungsmaßnahmen in Verbindung mit dem Prüfintervall zu definieren. Insbesondere muss zur Inbetriebnahme eine Prüfanweisung vorliegen.	<input checked="" type="checkbox"/> flexibel <i>nach Prüfanweisung</i> <i>Der Prüfzyklus wird im Rahmen der Auslegung der PLT-Sicherheitseinrichtung festgelegt. Es müssen dabei betriebliche Anforderungen (z. B. geplante Anlagenstillstände) und der entsprechende SIL berücksichtigt werden. Gegebenenfalls sind flexible Prüfzyklen mit Teilprüfungen vorzusehen (siehe Blatt 3).</i> <input checked="" type="checkbox"/> fester Zyklus: i.d.R. 12 Monate <input type="checkbox"/> nicht erforderlich <input type="checkbox"/> keine Aussage	<input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Besichtigen <input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Erproben <input type="checkbox"/> Prüfaspekt nicht enthalten	<input checked="" type="checkbox"/> relevant <input type="checkbox"/> nicht relevant

Tabelle 15: Übersicht über erforderliche Prüfintervalle verschiedener technischer Anlagen mit Überwachungsfunktionen - Teil C

Nr.	Anlagenart	Technische Vorschrift	Prüfzyklus Überprüfung der Anforderung	Berücksichtigung im überprüften Regelwerk	Bewertung hinsichtlich der Analogie zur Sicherheitsfunktion
C	Anlagenarten in Garagen und zugehörige Prüffristen für MSR-Funktionen				
1	automatische Brandmeldeanlagen / Garagen	TAnIVO	<input type="checkbox"/> flexibel <i>nach GBU des Betreibers</i> <input checked="" type="checkbox"/> fester Zyklus: 36 Monate <input type="checkbox"/> nicht erforderlich <input type="checkbox"/> keine Aussage	<input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Besichtigen <input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Erproben <input type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Messen <input type="checkbox"/> Prüfaspekt nicht enthalten	<input checked="" type="checkbox"/> relevant <input type="checkbox"/> nicht relevant
2	CO-Warnanlage	AnIPrüfVO	<input type="checkbox"/> flexibel <i>nach GBU des Betreibers</i> <input checked="" type="checkbox"/> fester Zyklus: 36 Monate <input type="checkbox"/> nicht erforderlich <input type="checkbox"/> keine Aussage	<input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Besichtigen <input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Erproben <input type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Messen <input type="checkbox"/> Prüfaspekt nicht enthalten	<input checked="" type="checkbox"/> relevant <input type="checkbox"/> nicht relevant
3	ortsfeste selbsttätige Feuerlöschanlagen	TAnIVO	<input type="checkbox"/> flexibel <i>nach GBU des Betreibers</i> <input checked="" type="checkbox"/> fester Zyklus: 36 Monate <input type="checkbox"/> nicht erforderlich <input type="checkbox"/> keine Aussage	<input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Besichtigen <input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Erproben <input type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Messen <input type="checkbox"/> Prüfaspekt nicht enthalten	<input checked="" type="checkbox"/> relevant <input type="checkbox"/> nicht relevant
4	Rauchabzugsanlagen / Mittel- und Großgaragen	BauPrüfVO	<input type="checkbox"/> flexibel <i>nach GBU des Betreibers</i> <input checked="" type="checkbox"/> fester Zyklus: 36 Monate <input type="checkbox"/> nicht erforderlich <input type="checkbox"/> keine Aussage	<input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Besichtigen <input checked="" type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Erproben <input type="checkbox"/> wiederkehrende Prüfung durch Messen <input type="checkbox"/> Prüfaspekt nicht enthalten	<input checked="" type="checkbox"/> relevant <input type="checkbox"/> nicht relevant

4.4.3 Prüfindervall auf Basis einer Risikoanalyse mittels Fehlerbaummethode

Technische Systeme in sicherheitskritischen Bereichen, wie Betankungseinrichtungen an Wasserstofftankstellen, enthalten neben mechanischen und elektrischen Komponenten auch Mikrokontroller und Software.

Solche hybriden technischen Systeme benötigen formal vollständige bzw. stochastisch abgesicherte Aussagen über ihre Systemeigenschaften, die üblicherweise jedoch nur den Systemherstellern selbst vorliegen.

Um das Zuverlässigkeitsverhalten des hier betrachteten Betankungssystems zu modellieren und daraus Hinweise auf erforderliche Prüfindervalle zu erhalten, wurde eine methodische Sicherheitsanalyse durchgeführt (vgl. Anhang B - Quantitative Risikoanalyse für eine Wasserstofftankstelle).

Dabei wurde die Methode der anlagenbezogenen Fehlerbaumzustandsanalyse („Fault Tree Analysis - FTA“) genutzt. Diese Methode ist sowohl qualitativ (Fehlerbaumdarstellung) als auch quantitativ (rechnerische Ermittlung der System-Nichtverfügbarkeit durch Strukturfunktionen) in ihrer Vorgehensweise etabliert und bewährt (DIN EN 31010).

Das Ziel einer FTA ist es, systematisch die Ursachen für einen bestimmten Systemfehler (TOP-Ereignis) zu identifizieren und Zuverlässigkeitskennwerte für den Systemausfall zu ermitteln. Die FTA ist eine deduktive Top-Down-Methode, die mittels logischer Verknüpfungen die Ursachen für das Auftreten des TOP-Ereignisses auf Kombinationen sogenannter PRIMÄR-Ereignisse zurückführt. Ein Primär-Ereignis stellt dabei das Versagen eines einzelnen Bauteils bzw. einer einzelnen Komponente des Gesamtsystems dar. Einschränkungen und Randbedingungen einer FTA sind in der Fachliteratur ausreichend beschrieben. Insbesondere die Granularitätsstufe der Primäreignisse ist so gewählt, dass eine hinreichende Genauigkeit sowie eine funktionale Abdeckung mit ISO 19880-1 Annex C erreicht wird. Das bedeutet, dass nur die Überwachung des Betankungsvorganges an sich im Fokus steht.

Im vorliegenden Fall wurde das zu betrachtende technische System speziell auf die in der DIN EN 17127 genannten Überwachungsfunktionen und die am Betankungsprozess beteiligten Komponenten ausgerichtet. Die zugehörigen TOP-Ereignisse wurden durch die in Anhang A ermittelten Untersuchungsszenarien bereits vorgegeben. Die konstruierten Fehlerbäume gemäß Anhang B koppeln die möglichen kausalen Abläufe einer Betankung mit den funktional erforderlichen Komponenten und Bauteilen sowie den aus den TOP-Ereignissen resultierenden individuellen Risiken.

Die Ermittlung von Prüfindervallen für Systeme auf Anforderung, wie dies auch bei Abschaltssystemen der Betankungsprotokolle der Fall ist, ist mit dem Rechengang zur Bestimmung der Nichtverfügbarkeit verknüpft [1].

$$u(t) = 1 - \exp[-\lambda * (t - n * \theta)] \quad (t \geq 0; n = 0, 1, \dots) \quad \text{Formel (1)}$$

mit

$u(t)$ = Nichtverfügbarkeit (Wert zwischen 0 und 1)

λ = Ausfallrate der Komponente in $[h^{-1}]$

$$t = \frac{1}{\lambda} (\text{mittlere Lebensdauer der Komponente})$$

$\theta = \text{Funktionsprüfintervall in [h]}$

$n = \text{der ganze Teil des Quotienten } t/\theta$

Der zeitlich gemittelte Nichtverfügbarkeit der Komponente beträgt mit guter Näherung:

$$\bar{u} \approx \frac{\lambda \cdot \theta}{2} \quad \text{Formel (2)}$$

mit \bar{u} – zeitlich gemittelte Nichtverfügbarkeit der Komponente

Die getroffenen Annahmen zur Modellierung des technischen Systems nach Anhang B - Quantitative Risikoanalyse für eine Wasserstofftankstelle - i.V.m. der Ermittlung eines Prüfintervalls sind:

- die Ausfallzeiten der Komponenten sind exponentialverteilt;
- das Zeitintervall zwischen den Prüfungen, Q , ist konstant;
- Ausfälle werden ausschließlich bei der Prüfung entdeckt;
- die Zeitdauer der Prüfung ist vernachlässigbar gegenüber der mittleren Lebensdauer der Komponente und wird daher gleich Null gesetzt;
- die Komponente wird bei jeder Prüfung, falls sie ausgefallen ist, ersetzt oder so instandgesetzt und gilt danach als „so gut wie neu“.

Formel (1) führt dann zur sogenannten „Sägezahnkurve“ wie in Abbildung 17 dargestellt.

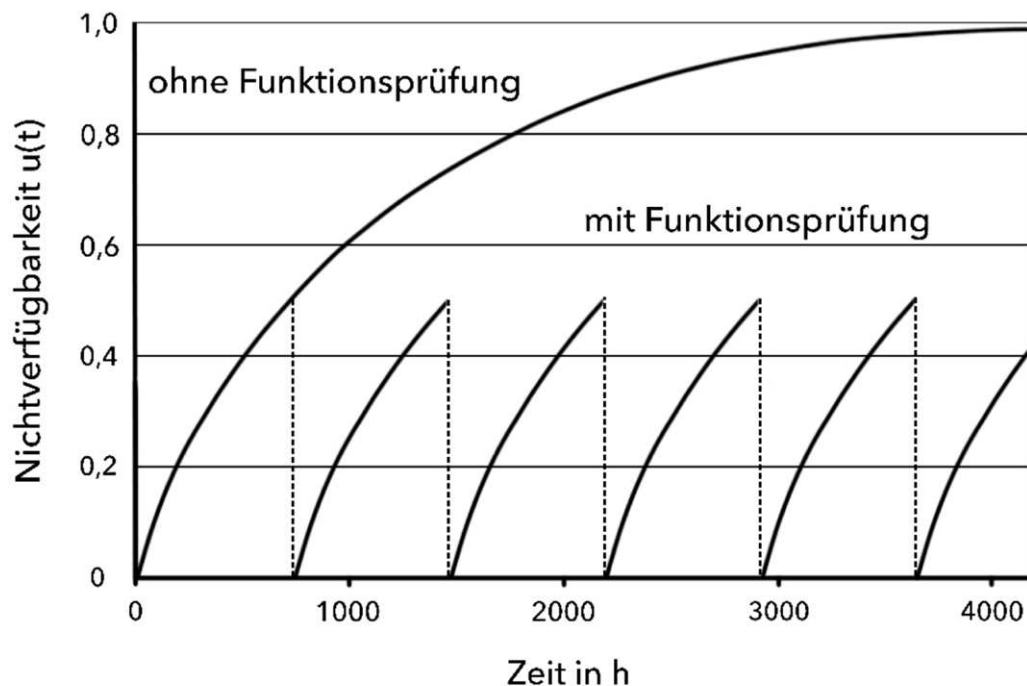


Abbildung 17: Zeitl. Verlauf Nichtverfügbarkeit einer Komponente mit und ohne Funktionsprüfung

Das bedeutet, dass bei $u(t) > 0,5$ die Wahrscheinlichkeit der Nichtverfügbarkeit der Komponente bei Anforderung größer ist als die Wahrscheinlichkeit der Verfügbarkeit. Genau darauf kommt es bei Abschaltssystemen, wie den in Betankungsprotokollen überprüften Überwachungseinrichtungen, an. Damit kann der Wert:

$$\bar{u} = u(t)_{\text{krit}} = 0,5$$

als *kritische Nichtverfügbarkeit* $u(t)_{\text{krit}}$ angesehen werden.

Dieser Grenzwert der Nichtverfügbarkeit des Betankungssystems stellt somit den SOLL-Wert dar, der durch das zu ermittelnde Prüfintervall sichergestellt werden muss.

Jede betriebliche Nutzung des Betankungssystems stellt an sich eine Funktionsprüfung für die dabei eingesetzten Komponenten dar. Wichtig ist, dass dieser Umstand nicht gleichbedeutend mit einer Prüfung nach DIN EN 17127 Abschnitt 5 ist. Denn die dort vorgesehenen Prüfumfänge umfassen Prüf Aspekte, die bei einer üblichen Fahrzeugbetankung nicht mit überprüft werden, wie zum Beispiel eine Sicherheitszeit von fünf Sekunden oder auch die Anzahl an Pausen während einer Betankung mit einer Anzahl von maximal zehn.

Die TOP-Ereignisse der konstruierten Fehlerbäume werden mittels Strukturfunktionen quantitativ als *Ausfallwahrscheinlichkeit* (ohne Einheit) berechnet. Um die in Formel (1) benötigte *Ausfallrate* zu bestimmen, wird die tatsächliche Betriebszeit benötigt (Einheit: h^{-1}).

Die Ermittlung der Bezugszeit (Betriebszeit) wird wie folgt abgeschätzt.

Die Anzahl der Wasserstofftankstellen in Deutschland beträgt ca. 100^{66} . Die derzeitige Anzahl zugelassener PKW mit Brennstoffzellenantrieb liegt bei etwa 1.000^{67} . Es wird angenommen, dass jede Wasserstofftankstelle zwei Zapfsäulen hat. Bei einer jährlichen Fahrleistung von 15.000 km benötigen Fahrzeuge mit einer Reichweite von 600–700 km (z. B. Hyundai Nexo, Toyota Mirai) etwa zwei Betankungen pro Monat. Eine Betankung bei einem 700-bar-Tank dauert ca. 10 Minuten. Daraus lässt sich die Betriebszeit näherungsweise abschätzen.

Für die Zukunft ist eine Zunahme der HRS- und BZ-Fahrzeugzahlen vorgesehen. Für Deutschland ist eine Anzahl von 1.000 HRS in der Diskussion. Die hier überschlägig ermittelten Betriebszeiten stellen dann die Bezugszeit ausgewählter Komponenten zur Berechnung ihrer Ausfallrate dar. Insofern kann diese Bezugszeit auch schwanken.

je Fahrzeug: 24 Betankungen/a á 10 min Þ 240 min/a bzw. $4,6 \cdot 10^{-4} \text{a}$

je Wasserstofftankstelle (HRS): 10 PKW/HRS*a Þ 240 Betankungen/a Þ 40 h/a bzw. $4,6 \cdot 10^{-3} \text{a}$

⁶⁶ Vgl. AUTO BILD, 2023

⁶⁷ Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt, 2024

Damit können die Ausfallwahrscheinlichkeiten der TOP-Ereignisse der Fehlerbäume nach Anhang B in Ausfallraten des Betankungssystems (I_{System}) umgerechnet werden (für diejenigen Komponenten, die nach der Betankung in einen drucklosen Zustand gebracht werden).

Durch die Umstellung von Formel (2) nach der Zeit zwischen den erforderlichen Prüfungen kann das gesuchte Prüfintervall für das Betankungssystem ermittelt werden:

$$\theta_{\text{System}} = 2 * \frac{\bar{u}}{\lambda_{\text{System}}} \quad \text{in [h]} \quad \text{Formel (3)}$$

Die so durchgeführten Berechnungen i.V.m. den Ergebnissen von Anhang B führen unter Berücksichtigung der kritischen Nichtverfügbarkeit des Betankungssystems von $\bar{u} = 0,5$ für das TOP-Ereignis mit der höchsten Ausfallrate ("Befüllung außerhalb der zulässigen Spezifikation") zu einem Prüfintervall von:

$$Q = 23.450 \text{ h.}$$

Das errechnete Prüfintervall entspricht 32,12 Monaten und ist dementsprechend nicht praxistauglich. Aus diesem Grund kann das Prüfintervall auf 36 Monate (25.920 h) angehoben werden.

4.5 Formulierung eines Prüfintervallvorschlags

Die Ableitung eines Vorschlags für ein Prüfintervall zur Sicherstellung der Interoperabilität, basierend auf der Norm EN 17127:2024 Abschnitt 6, orientiert sich an Vergleichswerten für PLT-Einrichtungen mit Sicherheitsfunktion, den oben genannten Sachgebieten sowie dem Analyseergebnis aus Anhang B (= Referenzen).

Die Referenzen werden in Tabelle 16 zusammengefasst. Dabei wird der Ausdruck „Sicherheitsfunktion“ als Funktion, die für ein bestimmtes gefährliches Ereignis einen sicheren Zustand für den Prozess erreichen oder aufrechterhalten soll, definiert.

Tabelle 16: Vergleichende Übersicht vorhandener Prüfindervalle

Referenz	Sicherheitsfunktion zur Erreichung von Schutzzielen	Prüfintervall [in Monaten]			
		6	12	24	36
§ 7 Abs.7 GefStoffV Wirksamkeit der technischen Schutzmaßnahmen	i.d.R.: ja	-	-	-	x
Lüftungsanlagen, Gaswarneinrichtungen und Inertisierungseinrichtungen	auswirkungsbegrenzend (Explosionsschutz)	-	x	-	-
CNG-Tankstelle (Zapfsäule)	ja	x	-	-	-
automatische Brandmeldeanlagen Garagen	ja	-	-	-	x
CO-Warnanlage	auswirkungsbegrenzend	-	-	-	x
ortsfeste selbsttätige Feuerlöschanlagen	auswirkungsbegrenzend	-	-	-	x
Rauchabzugsanlagen Mittel- und Großgaragen	auswirkungsbegrenzend	-	-	-	x
Elektroladestation sowie Elektrische Anlagen und ortsfeste elektrische Betriebsmittel in „Betriebsstätten, Räumen und Anlagen besonderer Art“ (DIN VDE 0100 Gruppe 700)	ja	-	x	-	-
PLT-Sicherheits-einrichtungen nach NAMUR NA 106 bzw. VDI/VDE 2180 Blatt 3	ja	-	x	-	-
Zuverlässigkeitsanalyse des Betankungssystems nach Anhang B	ja FTA-Analyse Betankung	-	-	-	x

Für das Prüfindtervall von Betankungsprotokollen sollte ein vergleichbarer Wert gelten, um ein hohes Maß an Risikoreduzierung zu gewährleisten.

Auf der Basis dieser Referenzdaten wird für die wiederkehrende Überprüfung der Betankungsprotokolle nach Maßgabe der DIN EN 17127 eine maximale Frist (PF_{\max}) vorgeschlagen:

$PF_{\max} = 36$ Monate.

Dieser Vorschlag stellt ein anspruchsvolles Sicherheitsniveau dar, vergleichbar mit den etablierten und bewährten Prüffristen der angegebenen Referenzen. Zudem wird erwartet, dass die weitere sichere Nutzung bis zur nächsten Überprüfung gewährleistet ist.

Das angestrebte hohe Sicherheitsniveau entspricht dem in Deutschland anerkannten Niveau der Betriebssicherheit und bildet eine wesentliche Grundlage für die Akzeptanz von Wasserstofftankstellen im urbanen Umfeld.

Das Prüfindtervall korrespondiert zudem mit anderen gesetzlichen Prüffristen (§7 Abs.7 GefStoffV oder auch §16 i.V.m. Anhang 2 Abschnitt 3 Nr.5.2 BetrSichV (sekundärer Explosionsschutz). Ein weiterer Vorteil ist, dass die wiederkehrende Inspektion durch zugelassene und qualifizierte Prüforganisationen durchgeführt wird, die auch die Prüfung gemäß §16 BetrSichV vornehmen, wodurch organisatorische Synergieeffekte entstehen.

Dieser Vorschlag kann für öffentliche und nicht-öffentliche Wasserstofftankstellen verwendet werden. Da es sich um eine Maximalfrist handelt, könnte das Prüfindtervall für öffentliche Tankstellen mit potenziell höherem Individualrisiko entsprechend verkürzt werden.

Die Aufnahme dieses Prüfindtervallvorschlags in die Norm EN 17127:2024-05 Abschnitt 6 könnte zudem eine vollständige wiederkehrende Arbeitsmittelprüfung nach §14 BetrSichV sicherstellen, wonach auch sicherheitsrelevante MSR-Einrichtungen wiederkehrend geprüft werden müssen.

Textvorschlag:

Tabelle 17: Textvorschlag für Anpassung DIN EN 17127

<i>Normabschnitt</i>	<i>Position</i>	<i>Text</i>
Nationales Vorwort	Satz 7 und Satz 8 (neu)	Der normative Begriff „Inspektion“ wird als unabhängige Prüfung durch kompetente und zugelassene Dritte verwendet. Betreiberseitige Instandhaltungstätigkeiten (DIN EN 1306 bzw. DIN 31051) bleiben unberührt.
EN 17127:2024 Abschnitt 6.1	Satz 6 (neu) Ersetzt bisherigen Satz 6.	„An nicht öffentlich genutzten Wasserstofftankstellen ist die Abgabeeinrichtung spätestens alle 36 Monate einer Inspektion der Interoperabilität zu unterziehen.“
	Satz 7 (neu)	„An öffentlich genutzten Wasserstofftankstellen ist die Abgabeeinrichtung spätestens alle 24 Monate einer Inspektion der Interoperabilität zu unterziehen.“
	Satz 8 (neu)	„Für beide Tankstellenarten ist der Prüfumfang gemäß Tabelle 1 vorgeschrieben. Allerdings genügt für die wiederkehrende Inspektion die Durchführung eines reduzierten Prüfumfanges wie folgt: „Umgebungstemperatur, Betankungsdruck und Betankungstemperatur, Kalibrierungsgenauigkeitstabelle“; „Fehler: CHSS Ausgangsdruck“; „Fehler: Kommunikations-Abbruchsignal“ und „Bestätigung der Betankung mit Kommunikation“, letzterer mit einer Startbedingung.“
	Satz 9 (neu)	„Sind mehrere Abgabeeinrichtungen pro Tankstellenstandort installiert, so genügt für baugleiche Abgabeeinrichtungen, die das gleiche Druckniveau, dieselbe Kühlung, dieselbe sicherheitsgerichtete MSR-Einrichtung und das gleiche Betankungsprotokoll wie für eine erste, vollständig zu prüfende Abgabeeinrichtung verwenden, der reduzierte Prüfumfang von Satz 8. Die Bau- und Funktionsgleichheit ist vom Hersteller schriftlich zu belegen.“

5 Umfänge und Anforderungen an Mindestabnahmeprüfungen

5.1 Mindest-Prüfumfänge FAT/SAT

5.1.1 SAT Erstabnahme – Ermittlung Anpassungsbedarf

Tabelle 18: Gegenüberstellung bestehender Testdefinitionen, Stand 03/2024

ISO No.	Name des Tests nach DIN EN 17127-1:2019-09	Name des Tests nach ISO 19880-1:2020	Detail-Testbeschreibung CEP 35 / 70MPa SAT	Erwartetes Prüfergebnis (aus EN)
3	Umgebungstemperatur, Betankungsdruck und Temperatursensor, Kalibrierungsgenauigkeit stabelle	Ambient, fuelling pressure and temperature sensor calibration accuracy table	Sensor-Plausibilitätstest. Vergleich mit den Werten der Abnahmehardware. SAT: Prüfung, ob die Werte der Sensoren plausibel sind. Wenn SAT & FAT: Zusätzlich Überprüfung der Kalibrierungszertifikate.	Sensoren zeigen einen dem Betriebszustand der Zapfsäule entsprechenden Wert; die Kalibrierung wird mit OK bestätigt.
8	Fehler: CHSS-Ausgangsdruck	Fault: CHSS starting pressure	Druckstoß bei zu hohem Anfangsdruck im Fahrzeugtank ($p_{CHSS}^{Initial} > 100\%$ Nenndruck /NWP).	Der Füllvorgang darf nicht gestartet werden.
16	Kommunikationsstörung	Communications break	Unterbrechung der Kommunikation --> Stopp bei $P_{target}^{Noncomm}$. Kann mit ISO 36a kombiniert werden.	Die Zapfsäule schaltet auf nicht kommunikationsgestützte Betankung um oder stoppt den Tankvorgang.
18	Fehler: Kommunikations-Abbruchsignal	Fault: communications abort signal	Abort Signal --> Die Betankung stoppt innerhalb von 5s.	Abbruch des Füllvorgangs innerhalb von 5 s nach Überschreitung der Grenzwerte.
36 (a)	Bestätigung der Betankung ohne Kommunikation für beide Druckpegel (H70 und ggf. H35) *	Non-communications fuelling validation for each pressure level (H70 and, if applicable, H35)	NoncommM Betankung --> Stopp bei $P_{target}^{Noncomm}$.	Die Betankung wird unter einem anzunehmenden (88 % bis 95 %) SOC/Druck +/- 2 MPa durchgeführt. Es erfolgt kein Abbruch.
36 (b)			Druckstoß bei hohem Anfangsdruck $p_{CHSS}^{Initial}$, Noncomm--> Stopp bei $P_{target}^{Noncomm}$.	
37 (a)	Bestätigung der Betankung mit Kommunikation *	Communications fuelling validation	Kühlleistung, niedriger Startdruck (< 2 MPa), große Tanks (149-174ltr) und hohe Befüllgeschwindigkeit (APPR z. B. > 24,9 MPa/min für H70-T40)	Die Betankung wird unter einem anzunehmenden SOC/Druck (95 % bis 100 %) durchgeführt. Es erfolgt kein Abbruch.
37 (b)			Kühlleistung, kleine Tanks (50-100ltr) und niedrige Befüll-geschwindigkeit (APPR z. B. < 15 MPa/min für H70-T40)	

Eine Gegenüberstellung der Definitionen der konkreten Mindest-Prüfumfänge in Tabelle 18 zeigt Unterschiede auf. Die Nummerierung der Tests ist gemäß der Nomenklatur in ISO 19880-1:2020, Annex C, dargestellt.

Die Detail-Testbeschreibung der CEP in der vierten Spalte wurde von der CEP und dem ZSW als detaillierte Testvorschrift der Vorgaben aus EN und ISO erarbeitet.

Grundsätzlich ist bemerkenswert, dass in der deutschen Übersetzung der EN 17127 für Test 36 ein Zielkorridor des Tankfüllstandes SOC zu 88-95 % SOC und bei Test 37 zu 95-100 % festgeschrieben ist, während diese Zielkorridore im englischen Original nicht auftauchen. Dass Inhalte in einer Übersetzung zusätzlich zum Ursprungstext hinzugefügt werden, ist nach Erfahrung der Autoren zumindest ungewöhnlich.

Relevante Unterschiede in Tabelle 18, die hier nicht bewertet, aber deutlich gemacht werden sollen, sind für:

- Test 36b: Hinweis in CEP-Testvorschrift, dass der obligatorische Druckstoß bei hohem Anfangsdruck in der Auswertung erkennbar sein soll, ist weder in der DIN EN 17127 noch der ISO 19980-1 vorhanden.
- Test 37a: Hinweise in CEP-Testvorschrift auf Kühlleistung (hier: Einhaltung der Temperatur-Obergrenze) und die Startbedingung Leerlaufsituation ist weder in der DIN EN 17127 noch der ISO 19980-1 vorhanden.
- Test 37b: Hinweise in CEP-Testvorschrift auf Kühlleistung (hier: Einhaltung der Temperatur-Untergrenze) und die Startbedingung Leerlaufsituation ist weder in der DIN EN 17127 noch der ISO 19980-1 vorhanden.

Basierend auf diesen unterschiedlichen Definitionen, wurde die Anwendbarkeit der Mindest-Abnahmetests heute (2024) anwendbare Betankungsprotokolle (vgl. Tabelle 2 anhand der Kategorien



bewertet. Anpassungsbedarf wurde insbesondere bei der Bewertung gegenüber der Definition der CEP festgestellt, was angesichts des Detaillierungsgrades erwartbar war. Die folgende Tabelle 19: Anpassungsbedarfe durch Bewertung der CEP-Testdefinition zu Protokollen zeigt eine Übersicht dieser Bewertung:

Tabelle 19: Anpassungsbedarfe durch Bewertung der CEP-Testdefinition zu Protokollen

Test No. (ISO)	Detail- Testbeschreibung CEP	SAE J2601-1 table based BSMPa 1.2..6kg 720 - T40 max 60g/s	SAE J2601-1 table based 70MPa 2..10kg 720 - T40 max 60g/s	SAE J2601-1 table based 70MPa CatD >10kg 720D - T40D max 60g/s	SAE J2601-1 MC Formula BSMPa 1.2..6kg 720 - T40 max 60g/s	SAE J2601-1 MC Formula 70MPa 2..10kg 720 - T40 max 60g/s	SAE J2601-1 MC Formula 70MPa CatD >10kg 720D - T40D max 60g/s	A,B,C-MAP table based H35 HF 20..42,5kg max 120g/s	D,F-MAP table based H35 HF 20..42,5kg max 120g/s	E-MAP table based H35 HF 20..42,5kg max 120g/s	SAE J2601-5 MC Formula BSMPa 6..180kg 70 - T40 Ta max 120g/s	SAE J2601-5 MC Formula BSMPa 6..180kg 70 - T40 Ta max 120g/s	SAE J2601-5 table based 70MPa 10..201kg 70 - T40 max 90g/s	SAE J2601-5 MC Formula 70MPa 10..201kg 70 - T40 max 90g/s	SAE J2601-5 MC Formula 70MPa 10..201kg 70 - T40 max 300g/s
3	Sensor-Plausibilitätstest. Vergleich mit den Werten der Abnahmehardware. SAT: Prüfung, ob die Werte der Sensoren plausibel sind. Wenn SAT & FAT: Zusätzlich Überprüfung der Kalibrierungszertifikate.							mit HD -FSTM			mit HD-FSTM bis 50kg				
8	Druckstoß bei zu hohem Anfangsdruck im Fahrzeugtank ($p_{CHSS}^{initial} > 100\%$ Nenndruck /NWP)														
16	Unterbrechung der Kommunikation --> Stopp bei $P_{target}^{NonComm}$ Kann mit ISO 36a kombiniert werden.														
18	Abort Signal --> Die Betankung stoppt innerhalb von 5s														
36a	NonCOMM Betankung --> Stopp bei $P_{target}^{NonComm}$														
36b	Druckstoß bei hohem Anfangsdruck $p_{CHSS}^{initial}$, NonCOMM--> Stopp bei $P_{target}^{NonComm}$														
37a	Kühlleistung, alle Tanks und hohe Befüllgeschwindigkeit (APPR z.B. > 24,9 MPa/min für H70-T40)		*	andere Definition nötig	andere Definition nötig	andere Definition nötig		keine Kühlung →		andere Definition nötig	keine Kühlung →	*	andere Definition nötig		
37b	Kühlleistung, Kleine Tanks und niedrige Befüllgeschwindigkeit (APPR z.B. < 15 MPa/min für H70-T40)			andere Definition nötig	andere Definition nötig	andere Definition nötig		andere Definition nötig	mit HD -FSTM		andere Definition nötig		andere Definition nötig		

Alle vorgeschriebenen Tests (in Zeilen) wurden anhand vorhandener Abnahmehardware und Regelwerke mit den heute verwendbaren Betankungsprotokollen (in Spalten) abgeglichen. Das sich im Bau befindliche Abnahmegerät des ZSW „HD-FSTM“ für Nutzfahrzeug-H₂-Tankstellen mit einer Tankkapazität von 50 kg H₂ bei 35 MPa wurde in die Analyse als bestehend einbezogen.

Ergebnisse / Anpassungsbedarfe:

- Für das einzige Betankungsprotokoll mit Massenströmen bis 300 g/s bestehen heute keine Regelwerke für Verbindungsarmaturen, weshalb die Voraussetzungen für Mindestabnahmeprüfungen als nicht erfüllt bzw. ungenügend bewertet wurden (vgl. Spalte ganz rechts).
- 37a, 37b: Für Betankungsprotokolle ohne Vorkühlung (D- und F-MAP des 35 MPa-CEP-Protokolls; 35 MPa MCF Ta der SAE J2601-5) ist eine Überprüfung der Kühlleistung irrelevant. Die Detail-Testanweisung benötigt hierfür angepasste Testdefinitionen.
- Für formelbasierte Betankungsprotokolle (MC Formula) kann die Befüllgeschwindigkeit in MPa/min nicht beeinflusst werden, sondern errechnet sich aus den aktuellen Zustandsparametern. Die Detail-Testanweisung benötigt hierfür angepasste Testdefinitionen.
- Für die Abnahme von 70 MPa HRS für Fahrzeug-Tanksysteme >10 kg existiert derzeit keine eigene Hardware. Tests könnten, ähnlich wie beim heutigen Vorgehen für 35 MPa-Nutzfahrzeug-HRS (siehe Abschnitt 2.2.4), übergangsweise mit kleineren Tanksystemen durchgeführt und ergänzend durch wenige Betankungen mit Fahrzeugen der richtigen Größenkategorie durchgeführt werden. Mittelfristig ist die Bereitstellung von Abnahmehardware in der entsprechenden Tankgrößen-Kategorie erforderlich.
- Die Protokolle der SAE J2601-5, 35 MPa sind für Tanksysteme bis 180 kg H₂-Inhalt definiert. Abnahmetests können mit dem HD-FSTM vollständig konform bis 50 kg Kapazität durchgeführt werden; darüber hinaus wäre die bereits erwähnte Mischlösung einsetzbar.

5.3 Die SAE J2601-5 spezifiziert Fahrzeugtankgrößen bis 180 kg H₂ (35 MPa) und 201 kg (70 MPa). Für den Straßen-Schwerverkehr sind Systeme bis ca. 100 kg Wasserstoffkapazität realistisch zu erwarten. Abnahmetests sollten für diese Größenordnung eine modulare, erweiterbare Abnahmehardware zur Verfügung stellen (vgl. Kapitel 5.3). Größere Kapazitäten haben derzeit nur wasserstoffbetriebene Schienenfahrzeuge.

5.1.2 SAT Erstabnahme – baugleiche Abgabestellen am gleichen Standort

Sind an einem Tankstellenstandort mehrere Abgabeeinrichtungen installiert, genügt für baugleiche Einrichtungen mit gleichem Druckniveau, Kühlung, sicherheitsgerichteten MSR-Einrichtungen und Betankungsprotokoll ein reduzierter Prüfumfang.

Tabelle 20: reduziertes SAT-Testprogramm bei baugleichen H₂-Abgabeeinrichtungen an einem Standort

Test Nr. (ISO)	Testbeschreibung "DIN EN" - Detail CEP	Begründung / Bemerkung
3	„Umgebungstemperatur, Betankungsdruck und Betankungstemperatur, Kalibrierungsgenauigkeitstabelle“ Sensor-Plausibilitätstest. Vergleich mit den Werten der Abnahmehardware. Prüfung aktueller Kalibrierzertifikate.	Aktualität und Plausibilität der relevanten Sensorwerte wird geprüft.
8	„Fehler: CHSS-Ausgangsdruck“ Druckstoß bei zu hohem Anfangsdruck im Fahrzeugtank ($p_{CHSS}^{initial} > 100\%$ Nenndruck /NWP)	Einfacher Test, der die Sicherheitskette der H ₂ -Tankstelle prüft
18	„Fehler: Kommunikations-Abbruchsignal“ ABORT Signal wird via IR vom Fahrzeug an die HRS gesendet --> Die Betankung stoppt innerhalb von 5s	Test der Kommunikation. Abort entspricht einem "Not-Aus" des betankten Fahrzeugs.
37	„Bestätigung der Betankung mit Kommunikation“ mit einer Startbedingung. Auch Prüfung Kühlleistung, Tankkapazität im Bereich der Protokollauslegung.	Nachweis einer vollständigen Betankung, wenn vorhanden mit Kommunikation. Hinweis: statt <2 MPa besser mit realistischen 2..4 MPa Startdruck

Vom Hersteller bestätigte Abgabeeinrichtungen, die die gleiche Steuerungslogik, Kühlung usw. verwenden, dürften mit diesem reduzierten Prüfumfang getestet werden. Sollten diese reduzierten Prüfungen unerwartet Hinweise auf Abweichungen der Hard- oder Software zwischen den Abgabeeinrichtungen ergeben, wird die prüfende Stelle dies zurückmelden und entsprechend den vollen Testumfang einfordern.

5.1.3 FAT Erstabnahme – Optionen und potenzielle Anpassungsbedarfe

Für die Werksabnahmetests FAT wurde eine Bewertung hinsichtlich technischer Umsetzbarkeit vorgenommen. Im Ergebnis sind fast alle der in der ISO 19880-1, Annex C definierten FAT über simulierte Funktionstests erfüllbar, da im Wesentlichen die Reaktion auf die Verletzung von Umgebungs- oder Betankungsbegrenzungen überprüft wird.

Voraussetzung für die simulative Durchführung ist eine geeignete Simulationsumgebung der Tankstellensteuerung, die es z. B. ermöglicht, Sensorparameter anzupassen oder einen Druckstoß nachzubilden, um in die reguläre Betankungsphase zu gelangen.

Ein Beispiel für einen Test, der aus technischen Gründen nicht simulativ durchgeführt werden kann, ist die Überprüfung der Reaktion der HRS-Steuerung auf einen zu hohen H₂-Durchfluss – wenn dieser an der HRS durch mechanische Vorrichtungen begrenzt ist.

Tabelle 21: technische Bewertung FAT hinsichtlich simulativer Tests, Auszug

Test No. (ISO)	Detail- Testbeschreibung CEP	Test simulativ	Bemerkung
5	Umgebungstemp. T _{amb} ^{HRS} zu klein (< -40 °C) --> keine Betankung möglich	ja	Parameter-Check
6	Umgebungstemp. T _{amb} ^{HRS} zu hoch (> +50 °C) --> keine Betankung möglich	ja	Parameter-Check
7	Druck im Fahrzeugtank p _{CHSS} zu klein (< 0.5 MPa nach Druckstoss) --> keine Betankung möglich	ja	Druckstoß muss nachgebildet werden.
10	Durchfluss F _{Disp} zu hoch (heute > 60 oder 120 g/s) --> Betankung stoppt	Ja *	Simulationsumgebung *nicht möglich bei mechanischer Begrenzung (!)
14a	Test falsches Kommunikationssignal (hier: Checksum)	Ja	Simulationsumgebung
... bis 35	...		

Zur Definition der zu prüfenden Parameter und Grenzwerte in obenstehender Tabelle (vgl. Abschnitt 2.2.5). Ob formale Gründe der simulativen Durchführung widersprechen, wurde im Kapitel 5.2 analysiert.

5.1.4 SAT Wiederholprüfungen – Vorschlag Prüfumfang

Die DIN EN 17127 fordert Wiederholprüfungen „im Zusammenhang mit der Interoperabilität“ (vgl. die ausführliche Ausarbeitung in Kapitel 4). Für diese Wiederholprüfungen an HRS, bei denen ordnungsgemäß der Prozess der FAT- und SAT Prüfungen durchgeführt, bestätigt und dokumentiert wurde, ist aus Sicht der Autoren ein im Vergleich zur SAT-Erstabnahme reduzierter Prüfumfang ausreichend. Dieser reduzierte Prüfumfang entspricht dem in Tabelle 20 dargestellten und begründeten Umfang.

Bei anlassbezogenen Wiederholprüfungen nach prüfpflichtigen Änderungen der Hardware oder Steuerungssoftware können der volle SAT-Prüfumfang nach Tabelle 1 der DIN EN 17127 (vgl. Tabelle 18) so wieder konkreten Änderung entsprechend, einzelne FAT-Tests erforderlich sein.

5.2 Anforderungen an simulierte Abnahmetests

Die Simulation von Tests ist ein entscheidender Schritt im Entwicklungs- und Qualitätssicherungsprozess. Durch simulative Tests kann potenziell der Testumfang vor Ort minimiert werden, ohne die Sicherheit und Funktionalität der Anlage zu beeinträchtigen. Die Eignung ergibt sich aus den normativen Vorgaben der ISO 19880-1:2020 sowie DIN EN 17127:2019 bzw. EN 17127:2020 und auch aus Analogien zu Industrieanlagen.

Die Möglichkeit, eine solche Simulation durchzuführen, hängt jedoch stark von der Art der Umsetzung ab. Als Voraussetzungen für einen aussagekräftigen, simulationsbasierten Test müssen identische, digitale Bedingungen im Vergleich zur endgültigen Anlage geschaffen werden. Das heißt, der Einsatz simulativer Tests eignet sich besonders für die Untersuchung der korrekten Funktion von Steuerungen durch Software. Das Verhalten bzw. die Charakteristiken der verwendeten Sensorik, Logik und Aktorik müssen bekannt sein und mit der zu prüfenden realen Anlage übereinstimmen.

Um das Potential für simulationsbasierte Tests zu ermitteln, ist ein Verweis auf die normativ benötigten Prüfungen unabdingbar. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die abgeprüften Anlagenzustände und die Randbedingungen für den Einsatz von simulativen Abnahmetests, die ausschließlich in der Anlagensteuerung erfolgen. Im Anhang D – Detailanalyse der Einzeltests nach ISO 19880-1:2020 werden daher die in ISO 19880-1:2020, Annex C, Table C.2 festgelegten Tests aufgelistet und zusammenfassend beschrieben. Auf Analogien und Unterschiede zu DIN EN 17127:2019, 7.2, Tabelle 1 und EN 17127:2020, 6.2, Table 1 wird, wenn vorhanden, verwiesen. Anschließend wird pro Test ein Ausblick auf die Möglichkeit zur Simulation gegeben und unter Zuhilfenahme der normativen und anlagentechnischen Voraussetzungen begründet. Auch wenn in der ISO 19880-1:2020 im Anhang C unter Kapitel C.5.3 die Möglichkeit der simulativen Tests nur für den FAT eröffnet wird, wurden die Möglichkeiten einer Simulation der Einzeltests des SAT im Rahmen dieser Analyse ebenfalls betrachtet. Die Norm beschreibt unter Punkt C.5.3.2 jedoch explizit die Notwendigkeit der Prüfung vor Ort und geht von einer Datengewinnung aus Aufzeichnungen der Betreiber und des verwendeten HSTA aus.

Tabelle 22 enthält zusammenfassend für dieses Kapitel eine Auflistung der Tests und deren Simulierbarkeit sowie etwaige Bemerkungen zu einzelnen Tests.

Tabelle 22: Überblick zur Simulierbarkeit der Einzeltests nach formalen Kriterien

Test No. (ISO)	FAT/SAT	Name	Simulierbarkeit	Bemerkungen
1	FAT	Korrektes Kommunikationsprotokoll	Test nach SAE J2799, 4.4.1	
2	FAT	Korrekte Implementierung der Tabellen	trifft nicht zu	
3	SAT	Validieren der Sensorwerte	Nein	
4	FAT	Test der Implementierung eines Cold Dispensers	Ja	optional
5	FAT	Test für extreme Umgebungsbedingungen, zu niedrige Umgebungstemperatur	Ja	
6	FAT	Test für extreme Umgebungsbedingungen, zu hohe Umgebungstemperatur	Ja	
7	FAT	Ausgangsdruck zu niedrig	Nein	
8	SAT	Ausgangsdruck zu hoch	Nein	
9	FAT	Fehler, Überschreitung der max. zul. Masse bei Startdruckimpuls	Je nach Realisierung	
10	FAT	Fehler, Überschreitung des max. zul. Kraftstoffflusses	Je nach Realisierung	
11	FAT	Fehler, Dispenser - absolute Wasserstoffabgabetemperatur	Ja	
12	FAT	Fehler, Dispenser – Wasserstoffabgabetemperatur außerhalb der Grenzen (T30, T20)	Ja	
13	FAT	Fehler, Überwachung der Wasserstoffzufuhrtemperatur	Ja	
14	FAT	Ungültiges Kommunikationssignal	Ja	
15	FAT	“Out of Bounds”-Test für die CHSS-Größe	teilweise	
16	SAT	Kommunikationsstörung	Ja	
17	FAT	Fehler, Haltesignal	Ja	
18	SAT	Abbruch der Kommunikation	Ja	
19	FAT	Fehler, max. CHSS-Temperatur	Ja	
20	FAT	Fehler, max. CHSS- und Zapfsäulendruck	Ja	
21	FAT	Fehler, max. Ladezustand	Ja	
22	FAT	Durchlaufkontrolle	Ja	
23	FAT	Überwachung des Wasserstoffförderdrucks, obere Grenze	Ja	

24	FAT	Überwachung des Wasserstoffförderdrucks, untere Grenze	Ja	
25	FAT	Zielwert für den Druck der Wasserstoffzufuhr (kommunikationslos)	Ja	
26	FAT	Zielwert für den Druck der Wasserstoffzufuhr (kommunikationsgestützt)	Ja	
27	FAT	CHSS-Größenbestimmung	Nein	
28	FAT	Fallback-Test (Fallback Switch)	Ja	optional
29	FAT	Fallback-Test (Switch and Back)	Ja	optional
30	FAT	Fallback-Test (Threshold High)	Ja	optional
31	FAT	-	Ja	optional
32	FAT	Top-Off-Befüllung	Nein	optional
33	FAT	Cold Dispenser	Nein	optional
34	SAT	Test der Vorkühlungsleistung (PC) (falls installiert)	Nein	optional
35	FAT	Test der Befüllungsmöglichkeit aller CHSS-Kapazitätsklassen	Nein	
36	SAT	Bestätigung der Betankung ohne Kommunikation	Nein	
37	SAT	Bestätigung der Betankung mit Kommunikation	Nein	

Fazit:

Der Teil der vorgestellten Tests, der ausschließlich im Rahmen des FAT durchzuführen ist, kann größtenteils in simulierter Umgebung auf valide Ergebnisse geprüft werden. ISO 19880 Teil 1 aus dem Jahr 2020 schlägt diese Möglichkeit explizit vor.⁶⁸

Durch die ausdrückliche Forderung einer Vor-Ort-Prüfung aus ISO 19880-1:2020 ist eine Durchführung eines SAT oder einzelner Tests des SAT in einer Simulationsumgebung zum Zeitpunkt der Studie nicht möglich.⁶⁹ Die Abnahme muss zur Gewinnung valider Testergebnisse meist mit realen Werten erfolgen, und essenzielle Sicherheitsfunktionen sind zu prüfen.

5.3 Ermittlung und Evaluierung benötigter Abnahmehardware

Basierend auf den bereits beschriebenen „Wasserstofftankstellen-Abnahmenormen“ (DIN) EN 17127 und ISO 19880 sind FAT und SAT im Zuge der Abnahme der Füllanlage durchzuführen. Hierfür muss u.a. auch eine geeignete mobile Abnahmehardware, die als H₂-Senke fungiert, zur Verfügung stehen. Das prinzipielle, heute bereits eingesetzte Konzept wird in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, muss jedoch in

⁶⁸ Vgl. C.5.3.1, ISO 19880-1, 2020

⁶⁹ Vgl. C.5.3.2, ISO 19880-1, 2020

Hinblick auf die überarbeiteten und erwartbaren neuen Füllprotokolle und Technologien (vgl. Kapitel 2.3) angepasst werden, um die erforderlichen Aufgaben wahrnehmen zu können.

Die maßgeblichen Vorgaben an die mobile Abnahmehardware für CGH₂ Tankstellen sind:

- Gewährleistung des sicheren Betriebs (nicht nur während der Betankung) bei den angestrebten Anfangs- und Zieldrücken sowie den antizipierten Massenströmen laut zugrundeliegendem Protokoll (bspw. HF mit 300 g/s)
- Robustheit gegenüber Druckimpulsen > 100% NWP (ca. 1.3 x NWP) für 35 und 70 MPa Systeme
- Darstellung verschiedener Behältergrößen sowie gleicher Behältergrößen bei unterschiedlichen D/L-Verhältnissen
- Möglichkeit der Einzel-Ansteuerbarkeit bzw. Zusammenfassung der diversen Behälter
- Flexible Einstellbarkeit der Anfangs-Füllstände der Behälter
- Korrekte (rückführbare) Datenaufzeichnung mit abgeglichenen Zeitstempeln (Trigger-Signal „Start Betankung“)

sich hieraus ergebende, mögliche Abnahmehardware zeigt das folgende Schema, Abbildung 18: zukünftige Abnahmehardware.

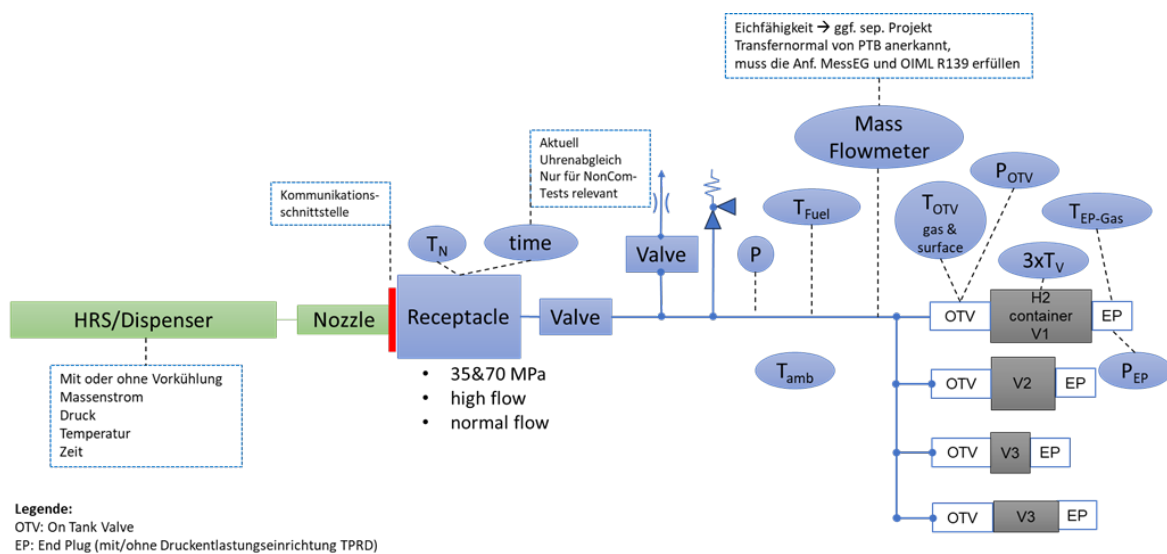


Abbildung 18: zukünftige Abnahmehardware

Zunächst muss das System von der Abgabeeinrichtung kommend über geeignete, gem. Füllprotokoll vorgesehene Kommunikationsschnittstellen verfügen, um den möglichen Datenaustausch gewährleisten und evtl. Fehler simulieren zu können. Des Weiteren sind die normierten Füllanschlüsse der jeweiligen Klassen und Kategorien (35 / 70 MPa, normaler Volumenstrom, hoher Volumenstrom) vorzusehen, über welche die mit einer Überdrucksicherung ausgestattete Versorgung der Speicherbank erfolgt. Diese verfügt über durch Ventile einzeln ansteuerbare Behälter unterschiedlicher bzw. gleicher Volumina, dann

aber mit unterschiedlichen Durchmesser-Längen-Verhältnissen. Die Gasstraße muss darüber hinaus an geeigneten Stellen mit entsprechender Sensorik zwecks Druck-, Temperatur- (Umgebung, Gas, Oberfläche) und Massenstrommessung ausgestattet sein. Schließlich ist eine manuelle Entnahmevorrichtung vorzusehen, um das getankte Gas geeignet wieder ablassen zu können. Eine besondere Anforderung – die Eichung – muss an den Massenstrommesser gestellt werden, da hier die Vorgaben des MessEG/der MessEV greifen, die z. B. eine Konformitätsbewertung nach europäischem Modulkonzept fordern⁷⁰. Aktuell besitzen bei Weitem nicht alle H₂-Abgabeeinrichtungen im Feld diese Konformität. Der regelmäßige Abgleich ist für PKW-Tankstellen <10 kg inzwischen durch von der deutschen Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), der für Metrologie in Deutschland zuständigen Institution, zugelassenen Prüfnormen etabliert. Sowohl gravimetrische Prüfnormen als auch Transfornormen, die regelmäßig auf die SI-Einheit kg rückgeführt werden müssen, sind im Feld im Einsatz. Für Nutzfahrzeug-Abgabeeinrichtungen >10 kg sind aktuell noch keine Prüfnormen bekannt.

Die mobile Abnahmeeinrichtung muss zur Sicherstellung der erforderlichen Prüfumfänge mindestens die zuvor beschriebene technische Ausstattung aufweisen. Insbesondere die Behälter mit ihren Sperrarmaturen sind als kritische Bauteile zu bewerten, da diese das primäre Wasserstoffvolumen bei gegebenem Drücken mit Druckvolumenprodukten von ca. 4900 bar pro m³ tragen. Des Weiteren soll aus ökonomischen, ökologischen und sicherheitstechnischen Gründen das "getankte" Gas nicht abgeblasen, sondern sinnvoll genutzt werden, wobei das Rückführen in die Füllanlage aus Gründen der Gewährleistung (Qualität) und möglicher fiskalischer Probleme nicht möglich ist. Das Verbringen an einen anderen Ort mit dortiger Nutzung ist daher unumgänglich.

Das führt zu einem Dilemma, da das Speichersystem dann dem Gefahrgutrecht (ADR/TPED) unterliegt, aber es sind aktuell keine baumustergeprüften und zertifizierten Behälter mit den erforderlichen Betriebs-/Prüfdrücken verfügbar. Dies wird sich absehbar nicht ändern, da für die möglichen Hersteller entsprechender Behälter aufgrund der extrem geringen Produktionsmengen kein sinnvolles und finanzierbares Geschäftsmodell abbildbar ist. PED- bzw. Automotive-Behälter hingegen dürfen aus rechtlichen Gründen nicht verwendet werden.

Eine mögliche Lösung könnte dennoch in der Verwendung von Automotive-Behältern (vergleichbares Sicherheitsniveau) in Verbindung mit einer Sondergenehmigung durch die Aufsichtsbehörden der Länder speziell für diese Art von mobilen Einrichtungen (zweckgebunden) bestehen.

Für Betankungseinrichtungen von H₂-Tankkapazitäten bis 180 (35MPa) oder 200 (70MPa) kg, die mit heutigen Betankungsprotokollen bedient werden können (vgl. Tabelle 2 und Tabelle 19) ist Abnahmehardware, die nach jeder Betankung mehr als 50 oder 100kg Wasserstoff in die Umgebung entleert, um für den nächsten Test bereit zu sein, schwer vorstellbar. Sowohl aus ökonomischen als auch aus ökologischen Gründen sollte hier über neue Konzepte für den Abnahmeablauf nachgedacht werden. Eine Rückführung des vertankten Kraftstoffs Wasserstoff in den Speicher der HRS scheitert bisher anpassender Instrumentierung (verhältnismäßig einfach zu lösen) und vor allem an der fehlenden Qualitätsgarantie des rückgeführten H₂. Wer haftet für Schäden an FCEV, die durch während der

⁷⁰ vgl. Ermittelte Regeln und Erkenntnisse des Regelermittlungsausschusses nach § 46 des Mess- und Eichgesetzes, 2022

Abnahmetests eingetragenen Verunreinigungen verursacht wurden, ist die Fragestellung. Vor-Ort-Analysen erscheinen unwirtschaftlich teuer.

Ein weiterer denkbarer Ansatz könnte der Einsatz eines schnell ansteuerbaren Druckhalteventils anstelle von Fahrzeugtanks, welches das Verhalten realer großer H₂-Fahrzeugtanksysteme steuerungstechnisch simuliert, sein. Hier wäre die Rückführung des verbrauchten Wasserstoffs in die HRS, zumindest zur Wiedernutzung für weitere Abnahmetests, oder ein nachfolgendes Ablassen in Standard-Druckgasflaschen-Bündel und die Weiternutzung als technischer Wasserstoff niedrigerer Qualität (3.0 oder ISO 14687 Grade A) mit aus technischer Sicht überschaubarem Aufwand denkbar.

5.4 Handlungsempfehlungen

Wie in Kapitel 5 unter den Punkten 5.1.1 und 5.1.2 dargelegt, müssen die Testdefinitionen für die Mindestabnahmen (SAT) angepasst werden, um die Anforderungen für die Befüllung nach der MC-Formel zu berücksichtigen. Zusätzlich sind Protokolle zu berücksichtigen, nach denen die Befüllung ohne Vorkühlung erfolgt. Außerdem sollte ein vereinfachtes Verfahren für die Mindestabnahmen baugleicher Abgabearrichtungen, wie im oben genannten Kapitel beschrieben, festgelegt werden.

Für die Werksabnahmen wird empfohlen die Tests nach Möglichkeit simulativ durchzuführen und die Notwendigkeit der Einschränkungen in ISO 19880-1:2020, Annex C, zu prüfen. Dies wird in unter den Punkten 5.1.3 und 5.2 näher beschrieben.

Eine kontinuierliche Anpassung der Spezifikationen an neue Betankungsprotokolle und Kommunikationsspezifikationen ist aus Sicht der Autoren unumgänglich und sollte in einem kontinuierlichen Prozess erfolgen.

Bezüglich der Abnahmehardware besteht, wie in Kapitel 5 unter Punkt 5.3 beschrieben, das Dilemma der fehlenden gefahrgutrechtlichen Zulassung von 70 MPa-H₂-Behältern. Dieses muss in Zusammenarbeit zwischen Herstellern, zugelassenen Überwachungsstellen und zuständigen Behörden – gegebenenfalls unter Einsatz öffentlicher Fördermittel – gelöst werden. Parallel dazu ist eine Lösung für Abnahmeprüfungen zur Betankung größerer Speichersysteme in Fahrzeugen zu erarbeiten. Für Wasserstoffspeicher mit einer Kapazität von über 10 kg und einem Nenndruck von 70 MPa bzw. Speicher mit einer Kapazität von über 50 kg und einem Nenndruck von 35 MPa sollte aufgrund umwelttechnischer und wirtschaftlicher Interessen zeitnah ein geeignetes Abnahmeverfahren entwickelt und umgesetzt werden.

Darüber hinaus sind realistische Optionen für die Rückführung und Nutzung von komprimiertem Wasserstoff (CGH₂) für Heavy-Duty-Anwendungen nach Abnahmeprüfungen zu finden und zu implementieren.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Diese Studie sollte den Bedarf an sicherheitstechnischen Abnahmen und Inspektionen von Wasserstofftankstellen analysieren und zukünftige Investitionen in die notwendige Infrastruktur zielgerichtet ermöglichen. Das Ziel war es, durch sichere und verlässliche Betankungssysteme Akzeptanz und Vertrauen in die Wasserstoffwirtschaft zu schaffen, um den Ausbau der Infrastruktur für die Betankung mit Wasserstoff in der EU voranzutreiben und so das Erreichen der Pariser Klimaziele zu unterstützen. Die Arbeit ist in klimapolitische Forschungsprogramme wie „NIP - Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II“ eingebettet und unterstützt die Ziele der Reduktion von Treibhausgasemissionen im Mobilitätssektor.

Das Projekt „MPInter“ untersuchte und entwickelte Vorgaben für wiederkehrende Prüfungen an H₂-Betankungsanlagen. Wichtige Ziele beinhalteten die Analyse von Betriebsrisiken, der Vergleich zwischen aktuellen und gewünschten Prüfprozessen, die Ableitung von Maßnahmen zur Risikoreduzierung sowie die Kommunikation der Ergebnisse. Langfristig sollen die Ergebnisse des Projekts die Grundlage für Investitionen in benötigte Hardware und die Organisation reibungsloser Inspektionsabläufe schaffen. Der Fokus lag nicht direkt auf Kostensenkungen, sondern auf der Sicherstellung einer sicheren, zuverlässigen und langfristigen Funktionalität der Wasserstoff-Infrastruktur im Verkehrssektor.

In Kapitel 2 wurde der aktuelle Stand und die Entwicklungen im Bereich der Wasserstoff-Betankungstechnologien analysiert und zusammengefasst. Es konnte festgestellt werden, dass etwa 90 der momentan 1.100 weltweit existierenden Wasserstofftankstellen (HRS) in Deutschland zu finden sind und dass diese mit komprimiertem gasförmigem Wasserstoff (CG H₂) arbeiten, der mit einer vorgegebenen Druckrampenrate in die Fahrzeugtanks übertragen wird. Neben der Zusammenfassung der aktuellen Lage im Feld wurden in der Arbeit häufig auftretende Begriffe definiert und erklärt sowie ein Einblick in gesetzliche und normative Grundlagen für Mindestabnahmen an HRS gegeben.

Es konnte festgestellt werden, dass die Norm DIN EN 17127 die Mindestanforderungen zur Abnahme von Wasserstofftankstellen in Europa festlegt und seit April 2024 gemäß der in Kraft getretenen EU-Verordnung AFIR verpflichtend anzuwenden ist. Die in der Norm beschriebenen standardisierten Tests (FAT und SAT) basieren auf der umfassenderen ISO 19880-1 und müssen zur Sicherstellung der Interoperabilität und Sicherheit durchgeführt werden. Die relevanten Normen und Protokolle umfassen neben DIN EN 17127 und ISO 19880-1 auch nationale und internationale Normen und Gesetze wie z. B. die BetrSichV, die ISO 17268, SAE J2600 und SAE-J2799. Derzeit existieren verschiedene Betankungsprotokolle für unterschiedliche Druckstufen und Fahrzeugkategorien, beschrieben zum Beispiel in verschiedenen Teilen der SAE-J2601.

Anschließend wurden der Ablauf und Inhalt sowie die bisher vorhandene Abnahmehardware für eine Mindestabnahmeprüfung kurz beschrieben und die momentan beteiligten Parteien vorgestellt. Dabei wurde auf die momentanen Schwierigkeiten und Herausforderungen bei der Prüfung hingewiesen.

Ein weiterer Blick auf neue Betankungsprotokolle und Technologien zeigte, dass unterschiedliche Fahrzeugkategorien und steigende Anforderungen an Druck, Durchfluss und Sicherheit adressiert werden.

Zu den neuen Entwicklungen gehören unterkühlter Wasserstoff (sLH₂) und kryo-verdichteter Wasserstoff (CCH₂) sowie Protokolle für höhere Durchflussraten und größere Tankkapazitäten .

Im abschließenden Abschnitt des Kapitels wurden die Verantwortlichkeiten und Abläufe für die Abnahmetests detailliert ausgearbeitet. Es wurde festgestellt, dass zwischen den FAT und SAT unterschieden wird. Beide Tests erfordern die Zusammenarbeit von Herstellern, Betreibern und unabhängigen Dritten. Ein abschließend vorgeschlagener Prozessablauf zielt auf eine effiziente und harmonisierte Durchführung dieser Tests ab, um die Einhaltung der Normen und die Betriebssicherheit der HRS zu gewährleisten.

Um in Kapitel 3 die Prüferfordernisse für nicht-öffentliche HRS zu ermitteln, wurde zuerst nach einer allgemeingültigen Definition gesucht und die hier zutreffende Beschreibung der AFIR dann analysiert und eingeordnet. Anschließend wurden in den zutreffenden Rechtsgebieten beschriebene Vorgaben gesucht und zusammengetragen.

Entsprechend der Erkenntnisse konnten folgende Aussagen gemacht werden: Nicht-öffentliche Wasserstofftankstellen (HRS) betreffen eine klar begrenzte Nutzergruppe, wie Mitarbeiter oder befugte Personen, im Gegensatz zu öffentlich zugänglichen Ladestationen. Die für nicht-öffentliche Wasserstofftankstellen relevanten Rechtsquellen wie die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) gelten auch für öffentliche HRS.

Gemäß dem Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) und dem Gesetz über überwachungsbedürftige Anlagen (ÜAnlG) müssen diese Anlagen regelmäßigen Prüfungen unterzogen werden. Das ÜAnlG definiert überwachungsbedürftige Anlagen als solche, die gewerblichen Zwecken dienen und erhebliche Risiken für Sicherheit und Gesundheit mit sich bringen können.

Das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) ermächtigt den Gesetzgeber, spezifische Verordnungen wie die BetrSichV zu erlassen, die explizit regeln, welche Anlagen regelmäßig geprüft werden müssen. Explosionsgefährdete Anlagen, zu denen auch HRS gehören, müssen demnach regelmäßig von zugelassenen Überwachungsstellen (ZÜS) geprüft werden. Geräte nach der ATEX-Richtlinie benötigen mindestens alle drei Jahre eine Prüfung, Lüftungs- und Gaswarnanlagen sogar jährlich.

Der Stand der Technik, definiert durch die Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS), legt die Grundlage für die Prüfumfänge und -tiefen fest. Die aktuelle TRBS 3151 / TRGS 751 umfasst Anforderungen an Gasfüllanlagen und fordert, dass Betreiber eigenständig Gefährdungsbeurteilungen nach §3 BetrSichV durchführen.

Die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) ergänzt die BetrSichV durch spezifische Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten. Eine Gefährdungsbeurteilung nach §6 GefStoffV ist obligatorisch, und die Überprüfung technischer Schutzmaßnahmen mindestens alle drei Jahre vorgeschrieben. Die TRGS 407 unterstützt hierbei durch dezidierte Vorgaben zur Ermittlung von Gefährdungen und Maßnahmen.

Im Kapitel wurde abschließend auf die Gefährdungsbeurteilung in Anhang A verwiesen, welche potenzielle Gefährdungslagen im bestimmungsgemäßen Betrieb und für Abweichungen davon bei einem betrachteten Befüllungsvorgang an einer beispielhaften Wasserstofftankstelle zeigt. Dies bildet die Grundlage der Quantitativen Risikoanalyse in Anhang B.

Kapitel 4 befasste sich mit der Ermittlung der Erfordernisse bei zyklischen Überprüfungen nach DIN EN 17127. Dazu wurde speziell Abschnitt 7.1 der Norm analysiert, der wiederkehrende Inspektionen zur Gewährleistung der Interoperabilität nach Modifikationen oder Instandhaltungsarbeiten an HRS spezifiziert. Es wurde festgestellt, dass die gewählte Übersetzung des englischen Originals der EN 17127 dem wörtlichen, jedoch nicht dem inhaltlichen Sinn entspricht. Der Begriff „regelmäßige Inspektion“ als Entsprechung für „periodical inspection“ aus dem Englischen wurde als inhaltlich irreführend eingeschätzt und die Aussage umfassend begründet werden. Die bessere Übersetzung konnte mit „regelmäßigen Prüfungen“ herausgearbeitet werden. Eine Forderung nach wiederkehrenden Prüfungen an HRS besteht somit bereits.

Zur Ermittlung von häufigen Ereignissen und Mängeln wurden Datenbanken wie HIAD 2.1 (JRC), ZEMA (UBA) und der Anlagensicherheitsreport des TÜV-Verbands analysiert. Die wichtigste Erkenntnisquelle war die HIAD 2.1, mit 753 relevanten Ereignissen, darunter 13 spezifische für Betankungsprozesse. Die ZEMA-Datenbank enthält 16 Ereignisse ohne Bezug zu HRS.

Im Abschnitt 4.3 wurden Prüfberichte von vier Standorten analysiert. An zwei Anlagen waren Prüfungen noch nicht abgeschlossen; an den weiteren Anlagen wurden geringe bzw. keine Mängel festgestellt. Die bisherigen Berichte zeigten keine relevanten Mängel bezüglich Sensorik, Logik oder Aktorik.

Zudem wurden Interviews mit Herstellern, Betreibern und Wartungsfirmen durchgeführt, die aufzeigten, dass technische Ausfälle und Kommunikationsabbrüche häufig Ursachen für Betankungsabbrüche sind. Wartungsfirmen berichteten über Ausfälle der Sensorik, Logik und Aktorik, was auf eine ungenügende Performance der Anlagen hindeutet.

Zur Ermittlung eines Prüfindervalls beschäftigte sich Abschnitt 4.4 mit der Bestimmung der Prüfindervalle und -zyklen für Arbeitsmittel, die über ihre gesamte Lebensdauer sicher sein müssen. Es wurde erarbeitet, dass bei der Festlegung der Prüfindervalle mehrere Faktoren zu berücksichtigen sind, darunter gesetzliche Bestimmungen, Gefahrenpotenziale, Betriebsbedingungen und Herstelleranweisungen.

Für verschiedene Arten von Tankstellen (LNG, CNG und andere) wurden spezifische normative Vorgaben und Arbeitsblätter verglichen, die die Prüfindervalle bestimmen. Z. B. gelten für LNG-Tankstellen Prüfindervalle von bis zu drei Jahren. Ähnlich sind die Intervalle und Prüfanforderungen für andere Gasfüllanlagen und technische Überwachungsfunktionen festgelegt.

Zudem wurde im Rahmen einer methodischen Sicherheitsanalyse ein Prüfindervall für Wasserstofftankstellen basierend auf einer Fehlerbaumanalyse ermittelt. Diese Analyse verwendet mathematische Modelle, um die Verfügbarkeit und Ausfallwahrscheinlichkeiten der Systeme zu berechnen und kann im Anhang B nachgelesen werden. Das ermittelte Prüfindervall für solche Betankungssysteme beträgt nach der durchgeführten Analyse 36 Monate, was als praxistaugliches Intervall vorgeschlagen wird. Dieses Intervall soll ein hohes Sicherheitsniveau gewährleisten, und ist vergleichbar mit etablierten Prüffristen in anderen sicherheitsrelevanten Bereichen, um die Akzeptanz und Betriebssicherheit von Wasserstofftankstellen zu fördern.

Zum Kapitelabschluss wurde ein Textvorschlag für die zu erneuernde DIN EN 17127 erarbeitet, der in Tabelle 17 dargestellt ist und zusammengefasst folgende Konkretisierungen des jetzigen Normentextes vorschlägt:

- Erklärende Beschreibung des Begriffs „Inspektion“ im nationalen Vorwort und Definition als „unabhängige Prüfung durch kompetente und zugelassene Dritte“
- An nicht-öffentlichen HRS soll die Abgabereinrichtung maximal alle 36 Monate einer Inspektion zur Interoperabilität unterzogen werden.
- An öffentlichen HRS soll dies maximal alle 24 Monate erfolgen.
- Für Wiederholprüfungen wurde ein Vorschlag für ein reduziertes Prüfprogramm erarbeitet und vorgeschlagen. Dieses reduzierte Prüfprogramm soll auch bei baugleichen Abgabestellen an einem Standort zum Einsatz kommen.

Kapitel 5 befasste sich mit den Mindestumfängen und -anforderungen an Abnahmeprüfungen von HRS. Dazu wurden in Tabelle 18 bestehende SAT-Testdefinitionen nach DIN EN 17127, ISO 19880-1 und CEP-Testbeschreibungen verglichen und die Bewertung in Tabelle 19 dargestellt. Unterschiede und notwendige Anpassungen wurden aufgezeigt, insbesondere in Bezug auf die detaillierten Anforderungen für verschiedene Testarten. Relevante Unterschiede betreffen vor allem spezifische Tests wie Druckstoß und Kühlleistung. Anschließend wurden die Ergebnisse und notwendige Anpassungsbedarfe aus Sicht der Autoren formuliert.

Im nächsten Abschnitt wurden baugleiche Abgabestellen am gleichen Standort betrachtet. Bei mehreren baugleichen Abgabereinrichtungen an einem Standort kann der Prüfumfang reduziert werden. Eine reduzierte Testliste wurde vorgestellt (vgl. Tabelle 20), wobei die grundlegenden Sicherheits- und Funktionstests weiterhin durchgeführt werden müssen.

Eine Bewertung der FAT-Tests zeigte, dass die meisten Tests simulierbar sind. Voraussetzung ist eine geeignete Simulationsumgebung, die eine realistische Nachbildung der Tankstellensteuerung ermöglicht. Einige Tests, wie die Überprüfung der Reaktion auf zu hohen H₂-Durchfluss, können nur unter bestimmten technischen Bedingungen simulativ durchgeführt werden. Die Simulation von Tests ist ein entscheidender Schritt zur Minimierung des Testumfangs vor Ort, ohne die Sicherheit zu beeinträchtigen. Eine Übersicht über die Simulierbarkeit der Einzeltests wurde in Tabelle 22 gegeben. Als zusammengefasstes Ergebnis konnte erarbeitet werden, dass die ISO 19880-1:2020 FAT-Tests unter simulierten Bedingungen erlaubt, während SAT-Tests jedoch auf Grund normativer Vorgaben vor Ort durchgeführt werden müssen.

Bei der genauen Betrachtung der notwendigen Abnahmeprüfungen konnte festgestellt werden, dass geeignete mobile Hardware notwendig ist, die den Anforderungen von geänderten und zu ändernden Betankungsprotokollen genügt. Eine geeignete mobile Abnahmehardware muss diverse Anforderungen erfüllen, einschließlich sicherem Betrieb bei hohen Drücken und Massenströmen, Robustheit gegenüber Druckimpulsen und korrekter Datenaufzeichnung. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei unter anderem die gesetzliche Zulassung der Behälter dar, insbesondere im Bereich von 70 MPa-Systemen., dar. Diskutierte Lösungsansätze beinhalten die Verwendung von Automotive-Behältern unter Sondergenehmigung. Alternative Lösungen wie der Einsatz von Druckhalteventilen oder Rückführungen

von Wasserstoff könnten sinnvoll sein. Grundsätzlich ist die Abnahme von Betankungsanlagen für größere Speichersysteme in Fahrzeugen mit derzeitigen Abnahmeverfahren aus ökologischen und ökonomischen Gründen zu überdenken.

Als Fazit konnte festgestellt werden, dass regelmäßige Prüfungen an Wasserstofftankstellen bereits heute gefordert sind und wesentlich dazu beitragen, die Sicherheit während der gesamten Lebensdauer der Anlagen sicherzustellen. Hier ist bei der kommenden Überarbeitung von DIN EN 17127 die Übersetzung entsprechend anzupassen, um der inhaltlichen Aussage im englischsprachigen Original Genüge zu tun gerecht zu werden.

Historische Betriebsdaten und risikoanalytische Methoden wie die Fehlerbaumanalyse (FTA) helfen, praxisgerechte Prüfintervalle zu ermitteln. Für HRS wurde ein Prüfintervall von 24 bzw. 36 Monaten basierend auf Ausfallwahrscheinlichkeiten und möglichen Risiken vorgeschlagen. Ein Textvorschlag für die Aufnahme in die zu überarbeitende DIN EN 17127 kann in Tabelle 17 eingesehen werden.

Es wurde weiterhin empfohlen, die Testdefinitionen für SAT anzupassen, um neue Befüllungsprotokolle zu berücksichtigen und ein vereinfachtes Verfahren für baugleiche Abgabeeinrichtungen festzulegen. Für FAT sollten Tests nach Möglichkeit simulativ durchgeführt werden. Zudem ist eine kontinuierliche Anpassung der Spezifikationen an neue Betankungsprotokolle notwendig. Problematisch ist die fehlende gefahrgutrechtliche Zulassung von 70 MPa-H₂-Behältern, was in Zusammenarbeit zwischen Herstellern, Überwachungsstellen und Behörden gelöst werden muss. Es sollten geeignete Verfahren für Abnahmeprüfungen zur Betankung größerer Speichersysteme entwickelt werden, wobei umwelttechnische und wirtschaftliche Interessen berücksichtigt werden.

Insgesamt ist ein koordinierter Ansatz notwendig, um die Prüfverfahren und Abnahmehardware kontinuierlich weiterzuentwickeln und den Anforderungen neuer Technologien und Protokolle gerecht zu werden.

7 Literaturverzeichnis

- 2023/1804/EU. (September 2023). *VERORDNUNG (EU) 2023/1804 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. September 2023 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU.*
- AUTO BILD. (7. April 2023). *Wie schnell das Wasserstoff-Tankstelle-Netz wächst.* Von [https://www.autobild.de/artikel/wasserstoff-tankstelle-brennstoffzelle-h2-elektroauto-emission-21742143.html#:~:text=Die%20Wasserstoff%2DInfrastruktur%20w%C3%A4chst%20deutlich,%2DTankstellen%20\(Stand%3A%201%20abgerufen](https://www.autobild.de/artikel/wasserstoff-tankstelle-brennstoffzelle-h2-elektroauto-emission-21742143.html#:~:text=Die%20Wasserstoff%2DInfrastruktur%20w%C3%A4chst%20deutlich,%2DTankstellen%20(Stand%3A%201%20abgerufen)
- BetrSichV. (03. Februar 2015). *Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV).*
- Clean Energy Partnership (CEP). (August 2022). *Memo, List of Requirements for ambient refueling.* Von <https://cleanenergypartnership.de/>: <https://cleanenergypartnership.de/wp-content/uploads/2022/08/CEP-Requirements-for-Refuelling-at-Ambient-Temperatures-v1.2.pdf> abgerufen
- Clean Energy Partnership (CEP). (9. März 2024). *Berichtsvorlagen PKW-HRS und HD-HRS.* Von <https://cleanenergypartnership.de/>: <https://cleanenergypartnership.de/gepruefte-tankstellen-abnahmen> abgerufen
- DIN EN 17127:2019. (September 2019). *Wasserstofftankstellen im Außenbereich zur Abgabe gasförmigen Wasserstoffs und Betankungsprotokolle umfassend; Deutsche Fassung EN 17127:2018.* Deutschland: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- EN 17127:2020. (November 2020). *Outdoor hydrogen refuelling points dispensing gaseous hydrogen and incorporating filling protocols.* Europa: CEN-CENELEC.
- Ermittelte Regeln und Erkenntnisse des Regelermittlungsausschusses nach § 46 des Mess- und Eichgesetzes. (8. August 2022). Braunschweig und Berlin, Deutschland: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Von <https://doi.org/10.7795/510.20221202> abgerufen
- European Commission, Joint Research Centre (JRC). (23. September 2023). *HIAD 2.1 - Hydrogen Accidents and Incidents Database.* Von <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/1d6b06e9-3a89-4ec2-b051-3fb8a28eab9f> abgerufen
- GefStoffV. (26. November 2010). *Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV).* Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- Greisel, M., & Gebhard, M. (9. November 2022). *Technical Report: Minimum Ambient Precooling (MAP) Hydrogen Refueling Protocol for 35MPa Heavy Duty Vehicles (20-42.5 kg), Wenger Engineering GmbH Ulm im Auftrag der CEP, v1.41.* Von <https://cleanenergypartnership.de/>: https://cleanenergypartnership.de/wp-content/uploads/2022/11/2022-11-09_MGR_MAP-Fueling-Protocol-for-35-MPa-Heavy-Duty-Vehicles-20-42.5kg_Wenger-Engineering_Rev1.41-min.pdf abgerufen
- H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG. (2024). <https://h2.live/>. Abgerufen am 6. März 2024 von <https://h2.live/>
- H2Tools. (März 2024). *HyStEP Device - HYDROGEN STATION EQUIPMENT PERFORMANCE.* Von <https://h2tools.org/>: <https://h2tools.org/hystep-hydrogen-station-equipment-performance-device> abgerufen
- International Energy Agency. (Dezember 2023). *Global Hydrogen Review 2023.*
- ISO 19880-1. (März 2020). *Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 1: General requirements.* Schweiz: ISO International Organization for Standardization.
- Krafftahrt-Bundesamt. (16. April 2024). *Pressemitteilung Nr. 14/2024.* Von Neuzulassungen von Personenkraftwagen (Pkw) im Jahresverlauf 2024 nach Marken und alternativen Antrieben: https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/AlternativeAntriebe/2024/pm14_2024_Antriebe_03_24_komplett.html?snn=3662144 abgerufen
- Mattelaer, V. (Dezember 2023). *Folien und Seminar der CEP zur SAE J2601-5.* Von <https://cleanenergypartnership.de/>: <https://cleanenergypartnership.de/wp-content/uploads/2023/12/CEP-SAE-J2601-5-Training-Session-Vincent-Mattelaer.pdf> abgerufen
- Maximator. (kein Datum). Veröffentlichung 2021 (Platzhalter).

- Richtlinie (EU) 2014/94. (22. Oktober 2014). *RICHTLINIE 2014/94/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe*. Brüssel, Belgien: Europäisches Parlament und Europäischer Rat.
- SAE J2601-1 (2020). (Mai 2020). *Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles*. North America: SAE International.
- SAE J2601-2 (2014). (September 2014). *Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles*. North America: SAE International.
- SAE J2601-3 (2022). (September 2022). *Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks*. North America: SAE International.
- SAE J2601-5 (TIR 2024). (Februar 2024). *High-Flow Prescriptive Fueling Protocols for Gaseous Hydrogen Powered Medium and Heavy-Duty Vehicles*. North America: SAE International.
- SAE J2799. (April 2014). *Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software*. North America: SAE International.
- SAE J2799. (Juni 2024). *Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software*. North America: SAE International.
- TRBS 1201 Teil 2. (Juli 2018). *Prüfungen und Kontrollen bei Gefährdungen durch Dampf und Druck*. Deutschland: Bundesministerium für Arbeit und Soziales.
- TRBS 3151/TRGS 751. (26. März 2024). *Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Gasfüllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen*. Deutschland: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- TRGS 407. (Februar 2016). *Tätigkeiten mit Gasen - Gefährdungsbeurteilung*. Deutschland: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (01.2024). *Plausibilitätsprüfung nach DIN EN 17127 - Validierung der SAT-Tests – EQ 4599478*. Berlin.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (05.2023). *Bericht über die Prüfung von sicherheitsrelevanten Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen – EQ 4552621*. Potsdam.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (05.2023). *Bescheinigung über die Prüfung einer Füllanlage – EQ 4552595*. Potsdam.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (05.2023). *Prüfbescheinigung Explosionssicherheit – EQ 4552618*. Berlin.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (05.2023). *Prüfbescheinigung sekundärer Explosionsschutz – EQ 4552619*. Potsdam.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (07.2022). *Bericht über die Prüfung von sicherheitsrelevanten Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen – EQ 4437482*. Potsdam.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (07.2022). *Bescheinigung über die Prüfung einer Füllanlage – EQ 4143989*. Potsdam.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (07.2022). *Prüfbescheinigung Explosionssicherheit – EQ 4437481*. Potsdam.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (07.2022). *Prüfbescheinigung sekundärer Explosionsschutz – EQ 4437480*. Potsdam.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (10.2023). *Plausibilitätsprüfung nach DIN EN 17127 – TÜV Rheinland - Validierung der FAT-Tests – EQ 4599477*. Berlin.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (11.2023). *Bericht über die Prüfung von sicherheitsrelevanten Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen – EQ 4617710*. Potsdam.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (11.2023). *Bescheinigung über die Prüfung einer Füllanlage – EQ 4617664*. Potsdam.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (11.2023). *Plausibilitätsprüfung nach DIN EN 17127 - Validierung der FAT-Tests – EQ 4599476*. Berlin.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (11.2023). *Plausibilitätsprüfung nach DIN EN 17127 - Validierung der SAT-Tests – EQ 4599479*. Berlin.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (11.2023). *Prüfbescheinigung Explosionssicherheit – EQ 2961865*. Potsdam.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (11.2023). *Prüfbescheinigung Explosionssicherheit – EQ 4318053*. Potsdam.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (11.2023). *Prüfbescheinigung sekundärer Explosionsschutz – EQ 4577835*. Potsdam.

- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (11.2023). *Prüfbescheinigung sekundärer Explosionsschutz – EQ 4617709*. Potsdam.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (12.2023). *Plausibilitätsprüfung nach DIN EN 17127 - Validierung der FAT-Tests – EQ 4597374*. Berlin.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (12.2023). *Plausibilitätsprüfung nach DIN EN 17127 - Validierung der SAT-Tests – EQ 4597377*. Berlin.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (15. März 2024). *Fragenkatalog - Betreiber – APEX Energy Teterow GmbH*. Potsdam, Brandenburg, Deutschland.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (21. März 2024). *Fragenkatalog - Betreiber – H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG – 21.03.2024*. Potsdam, Brandenburg, Deutschland.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (19. März 2024). *Fragenkatalog - Hersteller – Linde Hydrogen FuelTech GmbH*. Potsdam, Brandenburg, Deutschland.
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH. (12. März 2024). *Fragenkatalog - Wartungsfirma – KR-Technik*. Potsdam, Brandenburg, Deutschland.
- TÜV-Verband e. V. (Juni 2023). *Anlagensicherheitsreport*. Von <https://www.tuev-verband.de/anlagen/anlagentechnik/ek-zues/anlagensicherheits-report> abgerufen
- TÜV-Verband e.V. (13. Dezember 2022). *ZÜS-BE-004 rev 4. Mängelklassifizierung, resultierende Maßnahmen und Beispiele der MängelEinstufung für Prüfungen von Anlagen nach Anhang 2 Abschnitt 3 BetrSichV durch ZÜS*. Berlin, Berlin, Deutschland.
- ÜAnIG. (27. Juli 2021). *Gesetz über überwachungsbedürftige Anlagen (ÜAnIG)*.
- Umweltbundesamt. (März 2024). *Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen (ZEMA)*. Von <https://www.infosis.uba.de/index.php/de/zema/index.html> abgerufen
- Verordnung (EU) 2023/1804. (13. Juli 2023). *Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU*. Brüssel, Belgien: Europäisches Parlament und Europäischer Rat.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: H ₂ -Zapfsäule, zwischen herkömmlichen Zapfsäulen angeordnet, mit Abnahmegerät FSTM .9	
Abbildung 2: Grobschema H ₂ -Tankstelle, insbesondere Abgabeeinrichtung mit Messparametern	10
Abbildung 3: Übersicht geltender und kommender Normen rund um Wasserstoffbetankungsstationen	14
Abbildung 4: aktuell beteiligte Funktionen an HRS Abnahmen	16
Abbildung 5: Beispiele für aktuell beteiligte Stellen an HRS Abnahmen	17
Abbildung 6: Grundsätzlicher Ablauf und Schritte einer Abnahmeprüfung	17
Abbildung 7: Abnahmegerät Fuelling Station Test Module (FSTM) des ZSW	23
Abbildung 8: Übersicht zu Verantwortlichkeiten bei FAT nach ISO 19880-1 an HRS	27
Abbildung 9: Übersicht zu Verantwortlichkeiten bei SAT nach (DIN) EN 17127 an HRS	28
Abbildung 10: Übersicht zu Abläufen bei FAT nach ISO 19880-1 an HRS	31
Abbildung 11: Übersicht zu Abläufen bei SAT nach (DIN) EN 17127 an HRS	32
Abbildung 12: Übersicht zu Kompetenzen bei FAT nach ISO 19880-1 an HRS	33
Abbildung 13: Übersicht zu Kompetenzen bei SAT nach (DIN) EN 17127 an HRS	35
Abbildung 14: Prozessvorschlag für zukünftige SAT und FAT	36
Abbildung 15: Festgestellte Mängel bei wiederkehrenden Prüfungen an Gasfüllanlagen in 2022	47
Abbildung 16: Festgestellte Mängel bei wiederkehrenden Prüfungen an Gasfüllanlagen seit 2018	47
Abbildung 17: Zeitl. Verlauf Nichtverfügbarkeit einer Komponente mit und ohne Funktionsprüfung	59
Abbildung 18: zukünftige Abnahmehardware	73
Abbildung 19: Entwicklung der Anzahl H ₂ -Tankstellen weltweit, Stand Juni 2023	Anhang C
Abbildung 20: durch H2 Mobility erfasste HRS in Europa	Anhang C

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Begriffsbestimmungen laut Normen	10
Tabelle 2: Übersicht heute anwendbarer Betankungsprotokolle	15
Tabelle 3: DIN EN 17127, Mindestprüfungen zur Gewährleistung der Interoperabilität	18
Tabelle 4: derzeitige SAT-Prüfliste basierend auf DIN EN 17127, detailliert CEP / ZSW	19
Tabelle 5: Übersicht neuer Füllprotokolle	24
Tabelle 6: Übersicht zu wiederkehrenden Prüferfordernissen von nicht-öffentlich Wasserstofftankstellen mit Bezug zur Explosionssicherheit bzw. technischer Schutzmaßnahmen	42
Tabelle 7: Zur Auswertung verwendete Datenbanken	45
Tabelle 8: Übersicht der Prüfungen am Standort Anlage 1	48
Tabelle 9: Übersicht der Prüfungen am Standort Anlage 2	49
Tabelle 10: Übersicht der Prüfungen am Standort Anlage 3	50
Tabelle 11: Übersicht der Prüfungen am Standort Anlage 4	50
Tabelle 12: Analyse bestehender normativer Prüfintervalle an technisch ähnlichen Anlagen	54
Tabelle 13: Übersicht über erforderliche Prüfintervalle verschiedener technischer Anlagen mit Überwachungsfunktionen - Teil A	55
Tabelle 14: Übersicht über erforderliche Prüfintervalle verschiedener technischer Anlagen mit Überwachungsfunktionen - Teil B	56
Tabelle 15: Übersicht über erforderliche Prüfintervalle verschiedener technischer Anlagen mit Überwachungsfunktionen - Teil C	57
Tabelle 16: Vergleichende Übersicht vorhandener Prüfintervalle	62
Tabelle 17: Textvorschlag für Anpassung DIN EN 17127	64
Tabelle 18: Gegenüberstellung bestehender Testdefinitionen, Stand 03/2024	65
Tabelle 19: Anpassungsbedarfe durch Bewertung der CEP-Testdefinition zu Protokollen	67
Tabelle 20: reduziertes SAT-Testprogramm bei baugleichen H2-Abgabeeinrichtungen an einem Standort	68
Tabelle 21: technische Bewertung FAT hinsichtlich simulativer Tests, Auszug	69
Tabelle 22: Überblick zur Simulierbarkeit der Einzeltests nach formalen Kriterien	71
Tabelle 23: detaillierte Testbeschreibung für Werksabnahmen, Auszug	Anhang C

10 Abkürzungsverzeichnis

BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
CcH ₂	Kryokomprimierter Wasserstoff (engl. cyro-compressed hydrogen)
CGH ₂	Komprimierter gasförmiger Wasserstoff (engl. compressed gaseous hydrogen)
CHSS	H ₂ -Fahrzeugtanksystem (engl. compressed hydrogen storage system)
CEP	Clean Energy Partnership
HRS	Wasserstoff-Tankstelle bzw. H ₂ -Gasfüllanlage (engl.: Hydrogen Refuelling Station)
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LH ₂	Flüssigwasserstoff (engl. liquid hydrogen)
sLH ₂	Tiefkalter Flüssigwasserstoff (engl. subcooled Liquid Hydrogen)
Lkw	Lastkraftwagen
OEM	Original equipment manufacturer (dt. Fahrzeughersteller)
Pkw	Personenkraftwagen
PRHYDE	Protocol for Heavy-duty Hydrogen Refuelling
SOC	Füllstand (engl. state of charge)
TRBS	Technische Regeln für die Betriebssicherheit
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TRL	Technologie-Reifegrad (engl. technology readiness level)
ZÜS	Zugelassene Überwachungsstelle

11 Anhang A - Gefährdungsbeurteilung nach TRGS 407 für eine nicht-öffentliche Wasserstofftankstelle

[separates Dokument](#)

12 Anhang B - Quantitative Risikoanalyse für eine Wasserstofftankstelle

[separates Dokument](#)

13 Anhang C - ergänzende Information zu Arbeitspaket 1

[separates Dokument](#)

14 Anhang D – Detailanalyse der Einzeltests nach ISO 19880-1:2020

[separates Dokument](#)

Anhang A - Gefährdungsbeurteilung nach TRGS 407 für eine nicht-öffentliche Wasserstofftankstelle

Die TRGS 407 konkretisiert im Rahmen ihres Anwendungsbereichs Anforderungen der Gefahrstoffverordnung. Danach hat im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung als Bestandteil der Beurteilung der Arbeitsbedingungen nach § 5 des Arbeitsschutzgesetzes ein Arbeitgeber festzustellen, ob die Beschäftigten Tätigkeiten mit Gefahrstoffen ausüben oder ob bei Tätigkeiten Gefahrstoffe entstehen oder freigesetzt werden können. Ist dies der Fall, so hat er alle hiervon ausgehenden Gefährdungen der Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten zu beurteilen. Dazu gehört nach § 6 GefStoffV auch, die gefährlichen Eigenschaften der Stoffe oder Gemische, einschließlich ihrer physikalisch-chemischen Wirkungen zu ermitteln.

Ziel dieses Anhangs ist die Ermittlung von potenziellen Freisetzungsszenarien während eines Betankungsvorganges an Wasserstofftankstellen.

Wasserstofftankstelle (HRS)/Gasfüllanlage

Der technische Aufbau, die Prozessabläufe sowie die Funktionsweise einer Wasserstofftankstelle unterscheiden sich nur unwesentlich von anderen Gasfüllanlagen. Abbildung 1 zeigt den Aufbau.

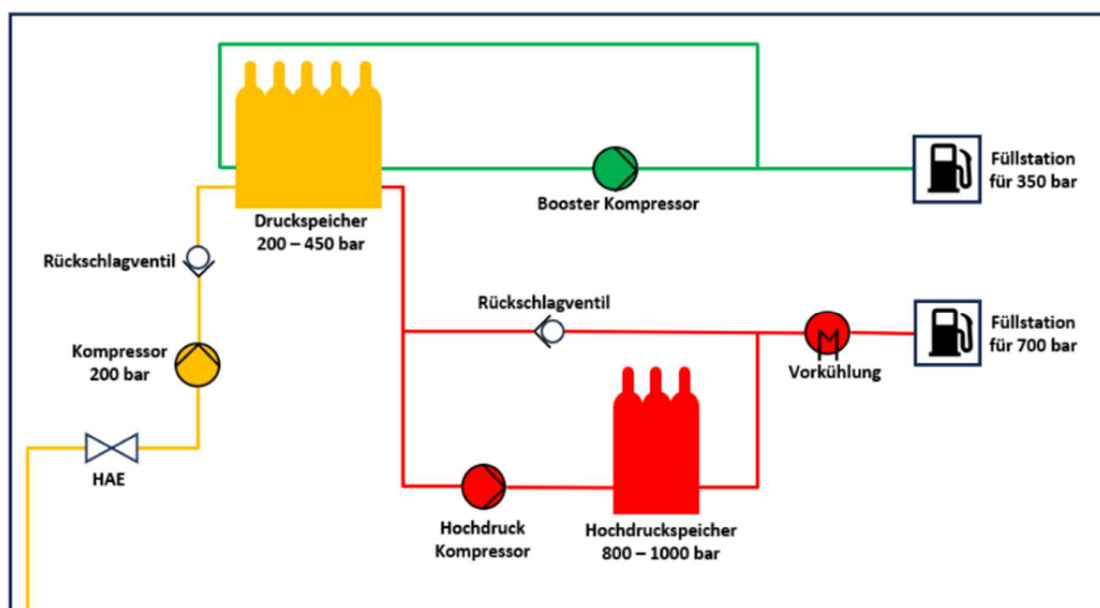


Abbildung 1: Beispiel einer Wasserstoff-Füllanlage (Quelle: DVGW-G 731)

Gefahrstoffeigenschaften

Zunächst werden die Gefahrstoffeigenschaften ermittelt. Das Ergebnis zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Sicherheitstechnisch relevante Eigenschaften zur Beurteilung von Gefährdungen bei Tätigkeiten mit gasförmigen Wasserstoff (*Quelle:* GESTIS-Stoffdatenbank und TRGS 407/TRGS 722)

Eigenschaft	Wert
Kritische Temperatur	-239,9°C
Siedepunkt	-252,8°C
Eigenschaft	Wert
Kritischer Druck	12,96 bar
Rel. Dichte (Luft = 1)	0,07
Wahrnehmbarkeit	farb- und geruchlos
Zündtemperatur im Gemisch mit Luft bei einem Standarddruck von 1,013 bar	560°C
Grenzspaltweite	0,29 mm
Explosionsbereich in Luft bei 20 °C und einem Standarddruck von 1,013 bar	UEG: 4,0Vol-% (3,4 g/m ³) OEG: 77,0 Vol-% (65 g/m ³)
Maximaler Explosionsdruck	8,3 bar
Sauerstoffgrenzkonzentration im Gesamtgemisch brennbarer Gefahrstoff/ Inertgas/Luft bei der Inertisierung	mit Stickstoff: C _{max} O ₂ = 4,3 mol % mit CO ₂ : C _{max} O ₂ = 5,2 mol %
Mindestzündenergie im Gemisch mit Luft	0,019 mJ
Explosionsgruppe	IIC
Temperaturklasse	T1
Besonderheiten	Extrem entzündbares Gas. Gefährliche chemische Reaktionen mit zahlreichen Stoffen insbesondere Oxidationsmitteln und Lithium. Auftreten von Deflagration-to-Detonation-Transmission-Effekten (DDT). Bei hohen Ausströmgeschwindigkeiten Gefahr der Selbstentzündung. Im Gemisch mit stark oxidierenden Gasen, wie Sauerstoff (Knallgas), Chlor (Chlorknallgas), Distickstoffoxid und Stickstofftetroxid, erfolgt bei thermischer oder katalytischer Zündung heftige Explosion, mit Chlor bereits bei Lichteinwirkung. Wasserstoffflammen sind sehr fahl und im hellen Tageslicht kaum sichtbar. Nur geringfügig löslich in Wasser.

Die Zuordnung nach Anhang 1 der TRGS 407 ist: „Permanentgase, Gruppe 1.2: entzündbar“

Gefährdungsermittlung

Erkenntnisse über Schadensursachen aus einschlägiger Betriebserfahrung aber auch aus anderen Quellen sollen nach TRGS 407 als Unterstützung bei der Gefährdungsbeurteilung und der Auswahl geeigneter Schutzmaßnahmen genutzt werden. Hierbei sind für Wasserstoffanlagen zu nennen:

1. HIAD - Hydrogen Incident and Accident Database
(URL: <https://hysafe.info/hiad-2-0-free-access-to-the-renewed-hydrogen-incident-and-accident-database/>)
2. Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen (ZEMA) - Umweltbundesamt (URL: <https://www.infosis.uba.de/index.php/de/site/12981/zema/index.html>)

Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gasen können sich insbesondere ergeben durch die Betriebsweise inkl. An- und Abfahrvorgänge, Konstruktion, Handhabung, Errichtung und Instandhaltung ergeben.

Im Ergebnis dieser Aspekte werden folgende Gefährdungen als vorhanden bewertet.

Tabelle 2: Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gasen an Wasserstofftankstellen:

Nr.	Gefährdungsursache	Gefährdung an HRS vorhanden?	Beim Betankungsvorgang relevant?
1	Druck von Gasen in Druckgasbehältern oder Druckanlagen	ja	ja
2	betriebsbedingte Freisetzung von Gasen	ja	möglich
<p>TRGS 407 Abschnitt 3.2.4: Der Arbeitgeber hat zu ermitteln, welche Mengen von Gasen bei bestimmungsgemäßem Betrieb betriebsbedingt austreten. Dabei hat er insbesondere zu berücksichtigen:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Füll- und Entleervorgänge, 2. temperaturbedingte Ausdehnungen, 3. Dichtheit des Druckgasbehälters oder der Druckanlage, 4. Spül- und Reinigungsvorgänge, 5. Entspannung von Rohrleitungen, 6. regelmäßig vorhergesehene Instandhaltungsarbeiten. 			
3	Freisetzung von Gasen z. B. durch unbeabsichtigtes Öffnen von unter Druck stehenden Anlagenteilen	ja	nein
4	Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb (Abweichungen von den zu lässigen Betriebsparametern, Undichtigkeiten) und störungsbedingte Freisetzung von Gasen	ja	möglich
<p>TRGS 407 Abschnitt 3.2.4: Der Arbeitgeber hat darüber hinaus zu ermitteln, inwieweit durch vernünftigerweise nicht auszuschließende Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb größere Mengen von Gasen austreten können. Als vernünftigerweise nicht auszuschließende Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb sind insbesondere</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Leckagen (z. B. an Ventilen, Flanschverbindungen oder anderen Dichtflächen o der durch Korrosion), 2. Freisetzung von Gasen beim Öffnen von Anlagenteilen (z. B. durch nicht erkannten Überdruck oder Fehlbedienung), 3. Ansprechen von Sicherheitseinrichtungen, wie z. B. Sicherheitsventile oder Berstscheiben, 4. Abriss von Schlauchverbindungen, 5. Überschreiten zulässiger Füllungsgrade <p>auf Relevanz zu überprüfen und erforderlichenfalls zu berücksichtigen.</p>			
5	Einwirkungen von außerhalb auf den Druckgasbehälter oder die Druckanlage	ja	möglich
<p>TRGS 407 Abschnitt 3.2.5: Als Einwirkungen sind insbesondere zu betrachten:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Brand im Umfeld der Druckanlage, 2. umgebungsbedingt wahrscheinliche Naturereignisse wie Blitzeinschlag, Hochwasser oder Erdbeben, 3. Einwirkung durch Unbefugte, 4. Energieeinwirkungen aus anderen Anlagen oder Tätigkeiten, 5. Zwischenfälle mit kraftbetätigten Fahrzeugen. 			
6	Mischen von Gasen	nein	nein

Nr.	Gefährdungsursache	Gefährdung an HRS vorhanden?	Beim Betankungsvorgang relevant?
7	erstickende Wirkung durch Verdrängung von Luftsauerstoff	nein	nein
8	unsachgemäße Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten	ja	möglich (z.B. Test während der Wartung)

Besondere Gefährdungen durch Tätigkeiten mit gasförmigem Wasserstoff

Innerhalb der Wasserstofftankstelle sind nachfolgende Umstände mit zu berücksichtigen:

- Selbstentzündung bei isentroper/überkritischer Freisetzung möglich,
- Verzögerte Zündung (Gaswolkenbildung),
- bei gegebener räumlicher Verdämmung und verzögerter Zündung: Auftreten
von DDT-Phänomenen möglich sowie
- Schutzobjekt (Mensch) befindet sich in unmittelbarer Nähe zur Zapfsäule bzw. dem zu betankenden Fahrzeug (i.d.R.: im Umkreis < 3 m)¹.

Gefährdungslagen im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung bei bestimmungsgemäßem Betrieb

Nachfolgend wird auf die in Tabelle 2 Nr. 2 identifizierten Gefährdungsursachen näher eingegangen.

Die erarbeiteten Gefährdungslagen und die dazugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten werden in diesem Kapitel beschrieben. Es wird eine Klassifizierung von zu untersuchenden der Szenarien vorgenommen, sodass jeweils ein spezifisches Auswirkungsmerkmal zugewiesen werden kann.

Vorab ist darauf zu verweisen, dass alle Leitungen im Dispenser so ausgeführt werden, dass ein Druck von 1.300 bar widerstanden werden kann. D.h. selbst bei Versagen aller Sicherheitsventile ist bei einer Verdichter seitigen Druckerhöhung, die geringer ist als der Auslegungsdruck, keine Schädigung der Verbindungsleitung zu erwarten. Daher werden im Folgenden die Austrittsszenarien bei vorhandenem Leck/Undichtigkeit bzw. vollständigem Abriss diverser Teile der Betankungsstation betrachtet.

Die beiden Obergruppen von Schadensauswirkungen, die im Verlauf eines Ereignisses die Auswirkungsbetrachtung maßgeblich beeinflussen, sind die Freistrahlf Flamme und die Explosion in einer Gaswolke. Während bei kleinen Leckagen immer eine Freistrahlf Flamme zugewiesen werden kann, sind vollständige Abrisse o.ä. der Gaswolkenexplosion zuzuordnen.

Die Größe von angenommenen Leckagen wird unterteilt. Hierzu werden drei Annahmen getroffen, die in der quantitativen Risikoanalyse etabliert sind. Erstens eine Kleinstleckage die als Pinhole/Crack bezeichnet wird, zweitens eine Leckage durch ein entstandenes Loch (Hole) und drittens die katastrophale Leckage durch einen Abriss (Rupture). Diesen drei Kategorien werden verschiedene Freisetzungsszenarien zugeordnet, um die Auswirkungsbetrachtung zu kategorisieren. Für Kategorie 1 und 2 ist dazu noch eine Unterscheidung in „Leck an Verbindungsteilen“ und „Leck an Rohrleitung“ vorgenommen worden. Die verschiedenen Kategorien sind in Tabelle 3 aufgeführt.

¹ Eine rechtzeitige Fluchtmöglichkeit wird aufgrund der erschwerten Wahrnehmbarkeit von Druckwasserstoff als unwahrscheinlich angesehen.

Tabelle 1: Kategorisierung von Leckagen (*Quelle:* HyRAM²)

Leckort	Leckgröße	Eintrittshäufigkeiten/a
Flansche	Klein (1%)	2,0E-3
Rohrleitung/Schlauch	Klein (1%)	2,1E-6/2,0E-4
Instrumente/Ventil	Klein (1%)	1,7E-4/1,0E-4
Flansche	Groß (10%)	3,5E-5
Rohrleitung/Schlauch	Groß (10%)	9,4E-7/1,8E-4
Instrumente/Ventil	Groß (10%)	1,8E-4/3,0E-5
Bruch/Abriss Rohrleitung/Schlauch	100%	8,1E-7/1,0E-4

Das bedeutet, dass Leckagen an Flanschen, Schläuchen und Instrumenten relativ hohe Eintrittswahrscheinlichkeiten besitzen.

Erarbeitung von Gefährdungslagen nach TRGS 407

Für Betankungsvorgänge legt DIN EN 17127 „Wasserstofftankstellen im Außenbereich zur Abgabe gasförmigen Wasserstoffs und Betankungsprotokolle umfassend“ die technischen Maßnahmen zur Überwachung des Betankungsvorgangs fest.

Diese technischen Maßnahmen geben in Abschnitt 5.3 Funktionalanforderungen an die einzuhaltenden Betriebsparameter vor. Aufbauend auf diesen Funktionalanforderungen und den in TRGS 407 aufgeführten Gefahrenquellen, werden in Tabelle 4 die potenziellen betrieblichen Freisetzungsszenarien ermittelt.

² <https://energy.sandia.gov/programs/sustainable-transportation/hydrogen/hydrogen-safety-codes-and-standards/hyram/>

Tabelle 4: Ermittlung von Freisetzungsszenarien während der Betankung von Fahrzeugen für die betriebsbedingte Freisetzung von Gasen

Nr.	Gefahrenquelle	Relevant (ja/nein)	Identifizierung und kurze Beschreibung der Gefahren	Bezug in DIN EN 17127
1.	Füll- und Entleervorgänge	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Austritt von Wasserstoff beim Teststoß von 200 g. Wenn eine Undichtigkeit vorliegt, die mittels dieses Teststoßes erkannt werden kann. Undichtigkeiten während des Betankungsvorgangs durch Verdrehen oder bewegen der Schlauchleitung oder des Schlauchanschlusses Austreten von Wasserstoff bedingt durch zu hohe Fließgeschwindigkeiten.	5.3.2 Abschn. 5 Spiegelstrich 4 Teststoß 5.3.2 Abschn. 5 Spiegelstrich 9
2.	Temperaturbedingte Ausdehnungen	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Alle Wasserstofftanks liegen oberirdisch und sind damit theoretisch nicht direkt gegen eine Unterfeuerung geschützt. Des Weiteren kann es zum Ausfall des Kühlsystems für den Hochdruckspeicher und des Fahrzeugs kommen, wodurch eine temperaturbedingte Ausdehnung stattfinden würde. Jedoch würde in diesem Fall der Tankvorgang abgebrochen.	Siehe 5.3.1 Abschnitt 3 5.3.2 Abschn. 5 Spiegelstrich 1, 3, 5, 5.3.6
3.	Dichtheit des Druckgasbehälters oder der Druckanlage (siehe auch TRGS 722 Nummer 2.4.3)	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Die unterschiedlichen Druckgeräte (H ₂ Vorratsspeicher (200 bar); Mitteldruckspeicher (550 bar); Hochdruckspeicher (975 bar); Druckluftspeicher (12 bar); Hauptwärmetauscher zw. Wasserstoff und Kühlmedium; Wärmetauscher hinter Verdichter/Kompressor; Ausrüstung der Abgabereinrichtung (Abreißkupplung, Füllschlauch, Füllkupplung); Sicherheitsventile können Undichtigkeiten aufweisen. Ebenso kann es zu Undichtigkeiten des Fahrzeugtanks kommen.	5.3.5
4.	Spül- und Reinigungsvorgänge	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Spül- und Reinigungsvorgänge sind vorgesehen und beinhalten in der Regel eine Austrittsmenge von <10 g Wasserstoff. Für das Ableiten des Wasserstoffs ist ein Abblasekamin vorgesehen. Diese Vorgänge werden meist im Zusammenhang mit regelmäßigen Instandhaltungsarbeiten ausgeführt.	Siehe 7.1 Abschnitt 4
5.	Entspannung von Rohrleitungen	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein	Erst nach Beendigung des eigentlichen Betankungsvorganges wird die Gasstrecke ab Absperr-/Drosselventil nach Vorkühler entspannt. Gehört nicht zum Mindestumfang nach Tabelle. 1 der DIN EN 17127.	
6.	regelmäßig vorhergesehene Instandhaltungsarbeiten	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Instandhaltungsmaßnahmen sind vorgesehen und beinhalten in der Regel eine Austrittsmenge von <10 g Wasserstoff. Für das Ableiten des Wasserstoffs ist ein Abblasekamin vorgesehen	Siehe 7.1 Abschnitt 4

Füll- und Entleervorgänge

Das Befüllen des Tankbehälters erfolgt über einen fest gekoppelten Anschluss im Schlauchsystem. Vor Beginn des Tankvorgangs wird ein Teststoß in die Leitung gegeben, um das System auf etwaige Undichtigkeiten zu testen. Dieser Teststoß soll nach DIN EN 17127 nicht größer sein als 200 g H₂. Sollte eine vollständige Undichtigkeit im

System vorhanden sein würden max. 200 g Wasserstoff freigesetzt werden. Aufgrund der geringen Freisetzungsmenge und der hohen Flüchtigkeit des Wasserstoffs, ist die Ansammlung relevanter Mengen zu vernachlässigen.

Undichtigkeiten, die während des Betankungsvorgangs auftreten, wie etwa durch Verdrehen des Schlauchs oder unsachgemäßer Anschluss an den Stutzen müssen durch das Betankungssystem zuverlässig erkannt werden. Für diesen Fall ist eine Abschaltung des Tankvorgangs innerhalb von 5 s vorgesehen. Aufgrund der geringen Menge, die in diesem Zeitraum erreicht wird und der Größe des Fehlers, die durch den Teststoß nicht detektiert wurde ist die Bildung von relevanten Gasmengen sehr unwahrscheinlich.

Temperaturbedingte Ausdehnung

Eine Temperaturbedingte Ausdehnung kann in zwei Fälle unterteilt werden. Zum einen ist eine deutliche Übertemperatur erforderlich, um durch die Temperaturerhöhung einen nennenswerten Druckanstieg zu verursachen. Dies kann zum Beispiel durch Unterfeuerung geschehen. Da Wasserstofftankstellen auf dem Betriebsgelände von Diesel/Benzin Zapfsäulen aufgestellt werden, ist ein Versagen, bzw. ein Brand resultierend aus dem Versagen, einer Diesel-/Benzin-Sicherheitseinrichtung zu betrachten. Hierdurch könnte eine Unterfeuerung der Zapfsäule entstehen. Der Mechanismus der Unterfeuerung kann theoretisch bei allen Speichern und Zwischenspeichern (Lagertank, Mitteldruckspeicher, Hochdruckspeicher) auftreten. Im Gegensatz zu Diesel/Benzin Tanks, die meist unterirdisch liegen sind die Wasserstofftanks zumindest theoretisch an der Oberfläche angreifbar für eine Temperaturerhöhung durch Unterfeuerung. Zum andern kann das Kühlsystem, welches den Wasserstoff vor dem Betankungsvorgang auf -40 °C herabkühlt ausfallen. Ein Ausfallen des Kühlsystems würde einen sofortigen Stopp des Betankungsvorgangs auslösen, daher ist eine Temperaturbedingte Ausdehnung hier nicht zu erwarten. Ebenso ist die Fahrzeugseitige Kühlung des Wasserstofftanks im PKW zu bewerten.

Dichtheit des Druckgasbehälters oder der Druckanlage

Die Dichtheit der Verbindung zwischen Dispenser und Fahrzeug wird mittels eines Teststoßes vor dem Betankungsvorgang überprüft. Technisch gesehen sind Undichtigkeiten an allen Verbindungsleitungen und Verbindungsarmaturen möglich. Eine Undichte im geschlossenen System würde direkt zum Ausblasekamin geleitet werden, jedoch stehen einzelne Anlagenteile gesondert und sind daher potenzielle Austrittsquellen. Zu den Druckbehältern gehören die Speicher der unterschiedlichen Druckstufen (Lager-, Mitteldruck- und Hochdruckspeicher), der Zapfsäulenanschluss und die Kühlung. Die Standard-Betankungsanlage besteht aus folgenden Druckgeräten:

- H₂ Vorratsspeicher (200 bar)
- Mitteldruckspeicher (550 bar)
- Hochdruckspeicher (975 bar)
- Druckluftspeicher (12 bar)
- Hauptwärmetauscher zw. Wasserstoff und Kühlmedium
- Wärmetauscher hinter Verdichter/Kompressor
- Ausrüstung der Abgabeeinrichtung (Abreißkupplung, Füllschlauch, Füllkupplung)
- Sicherheitsventile

Spül- und Reinigungsvorgänge / Instandhaltungsmaßnahmen

Spül- und Reinigungsvorgänge sind im betriebsmäßigen Zustand vorgesehen. Es ist allerdings nur mit einer Freisetzung von < 10 g Wasserstoff zu rechnen. Diese geringe Menge wird über den Abblasekamin in die Umgebung freigesetzt. Analoges gilt für regelmäßige oder anfallende Instandhaltungsmaßnahmen. Durch die Absperrventile lassen sich alle Komponenten des Systems isolieren. Daher ist auch ein Überlaufen in eine zu wartende oder zu spülende Komponente nicht zu erwarten.

Entspannung von Rohrleitungen

Die wasserstoffführenden Rohrleitungen werden hinter dem Drossel-/Schließventil nach der Vorkühlung stromabwärts nach der Betankung entspannt. Eine Entnahme der Zapfpistole aus dem betankten Fahrzeug im nicht entspannten Zustand ist nicht möglich.

Regelmäßig vorhergesehene Instandhaltungsarbeiten

Üblicherweise werden auch menschliche Fehler bei quantitativen Risikoanalysen mitberücksichtigt. Solche Fehler kommen am häufigsten im Zusammenhang mit Instandhaltungstätigkeiten vor. Hier wird darauf verzichtet, da dies keinen Einfluss auf die gegebene Fragestellung des Berichtes aufweist.

Bestimmung der betriebsbedingt freigesetzten Masse von Wasserstoff

Die bei einem Austritt von Wasserstoff aus einem vorhanden Leck vorhandene zündfähige Masse zu ermitteln, bedarf es genauer Analyse des Betankungsvorgangs.

Während der Stehzeiten, in denen die Anlage nicht betrieben wird, ist mit keinem Austritt zu rechnen, da die Leitungen nicht unter Druck stehen. Ein erster Druckaufschlag erfolgt erst nach dem Verbinden von Dispenser und Fahrzeug. Die austretende Masse ist von zentraler Bedeutung für die Berechnung der Auswirkungen.

Der Betankungsvorgang nach ISO 19880-1:2020 Annex C Clause C.5.3.2 kann in zwei unterschiedliche Zeiten eingeteilt werden, die „Start-Up Time“ und die „Main fueling Time“.

Zu Beginn wird ein sogenannter „Connection Pulse“ in die Anlage gegeben, gefolgt von einem initialen Dichtheitstest. Dieser Dichtheitstest wird typischerweise mit 200 gr H₂ durchgeführt. Über den Startdruckimpuls ist es der Betankungsanlage möglich den Füllstand des Tanks festzustellen. Darauf basiert die berechnete Füllzeit.

Der Befüllvorgang gliedert sich in mehrere Befüll-Phasen, die jeweils von einem Dichtheitstest unterbrochen werden. In diesen Phasen ist es bei einem Vorhandenen Leck oder unsachgemäßem Anschluss des Dispensers an das Fahrzeug möglich, dass Wasserstoff aus der Anlage austritt.

Die Befüllung mit Wasserstoff ist auf 60 gr/s beschränkt, soll jedoch geplant auf bis zu 120 gr/s ansteigen.

Die Menge des freigesetzten Wasserstoffs, wird maßgeblich durch den Druck und die Leckgröße bestimmt. Damit ein Leck zu einem Austritt führt muss es nicht nur vom vorangehenden Dichtheitstest nicht erfasst worden sein, sondern ebenfalls den vorgegebenen Druckkorridor nicht verlassen, da es ansonsten über die Druck- und Durchflusssensorik bemerkt werden und zu einer Abschaltung der Anlage führen würde. Da ein Verlassen nach 5s direkt zur Abschaltung führen würde, kann hier in zwei Szenarien unterschieden werden.

Erstens das Leck ist so groß, dass der Druckkorridor verlassen wird. Konservativ ist eine Austrittsmenge in Höhe des Volumenstroms innerhalb der 5 s bis zur Abschaltung anzunehmen.

Zweitens der Austritt des Wasserstoffs ist so gering, dass es sich im Druckkorridor nicht bemerkbar macht. Bei einem Ausfall der Durchflussmessung könnte weiter Wasserstoff aus dem Leck austreten, da ein Verlassen des Korridors nicht bemerkt werden würde.

Ein Leck im inneren des Dispensers ist, wenn nicht über die Druckmessung frühestens durch die installierte Gaswarnanlage bemerkbar.

Die bei einem Abriss (z.B. Zapfschlauch) austretende Menge Wasserstoff ist aus dem vorhandenen Schlauchvolumen bis zur nächsten Absperreinrichtung zu bestimmen. Diese variiert je nach Bauart. Bei einem Abriss über die Abreißkupplung, ist kein Austritt zu erwarten, da die Kupplung auf eine gasdichte Trennung der Abschnitte im Falle des Auslösens ausgelegt ist.

Aus diesen Betrachtungen ergeben sich folgende Austrittsmengen für die entsprechenden Szenarien:

Gefährdungslage 1: kleine Leckage an einer Rohrleitung

Ein kleines Leck an einer Rohrleitung wird im Folgenden klassifiziert als ein Leck mit der Größe von 1% des Leitungsdurchmessers, entsprechend den Eintrittswahrscheinlichkeiten aus Tabelle 1.

Eine typische Größe für die Wasserstoffleitungsdurchmesser in Betankungsanlagen ist 3/8“ was umgerechnet etwa 9,525 mm entspricht. Aus dieser Betrachtung ergibt sich ein Leckdurchmesser von 0,0095 mm für die kleine Leckage an einer Rohrleitung. Die Berechnungstools für die Bestimmung der Auswirkungsbetrachtung umfassen und stützen sich auf die Menge des freigesetzten Gases.

Bei solch einem kleinen Leckdurchmesser kann sich auf die vorhanden Ausbreitungs- und Austrittsmengenberechnung gestützt werden. Es ergibt sich eine Austrittsmenge von 0,000164 kg/s.

Gefährdungslage 2: kleine Leckage an einer lösbaren Verbindung

Analog zu der Bestimmung der Leckgröße an einer Rohrleitung wird hier ebenfalls die Leckgröße über den Durchmesser bestimmt. Dadurch ergeben sich, wie in Gefährdungslage 1, für Gefährdungslage 2 identische Austrittsmengen.

Gefährdungslage 3: große Leckage an einer Rohrleitung

Für große Leckagen wird ein Durchmesseranteil von 10 % angenommen. Dadurch wird die Leckgröße auf etwa 0,952 mm errechnet. Über die Ausbreitungsrechnung ergibt sich ein Austrittsmassenstrom von 0,02 kg/s.

Gefährdungslage 4: große Leckage an einer lösbaren Verbindung

Ähnlich zu dem Vorgehen bei kleinen Leckagen wird auch hier derselbe prozentuale Anteil angenommen. Daraus ergeben sich ebenfalls 0,02 kg/s für dieses Szenario.

Gefährdungslage 5: Abriss/Rupture

Für einen vollständigen Abriss der Leitung kann als maximaler Massenstrom der Durchfluss während des Betankungsvorgangs angenommen werden. Dieser beträgt 0,06 kg/s und kann in einigen Fällen auf 0,12 kg/s angehoben werden.

In allen Fällen von Leckagen ist davon auszugehen, dass die Zeit in der Wasserstoff ungehindert aus der Öffnung austreten kann etwa 5 s beträgt. Dies ist auf die Abschaltvorkehrungen zurückzuführen, die einen Betankungsvorgang bei Feststellung irgendeines Fehlers nach 5 s beenden soll.

Gefährdungslagen im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung bei vernünftigerweise nicht auszuschließenden Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb

Nachfolgend wird auf die in Tabelle 2 Nummer 4 identifizierten Gefährdungsursachen näher eingegangen.

Tabelle 5: Identifizierung der Gefahren bei dem vernünftigerweise nicht auszuschließenden Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb

Nr.	Gefahrenquelle	Relevant (ja/nein)	Identifizierung und kurze Beschreibung der Gefahren	Bezug in EN 17127	DIN
1.	Leckagen (z. B. an Ventilen, Flanschverbindungen oder anderen Dichtflächen oder durch Korrosion)	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Flanschverbindungen, Dichtflächen oder durch Korrosion beschädigte Druckbehälter/Leitungen können jederzeit zum Austritt von Produkt führen. Durch regelmäßige wiederkehrende Prüfungen kann diesem Schadensmechanismus weitestgehend vorgebeugt werden. Ein Austritt würde ebenso zu einer direkten Isolation der einzelnen Speicher und des Betankungssystems führen.	5.3.1 Verweis auf SAE-J 2601 (Druckverlust)	
2.	Freisetzung von Gasen beim Öffnen von Anlagenteilen (z. B. durch nicht erkannten Überdruck oder Fehlbedienung)	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein	Während der Betankung nicht relevant.	-	
3.	Ansprechen von Sicherheitseinrichtungen, wie z. B. Sicherheitsventile oder Berstscheiben	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Das Ansprechen von Sicherheitseinrichtungen wie Sicherheitsventile oder Abrisskupplung sorgt für einen sofortigen (innerhalb von max. 5 s) Stopp des Betankungsvorgangs. Alle Ventile fahren in den Sicheren Zustand. Hierbei wird unter zu Isolation beitragenden Ventilen mit „Fail close“ und zur Ableitung beitragenden Ventilen mit „Fail open“ unterschieden.	5.3.5	
4.	Abriss von Schlauchverbindungen	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Der Abriss von Schlauchverbindungen ist klassisch für jede Art von Betankungsvorgang. Ob mutwillig oder zufällig, dieser Schaden ist stets in die Betrachtung mit einzubeziehen. Eine ebenfalls verbaute Abreiskupplung sorgt jedoch im Fall des Abrisses für eine gasdichte Trennung zwischen Schlauch und Dispenser.	Kommunikationsunterbrechung siehe 5.3.2 Abschnitt 5 Spiegelstrich 7 und 5.3.4	
5.	Überschreiten zulässiger Füllungsgrade	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Am Dispenser können Druckstufen 350 bar und 700 bar betankt werden. Ein Verwechseln der Anschlüsse ist konstruktiv ausgeschlossen, sodass eine Überfüllung nicht realistisch ist.	5.3.5	

Leckagen

Leckagen infolge von Korrosion oder Schädigung kann an allen Druckbehältern und Leitungen auftreten. Ein ungeplanter Druckverlust sollte jedoch vom System erkannt und zur Isolation führen. Zudem sind alle Druckbehälter wiederkehrend zu prüfen, sodass eine plötzlich unvorhergesehene Korrosion, die zu einem Austritt führt, ausgeschlossen werden kann.

Freisetzung von Gasen beim Öffnen von Anlagenteilen

Nicht relevant.

Ansprechen von Sicherheitseinrichtungen

Das Ansprechen von Sicherheitseinrichtungen wie Sicherheitsventil oder Abrisskupplung führt im bestimmungsgemäßen Betrieb zum Stopp des Betankungsvorgangs. Weiter ist für alle Ventile entweder ein „Fail close“ also ein Schließen zum Erreichen des sicheren Zustands vorgesehen. So kann ein Austreten von Wasserstoff an nicht dafür vorgesehene Stellen vermieden werden. Alle Anlagenteile werden gesondert durch die dafür vorgesehenen Sicherheitseinrichtungen isoliert. Auf der anderen Seite sind Ventile mit „Fail open“ vorhanden, um den ausgetretenen Wasserstoff sicher zum Ausblasekamin zu leiten, über den er dann in die Atmosphäre strömen kann. Durch diese Ventile kann der Dispenser in den drucklosen Zustand gebracht werden.

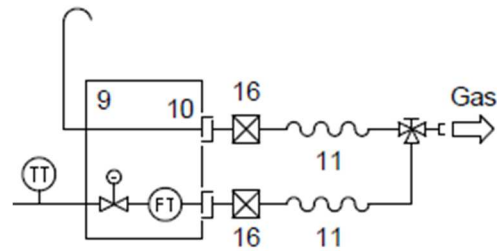
Abriss von Schlauchverbindungen

Der Abriss ist ein bekanntes Problem, welches gleichermaßen alle Tankvorgänge betrifft. Um einem ungewollten übermäßigen Austritt von Wasserstoff entgegenzuwirken, wird bei einem Schlauchabriss der Tankvorgang spätestens nach 5 s gestoppt werden. Zusätzlich ist der Schlauch mit einer Abrisskupplung ausgerüstet, sodass im Schadensfall Dispenser und Schlauch gasdicht voneinander getrennt werden und ein weiteres Ausströmen des Gases verhindert wird.

Überschreitung zulässiger Füllgrade

Eine Verwechslung der Tankstutzen, sodass an ein 350 bar Tank 700 bar angeschlossen würden, ist konstruktiv ausgeschlossen. Eine solche Überfüllung ist nicht möglich. Um die Überschreitung an den Speichern zu verhindern sind Sicherheitsventile verbaut, die in Richtung Abblasekamin entspannen.

Konkretisierung von möglichen Freisetzungsszenarien einer Wasserstofftankstelle:



Allgemeine Darstellung → 9: Dispenser; 10: SV; 16: Abreißkupplung; 11: Zapfschlauch

Betrachtete Komponente	Szenario / Auswirkungen	Randbedingungen	Zuordnung von Gefährdungslagen
<p>Schlauch (Zapfschlauch)</p> <p>Der Zapfschlauch wird über ein Zapfventil an das Straßenfahrzeug angeschlossen. Wenn der Schlauch wird, unterbricht das Zapfventil den Wasserstoffgasfluss. Der Abgabeschlauch ist mit einem Einfüllstutzen, der erst nach dem Anschluss an das Straßenfahrzeug geöffnet werden kann.</p> <p>interne Rohrleitungen</p> <p>TRGS 407, Abs. 3.2.4.2 (1), vgl. Flanschleckage</p>	<p>Undichtigkeit der Schlauchverbindung während des Betankungsprozess mit Freisetzung von Wasserstoff ins Freie</p> <p>ggf. betrachtete Abläufe:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Freisetzung, impulsbehaftet - Freistrahlausbreitung - Zündung <p>ggf. betrachtete gefahren:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Brand (Freistrahflamme) 	<ul style="list-style-type: none"> - Leckgröße: gemäß SANDIA HyMAR+ Datenbank - mögliche maximale Freisetzungsdauer: 5 s - Temperatur: 20°C - Vorgesehener Freisetzungswirksamer Druck: 350°barg oder 700 barg - vorgesehener Durchfluss: gemäß Betankungsprotokoll 	<p>Gefährdungslage 1: Kleine Leckage an einer Rohrleitung</p> <p>Gefährdungslage 2: Kleine Leckage an einer lösbaren Verbindung</p> <p>Gefährdungslage 3: Große Leckage an einer Rohrleitung</p> <p>Gefährdungslage 4: Große Leckage an einer lösbaren Verbindung</p>

Betrachtete Komponente	Szenario / Auswirkungen	Randbedingungen	Zuordnung von Gefährdungslagen
<p>Sicherheitsventil bzw. Ausblasen ins Freie</p> <p>Ein Sicherheitsventil oder eine ausfallsichere Feder ist ein Ventil, das automatisch geöffnet wird oder sich öffnet, sobald der Maximaldruck oder Temperatur überschritten wird.</p> <p>Um schwankende Umgebungstemperaturen und den Erwärmungseffekt, der bei der Gasverdichtung in Tankbehältern auftritt, auszugleichen, dürfen Wasserstofftanks bei einem bestimmten Betriebsdruck gefüllt werden. In der Regel wird der einzige Druckschutz für das Fahrzeugspeichersystem von der Zapfsäule bereitgestellt. Der Fahrzeugtank ist nicht mit Druckentlastungsvorrichtungen ausgestattet, die zum Schutz vor Überdruck aktiviert werden könnten.</p> <p>TRGS 407, Abs. 3.2.4 (3) Es kann auch eine Betrachtung im Rahmen Ex-Schutz im Sinne der DGUV113-001 bzw. vgl. DVGW-G442</p>	<p>Ansprechen von Sicherheitsventil mit anschließendem Ausblasen von Wasserstoff über Ausblasverbindungsleitung und Ausbläser ins Freie</p> <p>ggf. betrachtete Abläufe:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Freisetzung, impulsbehaftet - Freistrahlausbreitung - Zündung <p>ggf. betrachtete Gefahren:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Brand (Freistrahlf Flamme) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ausblas-NW: DN 10 - DN 25 - Ausblasdruck: gemäß eingesetzter SiV - mögliche maximale Freisetzungsdauer: gemäß Betankungsprotokoll - Temperatur: 20°C - vorgesehener Ausblasmenge oder Mengenstrom: Berechnung nach DIN EN 4126 Teil 7 (ACHTUNG: Druckwasserstoff hat abweichende kritische Eigenschaften - Anwendbarkeit dieser Norm ist vorab zu prüfen) 	<p>Nicht betrachtet.</p>

Betrachtete Komponente	Szenario / Auswirkungen	Randbedingungen	Zuordnung von Gefährdungslagen
<p>Schlauch (Zapfschlauch)</p> <p>Der Zapfschlauch wird über ein Zapfventil an das Straßenfahrzeug angeschlossen. Wenn der Schlauch wird, unterbricht das Zapfventil den Wasserstoffgasfluss. Der Abgabeschlauch ist mit einem Einfüllstutzen, der erst nach dem Anschluss an das Straßenfahrzeug geöffnet werden kann.</p> <p>TRGS407, Abs. 3.2.4.2 (4)</p>	<p>Abreißen der Schlauchverbindung während des Betankungsvorgangs mit Freisetzung von Wasserstoff ins Freie, z. B. durch Wegfahren des Straßenfahrzeugs mit angeschlossenem Schlauch.</p> <p>ggf. betrachtete Abläufe:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Freisetzung, impulsbehaftet - Freistrahlausbreitung - Zündung <p>ggf. betrachtete Gefahren:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Brand (Freistrahlf Flamme) 	<ul style="list-style-type: none"> - Leckgröße: gemäß SANDIA HyMAR+ Datenbank - mögliche maximale Freisetzungsdauer: 5 s - Temperatur: 20°C - Vorgesehener Freisetzungswirksamer Druck: 350° barg oder 700 barg - vorgesehener Durchfluss: gemäß Betankungsprotokoll 	<p>Gefährdungslage 5: Abriss einer Rohrleitung/lösbaren Verbindung</p>
<p>Speicherbehälter im Fahrzeug</p> <p>Das Betanken eines Fahrzeugs mit dem falschen Gas würde zu einer möglichen mechanischen Beschädigung des Fahrzeugs oder des Antriebssystems führen</p> <p>vgl. TRGS 407, Abs. 3.2.4.2 (5)</p>	<p>Versagen des Speicherbehälters im Fahrzeug durch fehlerhaftes Anschließen des Stutzens mit sofortiger Freisetzung von Wasserstoff ins Freie.</p> <p>ggf. betrachtete Abläufe:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Freisetzung, unmittelbare Menge - Zündung <p>ggf. betrachtete gefahren:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Feuerball bzw. Explosion 	<ul style="list-style-type: none"> - mögliche maximale Freisetzungsmenge: max. Tankinhalt - Temperatur: 20°C 	<p>Nicht betrachtet.</p>
<p>usw. ...</p>			

Szenarien bzgl. einer Abweichung von der normativen Spezifikation des Befüllvorganges

Von den betrachteten Gefährdungslagen werden jeweils eine kleine und eine große Leckage in ein Untersuchungsszenario überführt.

Neben den oben genannten Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb in Verbindung mit potenziellen Freisetzungsszenarien durch Leckagen an Bauteilen des Dispensers ist zunächst ebenfalls zu bestimmen, mit welcher Ausfallwahrscheinlichkeit der Prozess der Befüllung hinsichtlich der Einhaltung der Befüllspezifikation versehen ist. Hierbei ist allein auf die Sensor-/Aktor-Wirkkette innerhalb des Dispensers abzustellen, die bei Versagen eine Weiterbefüllung des zu betankenden Fahrzeugs bei geöffneter Zapfpistole zur Folge hätte.

Eine Auswirkungsbetrachtung auf Seiten des betankten Fahrzeuges ist nicht Gegenstand der Untersuchung.

Festlegung der zu untersuchenden Szenarien während eines Betankungsvorganges:

Szenario	Beschreibung	Begründung
Szenario I	Versagen der Überwachungseinrichtungen des Dispensers (Sensorik/Aktorik); keine Freisetzung von Wasserstoff durch Leckagen/Undichtigkeiten von Dispenserbauteilen	Abweichung der Befüllspezifikation nach DIN EN 17127; potenzielle Gefährdung der Integrität des betankten Fahrzeugs („Gefahrenverschleppung“ von HRS auf Fahrzeug)
Szenario II	Versagen der Überwachungseinrichtungen des Dispensers (Sensorik/Aktorik) i.V.m. einer kleinen Leckage an einem Dispenserbauteil ohne signifikantes Individualrisiko; <i>Hinweis:</i> mit Verlassen des überwachten Druckkorridors s.o.	Erheblicher oder gefährlicher Mangel i.S. EK-ZÜS-Beschluss ³ an Anlagenteilen der HRS
Szenario III	Versagen der Überwachungseinrichtungen des Dispensers (Sensorik/Aktorik) i.V.m. einer großen Leckage an einem Dispenserbauteil mit signifikantem Individualrisiko	Freisetzung von Wasserstoff ins Freie (Äußere Undichtheit) mit relevantem Individualrisiko (Verletzung/Tod) an Anlagenteilen der HRS

Nicht untersucht wurden folgende denkbare Szenarien:

Szenario	Beschreibung	Begründung
Szenario IV	Innere Undichtheit innerhalb der Gastransportstrecke zur Zapfpistole	Abführung über Abblaseeinrichtung verändert nur die Ex-Zoneneinstufung an diesem Bereich; keine ATEX-Betriebsmittel in diesem Bereich vorhanden
Szenario V	Äußere Undichtheit innerhalb des Dispenser-Gehäuses	Gasdetektion durch Gaswarnanlage (GWA); dieser Bereich ist eine „Ohnehin-Ex-Zone“

³ Erheblicher Mangel: Mangel, der bis zur nächsten wiederkehrenden Prüfung eine Gefährdung für Beschäftigte und Dritte erwarten lässt
Gefährlicher Mangel: Mangel, durch den Beschäftigte und Dritte gefährdet werden
EK-ZÜS-Beschluss BD-003rev1 vom 13.05.2009

Anhang B – Quantitative Risikoanalyse für eine nicht-öffentliche Wasserstofftankstelle

1 Quantitative Risikoanalyse (QRA-Methodik)

Mit Hilfe einer Quantitativen Risikoanalyse (QRA) soll rechnerisch gezeigt werden, inwieweit Auswirkungen an Wasserstofftankstellen während eines Betankungsvorgangs für die Schädigung von Personen verantwortlich sein können. Über die ermittelten Eintrittsszenarien wird festgestellt welche Auswirkungen an einer Tanksäule auftreten können. Diese Szenarien werden in einer Ereignisbaumanalyse dargestellt.

Weiter wird über eine Fehlerbaumanalyse die systematische Unterteilung des eigentlichen Betankungsvorgangs vorgenommen, um Szenarien zu bewerten die für einen Austritt und eine, vorher durch den Ereignisbaum bestimmte, Auswirkung notwendig sein müssten.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit der Freisetzungsszenarien wird über die in der Literatur bekannten Ausfallwahrscheinlichkeiten bzw. Ausfallraten bestimmt.

Um die Vollständigkeit einer QRA aufzuzeigen, wird hier exemplarisch auch auf potenzielle Auswirkungen kompakt eingegangen.

Bei Risiken wird unterschieden zwischen dem Individualrisiko („individual risk“), d. h. der erwarteten jährlichen Häufigkeit für eine Person, einen Schaden zu erleiden, und dem Kollektiv- oder Gruppenrisiko („societal risk“). Letzteres gibt die erwartete Häufigkeit dafür an, dass mehr als eine bestimmte Anzahl von Personen zu Schaden kommen. Darüber hinaus verwendet man noch das ortsbezogene Risiko („location risk“), das unabhängig davon ist, ob sich eine Person an dem Ort befindet oder nicht. Zum Individualrisiko gelangt man dann, wenn das ortsbezogene Risiko mit dem Anteil der Tagesstunden multipliziert wird, die eine Person an dem Ort verbringt, für den das Risiko ermittelt wird.

Im Zusammenhang mit den zu vollziehenden Tätigkeiten an Betankungseinrichtungen und dem Verhalten während der Betankungsvorgänge werden hier ausschließlich Individualrisiken betrachtet. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei Vorliegen eines Individualrisikos mindestens mit einer Verletzung einer Person verbunden ist.

Zur Herleitung von Risiken wird auch der Umstand berücksichtigt, dass bestimmte festgestellte Mängelsituationen („erhebliche/gefährliche Mängel“) für die Betriebssicherheit bedeutsam sind. Wichtig hierbei ist z.B. auch, dass aus einer kleinen Leckage durch z.B. Risswachstum, auch eine große Leckage entstehen kann.

1.1 Ereignisbaumanalyse zur Bestimmung der Auswirkungen

Im Falle einer Leckage an einem gasführenden Anlagenteil wird Wasserstoff entsprechend der vorhandenen Leckfläche freigesetzt. Nach einem Totalversagen eines gasführenden Anlagenteils tritt das Gas und verwirbelt stark. Das ausgetretene Medium wird sich mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit entzünden. Je nach Zeitpunkt der Zündung, sofortige oder auch verzögerte Zündung, ergeben sich unterschiedliche Szenarien.

Diese Szenarientwicklung erfolgt mit Hilfe der Ereignisbaumanalyse. Diese wird zum einen qualitativ für die Ableitung des jeweils möglichen Szenarios mit dessen Folge, wie z. B. Feuerball (Fireball), Freistrahlf Flamme (Jetfire), Flashfire (Gaswolkenbrand) oder Gaswolkenexplosion (Vapour Cloud Explosion) sowie quantitativ für die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweiligen Szenarios genutzt. Hierbei wird die Ausfallhäufigkeit

einer möglichen Leckage auf der Basis eines Pinholes oder Hole (Lecks) bzw. einer Rupture, mit der Zündwahrscheinlichkeit multipliziert.

In qualitativer Hinsicht lässt sich prinzipiell bei unterstellten Leckagen von Wasserstoff mit direkter Zündung ein Jet-Fire-Szenario ableiten. Im Unterschied dazu wird sich bei einer Rupture mit direkter Zündung aufgrund der großen Massenströme ein Fireball-Szenario ergeben. Wird von einer verzögerten Zündung möglicher Leckagen ausgegangen, so ergibt sich bei unverbauten Ausbreitungsgebieten ohne Hindernisse ein Flashfire-Szenario. Dagegen ist bei verbauten Ausbreitungsgebieten mit Hindernissen von einer Gaswolkenexplosion auszugehen.

Grundsätzlich gleiche Szenarien sind bei Rupturen bei verzögerter Zündung des freigesetzten Wasserstoffes zu unterstellen.

Szenarien freigesetzten Wasserstoff ohne Zündung werden im Rahmen der vorliegenden Methodik nicht betrachtet. Ausschlaggebend dafür ist, dass diese Szenarien sehr unwahrscheinlich sind und damit nur einen geringen Risikobeitrag leisten würden bzw. nur im Nahbereich des Freisetzungsorts durch Sauerstoffentzug eine narkotisierende Wirkung hätten. Darüber hinaus würde sich die Gaswolke durch Beimischung von Luft sehr schnell auflösen.

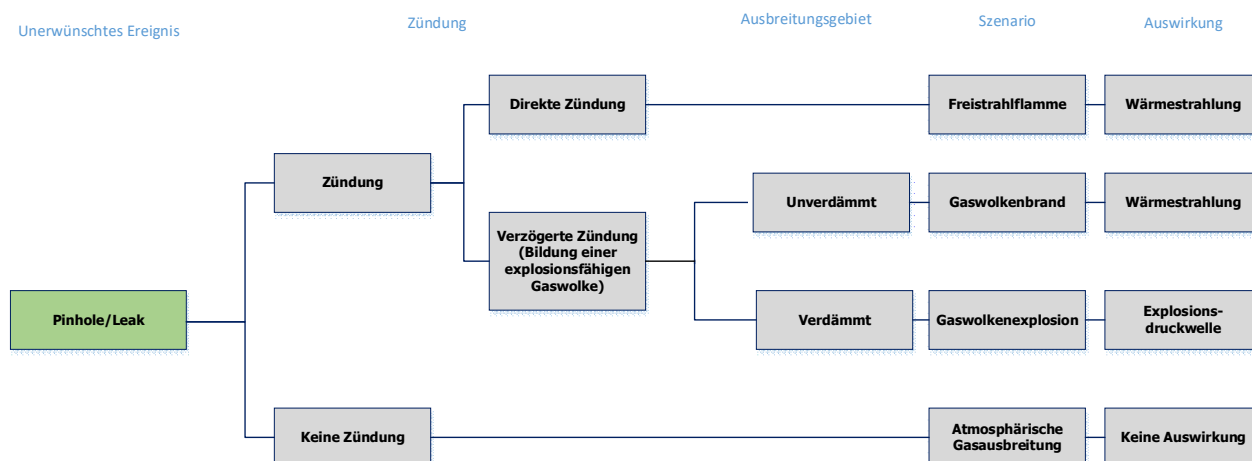


Abbildung 1: Szenarienentwicklung mittels Ereignisbaumanalyse für Pinhole oder Leckage

1.2 Ereignis „Jet Fire“

Zur Berechnung der Strahlungsintensität der Freistrahlf Flamme infolge der Freisetzung von Erdgas bzw. Erdgas-Wasserstoffgemisch bis max. 50% Erdgas wird das Modell von Chamberlain [18] herangezogen. Chamberlain gibt ursprünglich ein Modell für Fackelbrände vor, das auch bei der Modellierung von Freistrahlf lammern bzw. Jetfeuer Anwendung findet. Die strahlende Fläche der Flamme kann als Zylinderkegel approximiert werden, der durch Windeinfluss oder durch den Austrittswinkel des Freistrahls gegenüber der Horizontalen geneigt sein kann. In Abbildung 2 sind die geometrischen Verhältnisse für die Berechnung der Auswirkung einer Freistrahlf Flamme dargestellt.

- [1] Zur Berechnung der Strahlungsintensität der Freistrahlf Flamme infolge der Freisetzung von Wasserstoff (ab 50% gasförmigen H_2 im Gemisch) werden Modifizierungen bzw. Korrekturen am Berechnungsmodell von Chamberlain vorgenommen. Diese Korrekturen sind notwendig, da die Berechnungen mit dem Chamberlain-Modell für Wasserstoff eine deutlich zu große Flammenlänge ergeben, im Vergleich zu den verschiedenen experimentellen Ergebnissen gemäß den Ausführungen in [19].

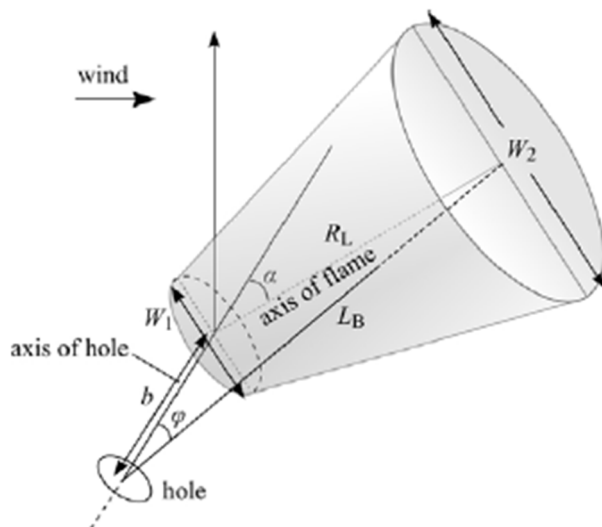


Abbildung 2: Geometrische Verhältnisse einer Freistrahlf Flamme nach dem Chamberlain-Modell in [21]

1.3 Ereignis „Vapour Cloud Explosion“

Zur Berechnung des Spitzenüberdrucks der sich ausbreitenden Druckwellen bei Gaswolkenexplosionen (Deflagration) ist das Multi-Energy Modell der TNO gut geeignet und wird vielfach verwendet. Dieses Modell ist von van den Berg [18] und [20] entwickelt worden und erlaubt die Bestimmung des Wellenüberdrucks, des maximalen dynamischen Drucks und die positive Druckdauer der Explosionsdruckwelle. In diesem Modell wird für die Erzeugung des Explosionsdruckes eine konstante Flammengeschwindigkeit in einem stöchiometrischen Kohlenwasserstoff-Luft-Gemisch mit halbkugelförmiger Ausdehnung zugrunde gelegt.

Gaswolken, die im Freien explodieren, entwickeln nur sehr geringe Explosionsüberdrücke. Der maximale Explosionsüberdruck einer Gaswolkenexplosion ist von vielen Parametern abhängig. Neben den Stoffeigenschaften sind die Art der Zündung, die Flammengeschwindigkeit, die durch die Turbulenz in der Gaswolke stark beeinflusst wird, und die Verdämmung der Gaswolke wesentliche Einflussfaktoren. Das Multi-Energy-Modell der TNO berücksichtigt diesen Einfluss, indem für den maximalen Explosionsüberdruck in der Nähe der Gaswolke zehn Klassen bzw. Verdämmungsgrade festgelegt werden [18]. Der Verdämmungsgrad 1 entspricht einer bedeutungslosen Explosion (Verpuffung) und hat einen geringen maximalen Explosionsüberdruck, während der Verdämmungsgrad 10 eine starke Detonation beschreibt.

Der skalierte Explosionsüberdruck in Abhängigkeit von der skalierten Entfernung (Abstand) für die zehn Verdämmungsgrade nach dem Multi-Energy Modell ist in [18] detailliert beschrieben und wird in Abbildung 3 dargestellt. Diese Diagramme sind für Gaswolkenexplosionen mit einer Verbrennungsenergie von ca. $3,5 \text{ MJ/m}^3$

erstellt worden. Diese volumetrische Verbrennungsenergie ist ein üblicher Wert für die meisten Kohlenstoff-Verbindungen mit stöchiometrischer Konzentration in Luft.

Bevor dieses Modell angewendet werden kann, müssen das Volumen und der Ort der brennbaren Gaswolke bekannt sein oder angenommen werden. Für die Ermittlung dieser Größen können die Ergebnisse der Quelltermberechnung bzw. Ausbreitungsrechnung herangezogen werden. Das Volumen der explosionsfähigen Gaswolke basiert auf der stöchiometrischen Konzentration und die explosionsfähige Masse.

Die skalierten Druckwellenparameter können dann aus der Abbildung 3 abgelesen werden.

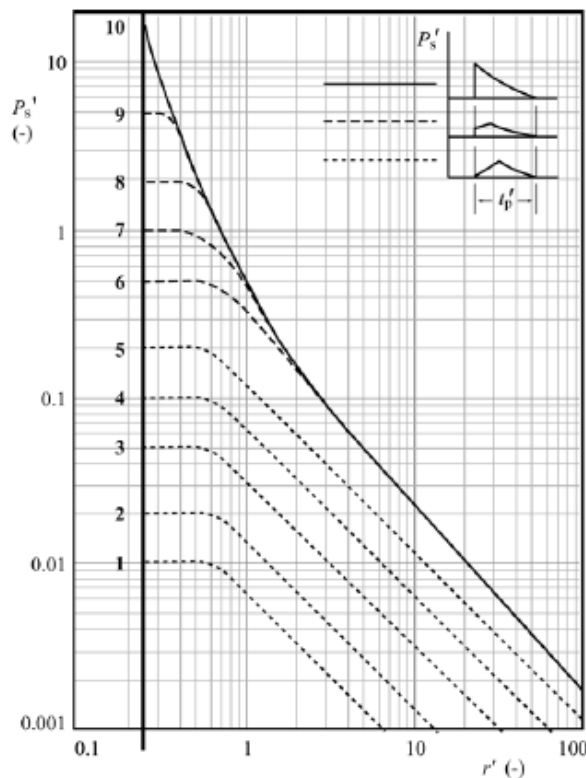


Abbildung 3: Explosionsüberdrücke des TNO Multi-Energy Modells für eine Gaswolkenexplosion [M. J. Assael und K. E. Kakosimos, Fire, Explosions and Toxic Gas Dispersions: Effects Calculation and Risk Analysis, CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida, 2010]

1.4 Fehlerzustandsbaumanalyse

Eine Fehlerzustandsbaumanalyse ist die systematische Darstellung und Erarbeitung von Eintrittswahrscheinlichkeiten verschiedener Szenarien über die Kombination der Ausfallraten von Komponenten und deren Wirkzusammenhang. Ziel der Fehlerzustandsbaumanalyse ist es, Informationen über ein System zu erhalten basierend auf welchen man Entscheidungen für dieses System treffen kann. Zunächst wird ein Hauptereignis postuliert welches im Normalfall die Blockierung oder Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit des Systems. Weiterhin können die Sicherheit oder andere betriebliche Merkmale als Hauptereignis dargestellt werden. Eine Fehlerzustandsbaumanalyse wird in dieser Arbeit als Analyse der Zuverlässigkeit, Funktionsfähigkeit und Instandhaltbarkeit verwendet.

Basierend auf den Wirkzusammenhängen kann dann systematisch nach Ursachen geforscht werden. Die Spezifizierung eines Fehlerzustandsbaum nimmt mit jeder weiteren Ebene zu, wodurch es als deduktives Analyseverfahren beschreiben werden kann. Die Verknüpfung geschieht über „UND“ und „ODER“ Operatoren. Hierbei werden bei einer „UND“ Verknüpfung die Ereignisse als zusammengehörig definiert. Das heißt, dass beide Ereignisse eintreten müssen, damit es zum nächsten Ereignis kommt. Bei einer „ODER“ Verknüpfung kann jedes einzelne vorhergehende Ereignis das Hauptereignis auslösen. Über diese Kopplung können die Beziehungen unter den verschiedenen Ereignissen hergestellt und veranschaulicht werden.

1.5 Wiederkehrende Prüfungen

Um das Risiko an einer Wasserstoffbetankungsanlage während des Betankungsprozesses zu minimieren, wird im folgenden Kapitel eine Berechnung auf Grundlage des Instandhaltungsmodells von [1] durchgeführt. Dazu werden nach [1] folgende Annahmen getroffen:

- Ausfallzeiten der Komponenten sind exponentialverteilt
- Das Zeitintervallzwischen den Prüfungen ist konstant
- Ausfälle werden nur bei der Prüfung entdeckt
- Die Zeitdauer der Prüfung ist vernachlässigbar klein
- Die Komponente wird bei der Prüfung instandgesetzt

Weiterhin ist für die Betrachtung die Nicht-Verfügbarkeit einer Komponente vorzunehmen. Um dies darzustellen, wird die in der Risikoanalyse verwendete Eintrittswahrscheinlichkeit (für die Szenarien mit Leckage-TOP-Ereignissen) herangezogen und auf (die mittlerer Einsatzzeit) die Ausfallrate in $[h^{-1}]$ in einer Bezugszeit umgestellt.

Wichtig ist hierbei die Wahl der Bezugszeit. Dabei gibt es drei Möglichkeiten.

- Kalenderzeit
- Anlagenbetriebszeit
- Komponentenbetriebszeit

Die Kalenderzeit wird als Bezug gewählt, wenn die wesentlichen Belastungen der Komponenten von der Standzeit abhängen, z.B. Temperaturschwankungen oder bei der Aufstellung im Freien.

Die Anlagenbetriebszeit kommt dann in Frage, wenn die wesentlichen Belastungen der Komponente aus dem Anlagenbetrieb stammen. Dies können z.B. Vibrationen sein, die eine Komponente auch dann beaufschlagen, wenn sie selbst nicht in Betrieb ist.

Die Komponentenbetriebszeit wird dann genutzt, wenn die wesentlichen Belastungen einer Komponente aus ihrem eigenen Betrieb stammen.

Wie unter Kapitel 3 des Berichtes und unter Bezug zur DIN EN 62435-2 „Schädigungsmechanismen an elektronischen Bauteilen“ dargelegt, sind im vorliegenden Fall für die PLT-Sensoreinrichtungen äußere Einflussfaktoren für ein potenzielles Versagen von Komponenten als maßgeblich zu werten. Daher wird für alle nachfolgenden Rechengänge als Bezugszeit die Kalenderzeit festgelegt (8.760 h).

Während sich die Sensorik ständig im Einsatz befindet, ist bei Ventilen und den anderen mechanischen Komponenten von einer Einsatzzeit in Höhe der realen Betriebsstunden pro Jahr auszugehen.

2 Untersuchung der ermittelten Szenarien

Nachfolgend werden die aus Anhang A zu untersuchenden Szenarien als TOP-Ereignisse in einem jeweiligen Fehlerbaum auf ihre Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. Ausfallrate hin analysiert.

Szenario I: Versagen der Überwachungseinrichtungen des Dispensers

In dieser Betrachtung wird ein Versagen der Überwachungseinrichtungen des Dispensers (Sensorik/Aktorik) angenommen. Es erfolgt keine Freisetzung von Wasserstoff durch Leckagen/Undichtigkeiten von Dispenserbauteilen. Vielmehr wird hier eine vorliegende Abweichung der Befüllspezifikation nach DIN EN 17127 untersucht, die in ihrer Konsequenz eine potenzielle Gefährdung der Integrität des betankten Fahrzeugs („Gefahrenverschleppung“ von HRS auf Fahrzeug) bedeutet.

2.1.1 Fehlerbaumkonstruktion und resultierende Ausfallraten

Die Fehlerbaumkonstruktion erfolgt nach DIN EN 61025. Die zugrunde liegende Verschaltung der Komponenten der Dispenser seitig installierten PLT-Einrichtungen, welche die funktionalen Anforderungen der DIN EN 17127 umsetzen, basiert auf vorliegenden Rohrleitungs- und Instrumentenfließbildern für die Baueinheit „Dispenser“ verschiedener Hersteller.

Diese sind untereinander nicht deckungsgleich. Es wurde diejenige Konfiguration gewählt, die substantiell die funktionalen Anforderungen nach DIN EN 17127 umsetzt.¹

Die Darstellung ist zeitlich so einzuordnen, dass der Betankungsvorgang bereits regulär begonnen hat (nach Teststoß).

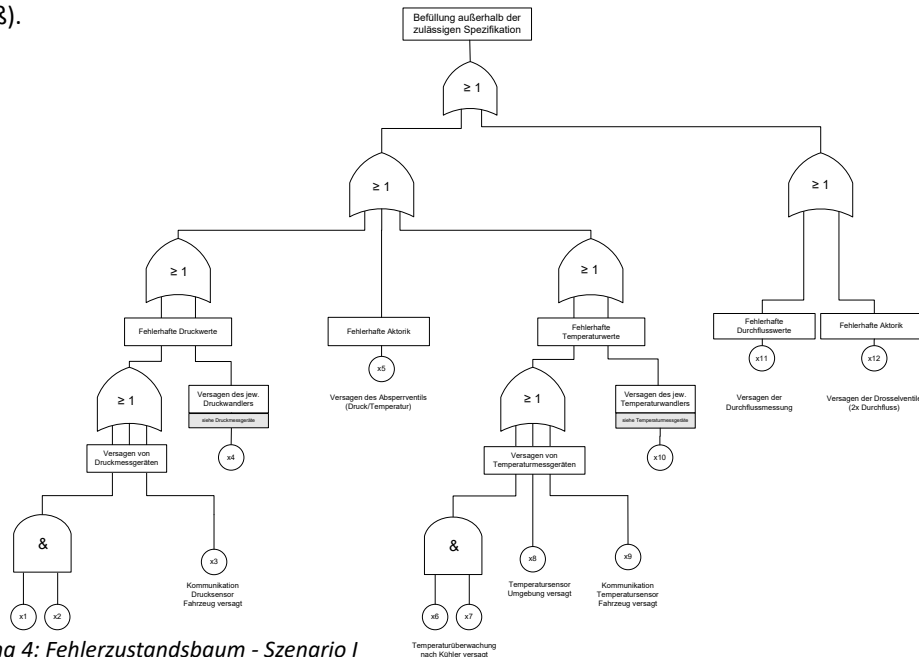


Abbildung 4: Fehlerzustandsbaum - Szenario I

¹ Die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Schaltung kann über deren Architektur direkt beeinflusst werden. Das bedeutet, dass die Verknüpfung der Operationen in den Fehlerbäumen auch in anderer Form möglich ist. Dies wird herstellerseitig unterschiedlich gehandhabt.

Tabelle 1: Übersicht der beteiligten Primäreignisse und der beteiligten Komponenten

Primärereignis	Komponente <i>Abschaltaufgabe nach Tbl.1 DIN EN 17127</i>	Bezugszeit für die Komponenten in [h]	Ausfallhäufigkeit [HyRAM+]	Ausfallrate λ in $10^{-6} h^{-1}$ [VDI 2180 Bl.3]	Ausfallrate TOP	
x1	Drucksensor 1 nach Vorkühler Betankungsdruck \Rightarrow Ventile schliessen	8.760 h	-	$1 * 10^{-6} h^{-1}$	$4,26 * 10^{-5} h^{-1}$	
x2	Drucksensor 2 nach Vorkühler Überwachung Betankungsdruck \Rightarrow Ventile schliessen					
x3	Kommunikation mit Drucksensor Fahrzeug CHSS Ausgangsdruck \Rightarrow kein Start der Betankung					
x4	zugehörige Druckwandler					
x5	Aktorik (Druck und Temp.) mech. Absperrventil					$4,00 * 10^{-7} h^{-1}$
x6	Temperatursensor 1 nach Vorkühler Betankungstemperatur \Rightarrow Ventile schliessen					
x7	Temperatursensor 2 nach Vorkühler Betankungstemperatur \Rightarrow Ventile schliessen					$5 * 10^{-7} h^{-1}$
x8	Kommunikation mit Temperatursensor Fahrzeug Tankwerkstofftemperatur \Rightarrow Ventile schliessen					
x9	Temperatursensor Umgebung Umgebungstemperatur \Rightarrow Ventile schliessen					
x10	zugehörige Temp.wandler					
x11	Durchflussmessung Dispenser max. Kraftstoff-Fließgeschwindigkeit \Rightarrow Ventile schliessen					$1 * 10^{-6} h^{-1}$
x12	Aktorik/ pneum. Drosselventil*					$1,86 * 10^{-5} h^{-1}$ [Quelle: HAUPT]

*- hier nur für den mechanischen Teil des Ventils; ein Ausfall der Pneumatik wird durch Fail-Safe-Eigenschaft des Ventils abgedeckt

Die Fehlerbaumkonstruktion ergibt diese Minimalschnitte: $K_1 = \{x1,x2\}$; $K_2 = \{x6,x7\}$; $K_3 = x3$; ...; $K_{10} = x12$

Die sich daraus ergebende Strukturfunktion lautet:

$$\Psi = 1 - [(1 - x_1 x_2)(1 - x_3)(1 - x_4)(1 - x_5)(1 - x_6 x_7)(1 - x_8)(1 - x_9)(1 - x_{10})(1 - x_{11})(1 - x_{12})] \quad \text{Formel (1)}$$

Die Nichtverfügbarkeit des Systems erhält man als Erwartungswert der Strukturfunktion gemäß Kapitel 4.4.3 dort Formel (3):

Prüfintervall [h]	Ausfallrate λ TOP-Ereignis	resultierende Nichtverfügbarkeit \bar{u}	SOLL-Wert $\bar{u} \leq 0,5$
8.760	$4,26 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$	0,187	i.O.
23.450		0,499	i.O.
26.280		0,560	zu lang
Ermitteltes Prüfintervall: 33 Monate (gerundet)			

2.2 Szenario II: Kleine Leckage an einer Rohrleitung/Flansch

In dieser Betrachtung wird eine kleine Leckage an einer Rohrleitung als Fehler angenommen. Die Fehlergröße beträgt 1 % des Leitungsdurchmessers. Beispielhaft wird eine typischerweise verwendete Rohrleitung mit einem Durchmesser von 9,525 (3/8") verwendet. Daraus ergibt sich für die Betrachtung der Risikoanalyse ein Leckdurchmesser von 0,0095 mm. Im Folgenden werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten, die Auswirkungen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie die ProBit-Vergleichswerte bestimmt.

2.2.1 Fehlerbaumkonstruktion und resultierende Ausfallcharakteristik

In Anhang A sind verschiedene Ursachen für das Auftreten dieses Szenarios bereits genannt.

Undichtigkeit **außerhalb** des Druckkorridors

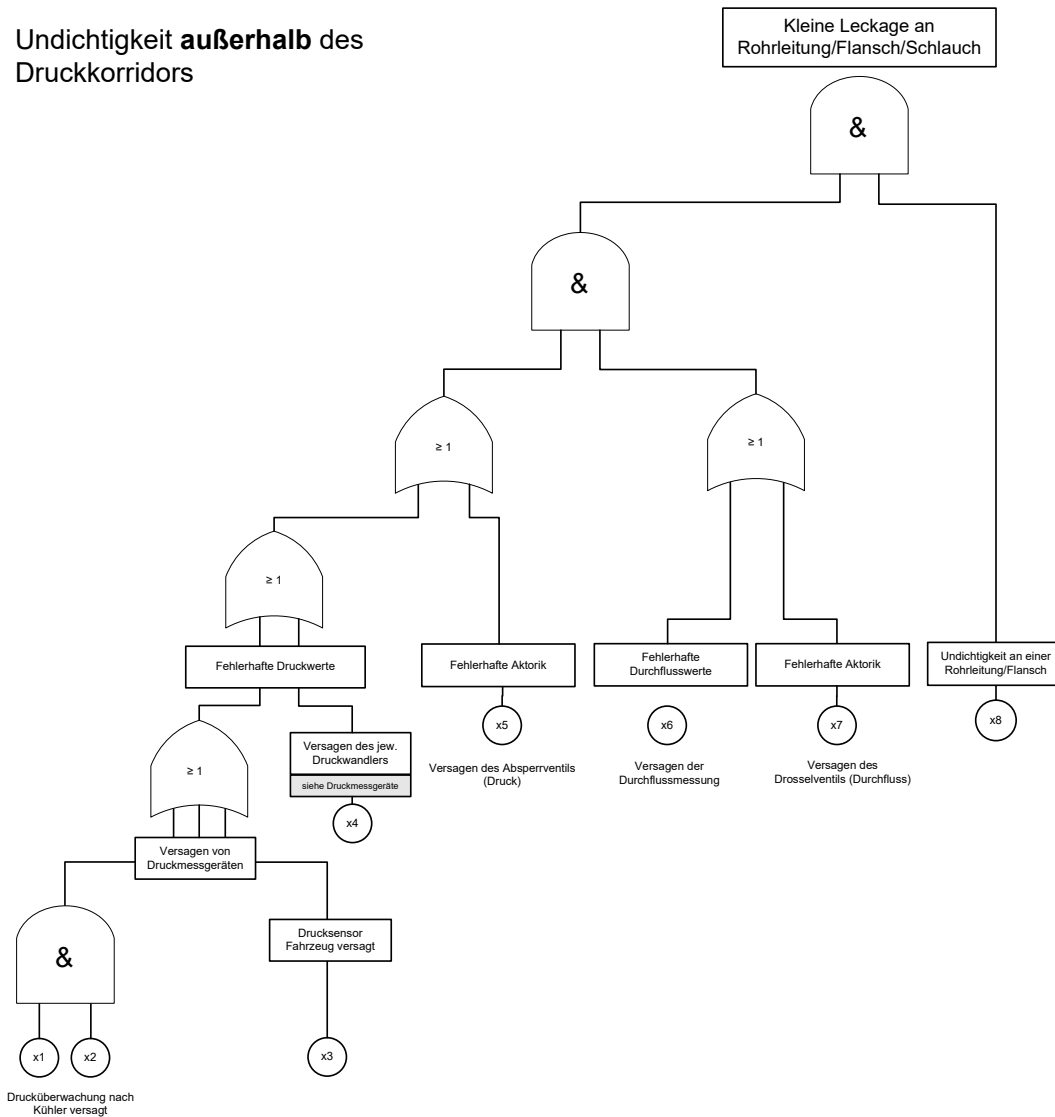


Abbildung 5: Fehlerzustandsbaum - Szenario II

Über eine „UND“ Verknüpfung sind die Pfade des Versagens der maßgeblichen PLT-Einrichtungen sowie des Leckereignisses verbunden, d.h. beide Ereignisse müssen gleichzeitig geschehen, um den Fehler auszulösen. Leckagehäufigkeiten an Rohrleitungen sowie anderen Komponenten können mittels der HyRAM+ Datenbank bestimmt werden.

Betrachtet werden hier die Anlagenteile, die nach der Betankung wieder entspannt werden. Berücksichtigt werden hier diejenigen PLT-Einrichtungen, über die eine Leckage erkannt werden kann.

Die Bezugszeit für Anlagenteile die nach der Betankung entspannt werden und in der die maßgeblichen Schädigungsmechanismen wirken können (hier: Druckbeanspruchung), ist hier die tatsächliche Nutzungs-/Betriebszeit in der eine Druckbeaufschlagung vorliegt (40h/a).

Die betrachteten und maßgeblichen Parameter sind in diesem Fall Druck und Durchfluss die eine äußere Dichtheit außerhalb des überwachten Druckkorridors erkennen können. Undichtheiten innerhalb des überwachten Druckkorridors wurden ebenfalls untersucht. Diese führen aber nicht zu höheren Eintrittswahrscheinlichkeiten.

Tabelle 2: Übersicht der beteiligten Primärereignisse und der beteiligten Komponenten

Primärereignis	Komponente <i>Abschaltaufgabe nach Tbl.1 DIN EN 17127</i>	Bezugszeit für die Komponenten in [h]	Ausfallhäufigkeit [HyRAM+]	Ausfallrate λ in $10^{-6} h^{-1}$ [VDI 2180 Bl.3]	Ausfallrate TOP
x1	Drucksensor 1 nach Vorkühler Betankungsdruck \Rightarrow Ventile schliessen	8.760 h	-	$1 * 10^{-6} h^{-1}$	$2,03 * 10^{-9} h^{-1}$
x2	Drucksensor 2 nach Vorkühler Überwachung Betankungsdruck \Rightarrow Ventile schliessen				
x3	Kommunikation mit Drucksensor Fahrzeug CHSS Ausgangsdruck \Rightarrow kein Start der Betankung				
x4	zugehörige Druckwandler				
x5	Aktorik (Druck) mech. Absperrventil				
x6	Durchflussmessung Dispenser max. Kraftstoff-Fließgeschwindigkeit \Rightarrow Ventile schliessen				
x7	Aktorik/ pneum. Drosselventil*				
x8	kleine Leckage (Flansch)	40 h	$2,0 * 10^{-3}$ (HyRAM+)	$5,0 * 10^{-5} h^{-1}$	

* - hier nur für den mechanischen Teil des Ventils; ein Ausfall der Pneumatik wird durch Fail-Safe-Eigenschaft des Ventils abgedeckt

Die Konstruktion des Fehlerbaumes ergibt folgende Minimalschnitte:

$$K_1 = \{x_1, x_2, x_6, x_8\}; K_2 = \{x_1, x_2, x_7, x_8\}; K_3 = \{x_3, x_6, x_8\}; K_4 = \{x_3, x_7, x_8\}; K_5 = \{x_4, x_6, x_8\}; K_6 = \{x_4, x_7, x_8\}; K_7 = \{x_5, x_6, x_8\}; K_8 = \{x_5, x_7, x_8\}$$

Die sich daraus ergebende Strukturfunktion lautet:

$$\Psi = [1 - (1 - x_1 x_2)(1 - x_3)(1 - x_4)(1 - x_5)] * [1 - (1 - x_6)(1 - x_7)] * x_8 \quad \text{Formel (2)}$$

Die Nichtverfügbarkeit des Systems erhält man als Erwartungswert der Strukturfunktion gemäß Kapitel 3.4.3 dort Formel (3):

Prüfintervall [h]	Ausfallrate λ TOP-Ereignis	resultierende Nichtverfügbarkeit \bar{u}	SOLL-Wert $\bar{u} \leq 0,5$
8.760	$2,03 * 10^{-9} h^{-1}$	$8,9 * 10^{-6}$	i.O.
43.800		$4,4 * 10^{-5}$	i.O.
87.600		$8,9 * 10^{-5}$	i.O.
Ermitteltes Prüfintervall: Außerhalb der Lebensdauer der Wasserstofftankstelle.			

Die Nichtverfügbarkeit liegt außerhalb von SIL 4 (DIN EN 61511-1).

Tabelle 3: Übersicht der beteiligten Primäreignisse und der beteiligten Komponenten

Primärereignis	Komponente <i>Abschaltaufgabe nach Tbl.1 DIN EN 17127</i>	Bezugszeit für die Komponenten in [h]	Ausfallhäufigkeit [HyRAM+]	Ausfallrate λ in $10^{-6} h^{-1}$ [VDI 2180 Bl.3]	Ausfallrate TOP	
x1	Drucksensor 1 nach Vorkühler Betankungsdruck \Rightarrow Ventile schliessen	8.760 h	-	$1 * 10^{-6} h^{-1}$	$1,83 * 10^{-10} h^{-1}$	
x2	Drucksensor 2 nach Vorkühler Überwachung Betankungsdruck \Rightarrow Ventile schliessen					
x3	Kommunikation mit Drucksensor Fahrzeug CHSS Ausgangsdruck \Rightarrow kein Start der Betankung					
x4	zugehörige Druckwandler					
x5	Aktorik (Druck) mech. Absperrventil					$4,00 * 10^{-7} h^{-1}$
x6	Durchflussmessung Dispenser max. Kraftstoff-Fließgeschwindigkeit \Rightarrow Ventile schliessen					$1 * 10^{-6} h^{-1}$
x7	Aktorik/ pneum. Drosselventil*					$1,86 * 10^{-5} h^{-1}$ [Quelle: HAUPT]
x8	große Leckage (Zapfschlauch)	40 h	$1,8 * 10^{-4}$	$4,5 * 10^{-6} h^{-1}$		

* - hier nur für den mechanischen Teil des Ventils; ein Ausfall der Pneumatik wird durch Fail-Safe-Eigenschaft des Ventils abgedeckt

Die Konstruktion des Fehlerbaumes ergibt die gleichen Minimalschnitte wie unter Kapitel 2.2.1.

Die sich daraus ergebende Strukturfunktion entspricht Formel (2).

Die Nichtverfügbarkeit des Systems erhält man als Erwartungswert der Strukturfunktion gemäß Kapitel 3.4.3 dort Formel (3):

Prüfintervall [h]	Ausfallrate λ TOP-Ereignis	resultierende Nichtverfügbarkeit \bar{u}	SOLL-Wert $\bar{u} \leq 0,5$
8.760	$1,83 * 10^{-10} h^{-1}$	$8,0 * 10^{-7}$	i.O.
43.800		$4,0 * 10^{-6}$	i.O.
87.600		$8,0 * 10^{-6}$	i.O.
Ermitteltes Prüfintervall: Außerhalb der Lebensdauer der Wasserstofftankstelle.			

Die Nichtverfügbarkeit liegt außerhalb von SIL 4 (DIN EN 61511-1).

2.3.2 Risikoanalyse

Da es bei einer großen Leckage zu Auswirkungen im Nahbereich der Anlage führen kann, ist die Eintrittswahrscheinlichkeit nicht mehr irrelevant. Die Kombinierten Wahrscheinlichkeiten ergeben sich aus den Fehlerzustandsbäumen, die mit Einzel-Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten, wie erläutert, gefüllt werden. Undichtigkeiten in verschiedenen Größen sind statistisch von J. LaChance [5] untersucht worden. Diese

Datenerhebung wird durch die SANDIA National Laboratories² in Form der HyRAM-Datenbank [9] fortgeführt, ist öffentlich zugänglich und wird daher hier angewendet.

Im Ergebnis der Berechnungen bzgl. der Schadensauswirkung ergibt sich in einem Nahbereich bis maximal 50 cm um die Leckage ein sehr geringes Individualrisiko für die untersuchten Ereignisse „Jet Fire“ und „Vapour Explosion“. Nur in diesem Bereich wäre also mit einer Auswirkung auf eine vor Ort befindliche Person zu rechnen. Abbildung 10 zeigt das Berechnungsergebnis.

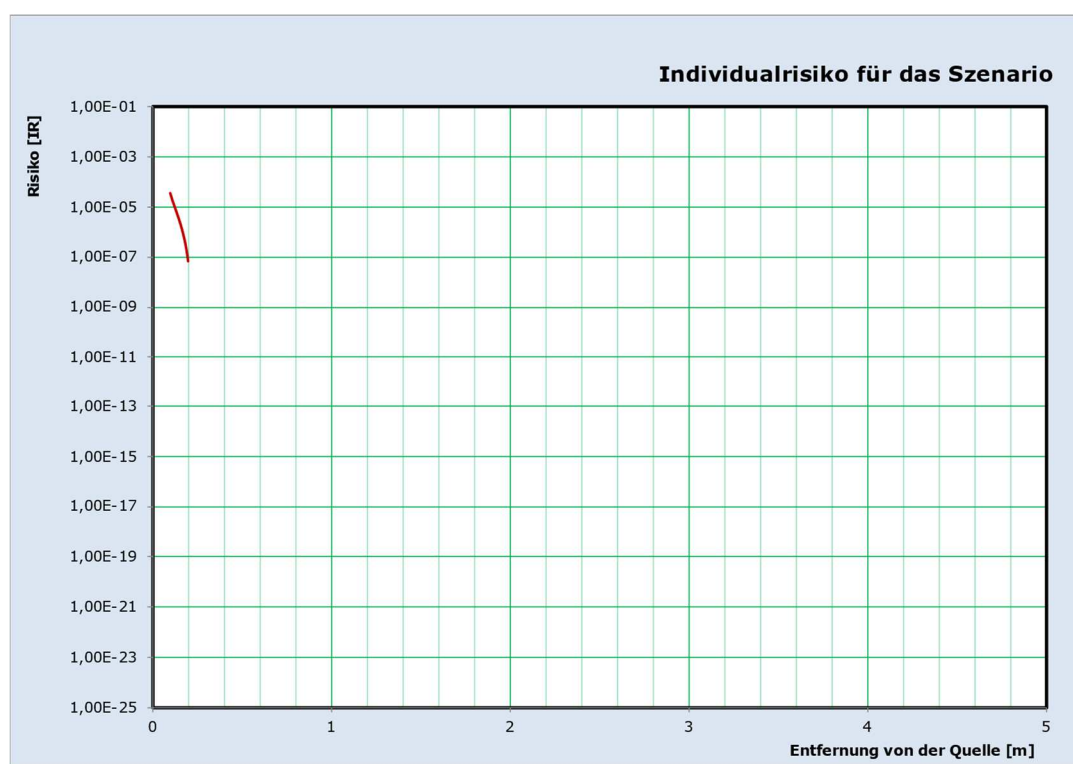


Abbildung 7: Individualrisiko durch eine große Leckage an einer lösbaren Verbindung

² National Technology and Engineering Solutions of Sandia, LLC

Distance [m]	Result JF, Out	Result VCE, Out	Individual Risiko (Single Event)				Result
			Jetfire		Vapour Cloud Explosion		
			Event Frequency [per year]	IR, single event [fatality per year]	Event Frequency [per year]	IR, single event [fatality per year]	
0,1	66,80%	100,00%	7,94E-06	5,30E-06	3,17E-05	3,17E-05	3,70E-05
0,2	0,82%	0,00%	7,94E-06	6,53E-08	3,17E-05	0,00E+00	6,53E-08
0,3	0,00%	0,00%	7,94E-06	1,76E-17	3,17E-05	0,00E+00	1,76E-17
0,4	0,00%	0,00%	7,94E-06	0,00E+00	3,17E-05	0,00E+00	0,00E+00
0,5	0,00%	0,00%	7,94E-06	0,00E+00	3,17E-05	0,00E+00	0,00E+00
0,6	0,00%	0,00%	7,94E-06	0,00E+00	3,17E-05	0,00E+00	0,00E+00
0,7	0,00%	0,00%	7,94E-06	0,00E+00	3,17E-05	0,00E+00	0,00E+00
0,8	0,00%	0,00%	7,94E-06	0,00E+00	3,17E-05	0,00E+00	0,00E+00
0,9	0,00%	0,00%	7,94E-06	0,00E+00	3,17E-05	0,00E+00	0,00E+00
1	0,00%	0,00%	7,94E-06	0,00E+00	3,17E-05	0,00E+00	0,00E+00

Abbildung 8: Tabelle der Risikoanalyse für das Szenario "Große Leckage an einer lösbaren Verbindung"

2.4 Rangfolge der Szenarien

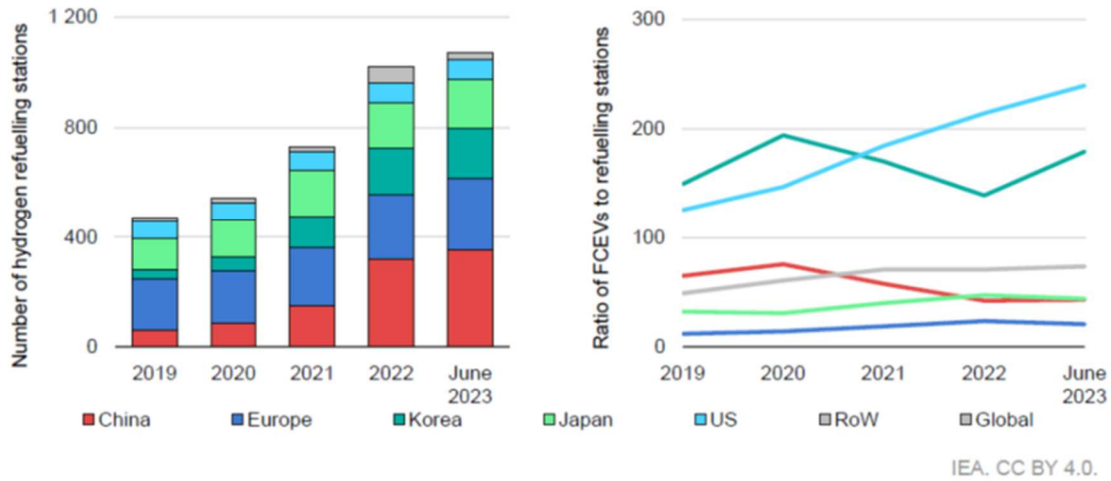
Das Ergebnis der vorangehenden Untersuchungen wird in Tabelle 4 in einer Rangfolge der Szenarien dargestellt.

Tabelle 4: Rangfolge der Szenarien und ihrer Prüfintervalle

Rang	Szenario-Bezeichnung	Ausfallrate	Prüfintervall
1	Befüllung außerhalb der Spezifikation	$4,26 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$	33 Monate
2	Kleine Leckage an Rohrleitung/Flansch	$2,03 \cdot 10^{-9} \text{ h}^{-1}$	nicht relevant
3	Große Leckage an lösbarer Verbindung	$1,83 \cdot 10^{-10} \text{ h}^{-1}$	nicht relevant

Damit wird Szenario I (Vermeidung einer Gefahrenverschleppung) und das damit verbundene Prüfintervall maßgeblich.

Anhang C - ergänzende Information zu Arbeitspaket 1



IEA. CC BY 4.0.

Abbildung 19: Entwicklung der Anzahl H₂-Tankstellen weltweit, Stand Juni 2023¹

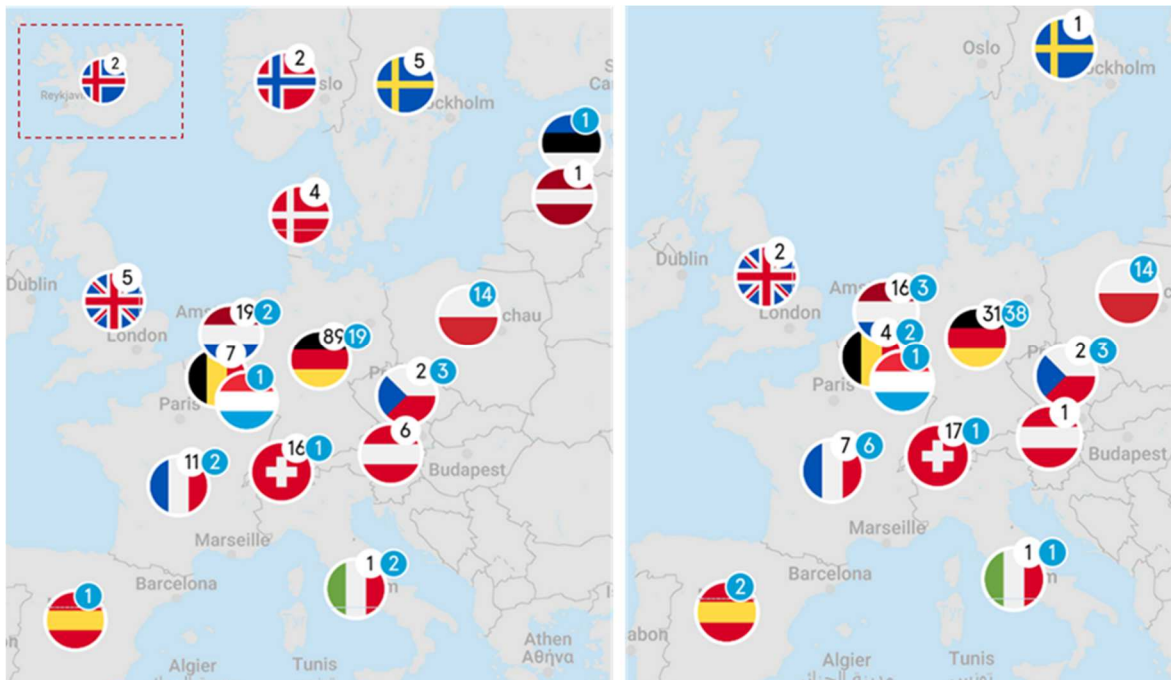


Abbildung 20: durch H2 Mobility erfasste HRS in Europa²

¹ S.34, "Figure 2.8", International Energy Agency, 2023

² H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, 2024

Tabelle 23: detaillierte Testbeschreibung für Werksabnahmen, Auszug (vollständig 23 Tests zusätzlich)

ISO #	35/70MPa FAT Testdescription (ISO 19880-1 Annex C, Table C.2)	IR	Tank-size	p _{Start}	Remarks
1	Correct Comm Protocol,				Shall be confirmed and explained in FAT report by the manufacturer. In mid term confirmation by Notified Body
2	Correct table implementation				
3	Accounting for sensor error				
4	Cold Dispenser implementation				CD is typically not implemented
5	T _{amb} ^{HRS} too low (< -40°C) --> Fueling should not be possible	n.d.	Manufacturer confirmation of PLT at Comiss.	n.d.	Not even pressure pulse. CEP“..Screenshot of the fault can be a possibility to show the functionality”.
6	T _{amb} ^{HRS} too high (> +50°C) --> Fueling should not be possible	n.d.		n.d.	
7	P _{CHSS} too low (< 0.5MPa/MGR<1MPa after pressure pulse) --> Fueling should not be possible. Must stop with and without IR com activated.	ON OFF	n.d.	< 0.5 MPa / <1 MPa	HRS does pressure pulse and then stops. P _{CHSS} after pp > 0.5MPa --> action of HRS is required.
9	Maximum Mass of H ₂ allowed during Startup (evaluation)	n.d.	Possible to simulate >200g during startup? CEP "Screenshot of fault activation is good. It doesn't need to occur really".		
10	F _{Disp} too high (> 60 g/s) --> Fueling stops	n.d.	n.d.	n.d.	Fueling with simulated values only!!
11	T _{Disp} < HRS lower limit (maybe eq. to Test 12) --> Fueling stops within 5 s	n.d.	n.d.	n.d.	Fueling with simulated values only!!
12	T _{Disp} is below T-Corridor --> Fueling stops within 5 s	n.d.	n.d.	n.d.	For SAE J2601 H70 test #12 is equal to test #11
13	T _{Disp} is above T-Corridor --> Fueling stops within 5 s	n.d.	n.d.	n.d.	
14 a	Invalid comm. signal test (Checksum) interrupted refuelling okay	ON	Manufacturer confirmation of inhouse FAT with Screenshots	n.d.	Tests 14 a,b,c are tests of the IR-signal itself! Station switches to non-com or stops fuelling within 5 seconds.
14 b	Invalid comm. signal test (non standard IR-signal, e.g. "Stat") interrupted refuelling okay	ON		n.d.	
14c	Invalid comm. signal test (out-of-range-signal, e.g. p _{CHSS} = 110 MPa) interrupted refuelling okay	ON		n.d.	

Anhang D – Detailanalyse der Einzeltests nach ISO 19880-1:2020

Test 01: Korrektes Kommunikationsprotokoll

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Correct communications protocol"

Art des Tests:

Pre-test

Beschreibung:

Die Funktionalität aller IrDa-Signale gemäß SAE J2799 wird überprüft.

Erwartetes Prüfergebnis:

Alle IrDa-Befehle werden gemäß der Definition in SAE J2799 gesendet und empfangen.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Die Simulation des Tests ist nicht umsetzbar, da hier die Funktionalität nach den Vorgaben der SAE J2799 geprüft wird. Dafür ist ein Testaufbau in der SAE J2799 unter 4.4.1 beschrieben, welcher zur Inbetriebnahme einzuhalten ist.

Test 02: Korrekte Implementierung der Tabellen

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Correct table implementation"

Art des Tests:

Pre-test

Beschreibung:

Es liegt ein Bestätigungsbericht über die Implementierung der Software vor. Dieser ist schriftlich durch "unabhängige Überprüfung" bestätigt.

Erwartetes Prüfergebnis:

Für tabellenbasiertes Protokoll: die Werte für alle implementierten Tabellen (einschließlich Kommunikationsmodus, kommunikationsloser Modus und optionaler Kältespender) sind korrekt.

Für MC-Formel-Protokoll: die Werte für alle implementierten Tabellen (t_{final} , Endkoeffiziententabellen, Enddrucktabellen, falls verwendet) und für alle konstanten Parameterwerte sind korrekt.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Dieser Test beschreibt die Überprüfung der Dokumentation zur korrekten Implementierung von Tabellen zur Betankung. Daher ist der Begriff einer Testsimulation nicht zutreffend. Liegt, wie oben beschrieben, ein positiver Bestätigungsbericht nach unabhängiger Überprüfung vor, gilt der Test als bestanden. Es sind hierfür keine weiteren Maßnahmen an der Anlage notwendig.

Test 03: Validieren der Sensorwerte

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Ambient, fuelling pressure and temperature sensor calibration accuracy table"

Name des Tests nach DIN EN 17127:2019-09:

"Umgebungstemperatur, Betankungsdruck und Temperatursensor,
Kalibrierungsgenauigkeitstabelle"

Art des Tests:

Pre-test

Beschreibung:

Die Verortung und korrekte Kalibrierung der Sensoren werden überprüft. Werte des Umgebungs- und Betankungstemperatursensors und die Messwerte des Betankungsdrucks werden auf Plausibilität geprüft.

Erwartetes Prüfergebnis:

Sensoren zeigen einen dem Betriebszustand der Zapfsäule entsprechenden Wert; die Kalibrierung wird mit OK bestätigt.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Mit diesem Test werden die korrekte Funktion und Wertausgabe der verbauten Sensoren überprüft. Eine Simulation des Tests ist nicht möglich. Das Validieren der Sensoren setzt das Vorhandensein von Referenzwerten voraus.

Test 04: Test der Implementierung eines Cold Dispensers

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

" Cold dispenser implementation (if used by dispensing system)"

Art des Tests:

Pre-test

Beschreibung:

Falls die Option des Cold Dispensing (CD) eingesetzt wird, sollten der entsprechende SIL-Level und der zur Erfüllung dieser Anforderung verwendete Ansatz bestätigt werden (gemäß IEC 61508/IEC 61511 oder gleichwertig). Siehe SAE J2601, Abschnitt 8.12 (tabellenbasiert) oder Abschnitt 9.10 (MC-Formel).

Es liegt ein Bestätigungsbericht über die Implementierung der Hardware und Software vor. Dieser ist schriftlich durch "unabhängige Überprüfung" bestätigt.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Cold Dispensing-Einheit der HRS ist den Anforderungen der SAE J2601 entsprechend gebaut und ist korrekt in das System implementiert.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Dieser Test beschreibt die Überprüfung der Dokumentation der korrekten Implementierung von geeigneter Hardware und Software gemäß den oben genannten Normen. Daher ist der Begriff einer Testsimulation nicht zutreffend. Liegt, wie oben beschrieben, ein positiver Bestätigungsbericht nach unabhängiger Überprüfung vor, gilt der Test als bestanden. Es sind hierfür keine weiteren Maßnahmen an der Anlage notwendig.

Test 05: Test für extreme Umgebungsbedingungen, zu niedrige Umgebungstemperatur

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Extreme ambient test", cold temperatures

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Die Messung der Umgebungstemperatur wird beeinflusst, um $t_{amb} < -40$ °C auszugeben, z. B. durch Manipulation der Sender-Signalschleife.

Es handelt sich nicht um eine Sensorkalibrierung, sondern um einen Fehlertest, bei dem entweder das Signal oder die tatsächliche Temperatur verändert wird.

Erwartetes Prüfergebnis:

Der Füllvorgang darf nicht gestartet werden.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Ziel ist das Sperren der Aufnahme eines Füllvorgangs durch Vorhandensein von Extremwerten. Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen. Eine Simulation des Tests ist unter Umständen möglich.

Test 06: Test für extreme Umgebungsbedingungen, zu hohe Umgebungstemperatur

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Extreme ambient test", hot temperatures

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Die Messung der Umgebungstemperatur wird beeinflusst, um $t_{amb} > 50$ °C auszugeben, z. B. durch Manipulation der Sender-Signalschleife.

Es handelt sich nicht um eine Sensorkalibrierung, sondern um einen Fehlertest, bei dem entweder das Signal oder die tatsächliche Temperatur verändert wird.

Erwartetes Prüfergebnis:

Der Füllvorgang darf nicht gestartet werden.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Ziel ist das Sperren der Aufnahme eines Füllvorgangs durch Vorhandensein von Extremwerten. Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen. Eine Simulation des Tests ist unter Umständen möglich.

Test 07: Ausgangsdruck zu niedrig

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Fault: CHSS starting pressure"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Die HSTA muss mit einem Fülldruck von $< 0,5$ MPa vorbereitet sein. Es ist das größtmögliche CHSS-Volumen innerhalb des nach SAE J2601 zulässigen Bereichs für Leichtbetankung zu verwenden.

Der CHSS wird mit der Zapfsäule verbunden und der Füllvorgang gestartet. Die Zapfsäule muss den leeren CHSS erkennen und darf den Füllvorgang nicht starten.

Der Test wird in Non-Comm- sowie in Comm-Mode ausgeführt.

Erwartetes Prüfergebnis:

Der Füllvorgang darf nicht gestartet werden.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Die Testbeschreibung der ISO 19880-1 fordert eine physische Verbindung des CHSS mit der HRS, die explizite Verwendung eines HSTA und jeweils eine Testsequenz im kommunikationsgestützten und im kommunikationslosen Modus. Getestet wird hier die korrekte Wertaufnahme und weniger die Sperrfunktion der Software. Das Ergebnis ist stark abhängig von der Funktion der verbauten Sensorik, da die physischen und materiellen Einschränkungen der Hardwarekomponenten zu beachten sind. Eine Simulation des Testablaufs ist daher nicht empfehlenswert.

Test 08: Ausgangsdruck zu hoch

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Fault: CHSS starting pressure"

Name des Tests nach DIN EN 17127:2019-09:

"Fehler: CHSS Ausgangsdruck"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Die HSTA muss mit einem Fülldruck leicht über HSL (Hydrogen Service Level) vorbereitet sein (d. h. etwas >70 MPa für die Prüfung eines H70-Dispensers und etwas >35 MPa für einen H35-Dispensers).

Der CHSS wird mit der Zapfsäule verbunden und der Füllvorgang gestartet. Die Zapfsäule muss den vollgetankten CHSS erkennen und darf den Füllvorgang nicht starten.

Erwartetes Prüfergebnis:

Der Füllvorgang darf nicht gestartet werden.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Die Testbeschreibung der ISO 19880-1 fordert eine physische Verbindung des CHSS mit der HRS, die explizite Verwendung eines HSTA und jeweils eine Testsequenz im kommunikationsgestützten und im kommunikationslosen Modus. Getestet wird hier die korrekte Wertaufnahme und weniger die Sperrfunktion der Software. Das Ergebnis ist stark abhängig von der Funktion der verbauten Sensorik, da die physischen und materiellen Einschränkungen der Hardwarekomponenten zu beachten sind. Eine Simulation des Testablaufs ist daher nicht empfehlenswert.

Test 09: Fehler, Überschreitung der max. zul. Masse bei Startdruckimpuls

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Fault: maximum mass of hydrogen allowed during start-up"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Bei jeder Betankungsprüfung ist sicherzustellen, dass die Zapfsäule während der Startphase nicht mehr als 200 g Wasserstoff abgibt. Dabei handelt es sich nicht um eine spezifische Prüfung, sondern um eine Überwachung jeder durchgeführten Betankungsprüfung.

Erwartetes Prüfergebnis:

Beim Start werden weniger als 200 Gramm abgegeben. Wenn die Zapfsäule beim Start mehr als 200 Gramm abgibt, darf die Hauptbetankung nicht beginnen.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Die Möglichkeit, einen simulativen Testablauf durchzuführen, hängt stark von der Konstruktion der HRS und der Umsetzung der Abschaltrealisierung ab.

Bei der Realisierung durch Software ist eine Simulation des Tests in der Regel ohne Einschränkungen möglich. Dies ermöglicht die Überprüfung der Funktionalität, ohne die Sicherheit zu gefährden.

Im Gegensatz dazu ist bei einer Realisierung über Hardware eine Simulation des Tests oft nicht ohne Weiteres möglich. Hardwarekomponenten haben physische und materielle Einschränkungen, die nicht einfach durch Simulationen umgangen werden können. In solchen Fällen kann es notwendig sein, den Test vor Ort an der HRS durchzuführen.

Test 10: Fehler, Überschreitung des max. zul. Kraftstoffflusses

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Fault: excess hydrogen flow"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Es ist entweder durch Manipulation des Wasserstoffmassenstromsignals nach der Startphase ein Signal von mehr als 60 g/s zu erzeugen oder ein Bericht vorzulegen, der eine mechanische Durchflussbegrenzung (z. B. Durchflussblende) über den Betankungsbereich bestätigt.

Erwartetes Prüfergebnis:

Bei Test durch Manipulation des Signals muss die Betankung innerhalb von 5 Sekunden nach dem Punkt, an dem ein Massendurchsatz von 60 g/s erreicht wurde beendet werden.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Die Möglichkeit, einen simulativen Testablauf durchzuführen, hängt stark von der Konstruktion der HRS und der Umsetzung der Durchsatzbeschränkung ab.

Bei der Realisierung durch Software ist eine Simulation des Tests in der Regel ohne Einschränkungen möglich. Dies ermöglicht die Überprüfung der Funktionalität, ohne die Sicherheit zu gefährden.

Im Gegensatz dazu ist bei einer Realisierung über Hardware eine Simulation des Tests oft nicht ohne Weiteres möglich. Hardwarekomponenten haben physische und materielle Einschränkungen, die nicht einfach durch Simulationen umgangen werden können. In solchen Fällen kann es notwendig sein, den Test vor Ort an der HRS durchzuführen.

Test 11: Fehler, Dispenser - absolute Wasserstoffabgabetemperatur

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Fault: dispenser only absolute hydrogen delivery temperature"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Es ist während des Befüllens durch Manipulation des t_{fuel} -Werts am Dispenser ein Signal von weniger als dem unteren Grenzwert der zulässigen Kraftstofftemperatur zu erzeugen.

Erwartetes Prüfergebnis:

Nach Manipulation des Signals muss die Betankung innerhalb von 5 Sekunden nach dem Punkt, an dem die Temperatur der Kraftstoffzufuhr unter den Grenzwert gefallen ist, beendet werden.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist unter Umständen möglich. Ziel ist das Herbeiführen eines Betankungsabbruchs innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch

Vorhandensein von Extremwerten. Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen.

Test 12: Fehler, Dispenser – Wasserstoffabgabetemperatur außerhalb der Grenzen (T30, T20)

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Fault: Corridor hydrogen delivery temperature"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Bei T30- und T20-Stationen, die das tabellenbasierte Protokoll verwenden, ist während des Befüllens durch Manipulation des t_{fuel} -Werts am Dispenser ein Signal unter dem entsprechenden Grenzwert zu erzeugen. Die Anlage muss den Betankungsvorgang stoppen, wenn die Temperatur den festgelegten Korridor verlässt.

Dieser Test ist nicht für das auf der MC-Formel basierende Protokoll anwendbar.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Zapfsäule bricht den Füllvorgang nach Unterschreitung des jeweiligen Grenzwerts innerhalb von 5 s ab.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist unter Umständen möglich. Ziel ist das Herbeiführen eines Betankungsabbruchs innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch Vorhandensein von Extremwerten. Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen.

Test 13: Fehler, Überwachung der Wasserstoffzufuhrtemperatur

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Fault: hydrogen delivery temperature monitoring"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Es ist während des Befüllens eine Manipulation der Zapfsäulentemperatur oder des Massendurchschnitts der Zapfsäulentemperatur vorzunehmen. Bei Verwendung eines tabellenbasierten Protokolls muss die Zapfsäule angeben, ob sie T_{fuel} oder $T_{\text{fuel_ave}}$ als Kriterium für die Kraftstoffabgabetemperatur verwendet.

Für die Verwendung tabellenbasierter Protokolle:

T_{fuel} -Methode:

Nach einer Zeitspanne von >35 s ununterbrochenem Massendurchfluss soll durch geeignete Maßnahmen das von der Zapfsäule abgelesene T_{fuel} -Signal so manipuliert werden, dass es über die obere Grenze der Temperaturkategorie der Kraftstoffabgabe ansteigt (z. B. -33 °C für T40).

$T_{\text{fuel_ave}}$ -Methode:

Nach einer Zeitspanne von >35 s ununterbrochenem Massendurchfluss soll durch geeignete Maßnahmen das von der Zapfsäule abgelesene $T_{\text{fuel_ave}}$ -Signal so manipuliert werden, dass es über die obere Grenze der Temperaturkategorie für die Kraftstoffabgabe ansteigt (z. B. -33 °C für T40).

Für die Verwendung des MC-Formel-Protokolls:

Nach einem kontinuierlichen Massendurchfluss von > 35 s soll durch geeignete Maßnahmen das von der Zapfsäule abgelesene Signal MAT_30 so manipuliert werden, dass es über die obere Grenztemperatur von -17,5 °C ansteigt.

Erwartetes Prüfergebnis:

Tabellenbasiertes Protokoll:

Es wird innerhalb von 5 Sekunden nach dem Punkt der Betankung, an dem die obere Grenze der Temperaturkategorie für die Kraftstoffzufuhr überschritten wurde, entweder die Betankung gestoppt oder, sofern zutreffend, ein Wechsel zum APRR-Fallback durchgeführt.

MC-Formel-Protokoll:

Die Betankung wird nach dem Punkt, an dem MAT_30 die obere Grenztemperatur von -17,5 °C überschritten hat, gestoppt.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist unter Umständen möglich. Ziel ist das Herbeiführen eines Betankungsstopps innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch Vorhandensein von Extremwerten oder, im Falle einer Fallback-Implementierung, eine Anpassung der APRR auf den entsprechenden Fallback-Wert. Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen.

Test 14: Ungültiges Kommunikationssignal

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Invalid communications signal test"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Es werden durch Manipulation des IrDA-Senders falsche, CRC-, "Non-Standard"- und "Out of range"-SAE J2799-Parameter an die Station übertragen.

Drei Tests müssen durchgeführt werden:

1. Übermittlung eines falschen CRC-Wertes für > 500 ms (5 × 100 ms pro Paket)
2. Übertragung von "Non-Standard"-Signalen (z. B. STAT für FC-Befehl)
3. Übermittlung von "Out of range"-Werten für jeden Parameter (z. B. MP = 110)

Erwartetes Prüfergebnis:

Die HRS schaltet auf Non-Comm-Betankung um oder beendet die Betankung innerhalb von 5 Sekunden.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist möglich. Ziel ist das Herbeiführen einer Reaktion der HRS innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch Senden von manipulierten SAE J2799-Parametern. Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen.

Test 15: "Out of Bounds"-Test für die CHSS-Größe

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Out of bounds test for CHSS size"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Bei diesem Test wird ausschließlich die Kommunikation geprüft. Dafür werden mittels IrDA SAE J2799-Signale von Tankvolumina der Größen <49,7 l und >248,6 l gesendet.

Erwartetes Prüfergebnis:

Da die gesendeten Volumina nicht den Spezifikationen der HRS entsprechen, wird keine Betankung eingeleitet.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist für den kommunikationsgestützten Modus möglich. Ziel ist das Sperren der Aufnahme eines Füllvorgangs durch Senden von manipulierten SAE J2799-Parametern. Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen.

Eine Simulation im kommunikationslosen Modus ist hingegen nicht möglich, da die Anlage hier per Druckstoß einen zu großen bzw. zu kleinen Tank erkennen muss (siehe Test 27).

Test 16: Kommunikationsstörung

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Communications break"

Name des Tests nach DIN EN 17127:2019-09:

"Kommunikationsstörung"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Es wird eine Kommunikation zwischen HRS und CHSS hergestellt und anschließend eine Störung des Kommunikationssignals simuliert. Damit wird geprüft, ob die Betankung auf nicht kommunikationsgestützte Betankung umschaltet.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Zapfsäule schaltet auf nicht kommunikationsgestützte Betankung um oder stoppt den Tankvorgang.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist theoretisch möglich. Ziel ist das Herbeiführen eines Betankungsstopps innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit oder eine Anpassung der APRR auf den entsprechenden Non-Comm-Wert durch eine Kommunikationsunterbrechung. Hierbei werden ausschließlich digitale Signale verwendet und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen. Als Teil des SAT ist dieser Test jedoch, wie eingangs erwähnt, an der Anlage durchzuführen.

Test 17: Fehler, Haltesignal

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Fault: halt signal"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Bei diesem Test wird mittels IrDA der SAE J2799-Betankungsbefehl "Halt" gesendet.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird innerhalb von 5 s nach Empfang des Befehls pausiert. Wenn der Halt-Befehl für mehr als 60 Sekunden empfangen ansteht, wird die Betankung innerhalb von 5 s beendet.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist möglich. Ziel ist das Pausieren eines Füllvorgangs und dessen Abbruch nach normativ geforderten Reaktionszeiten durch Senden von entsprechenden SAE J2799-Parametern. Hierbei werden ausschließlich digitale Signale verwendet und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen.

Test 18: Abbruch der Kommunikation

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Fault: communications abort signal"

Name des Tests nach DIN EN 17127:2019-09:

"Fehler: Kommunikations-Abbruchsignal"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Während des Füllvorgangs wird ein Kommunikations-Abbruchsignal simuliert. Damit wird geprüft, ob das Kommunikationssignal während des Füllvorgangs (auch bei nicht kommunikationsgestützter Betankung) überwacht wird.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Zapfsäule bricht den Füllvorgang nach Überschreitung der Grenzwerte innerhalb von 5 s ab.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist theoretisch möglich. Ziel ist das Herbeiführen eines Betankungsstopps innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch Senden von entsprechenden SAE J2799-Parametern. Hierbei werden ausschließlich digitale Signale verwendet und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen. Wie eingangs erwähnt, muss diese Prüfung jedoch im Rahmen des SAT an der Anlage durchgeführt werden.

Test 19: Fehler, max. CHSS-Temperatur

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

" Fault: CHSS Max temperature "

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Bei diesem Test wird der Wert für eine nach SAE J2799 ermittelte Temperatur von $MT > 358,15$ K (entspricht 85°C) gesendet.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird innerhalb von 5 s nach Empfang des Befehls gestoppt.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist möglich. Ziel ist das Herbeiführen eines Betankungsstopps innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch Senden von entsprechenden SAE J2799-Parametern. Hierbei werden ausschließlich digitale Signale verwendet und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen.

Test 20: Fehler, max. CHSS- und Zapfsäulendruck

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Fault: max CHSS and dispenser pressure"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

Dieser Test wird mit zwei Parametern durchgeführt.

1. Es wird ein Pstation-Signal $> 125\%$ NWP erzeugt.
2. Es wird ein MP-Signal $> 125\%$ NWP erzeugt.

Für 125% NWP kann z. B. $87,5$ MPa für H70 gelten.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird innerhalb von 5 s nach Empfang des Signals gestoppt.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist unter Umständen möglich. Ziel ist das Herbeiführen eines Betankungsstopps innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch Vorhandensein von Extremwerten. Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen.

Test 21: Fehler, max. Ladezustand

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Fault: maximum state of charge"

Art des Tests:

Fault Test

Beschreibung:

In diesem Test wird 30 s nach Start der Betankung ein SAE J2799-Wert gesendet, so dass die gemessene Temperatur (MT) einen Wert annimmt, der in Kombination mit dem gemessenen Druck (MP) am CHSS oder an der Station einen SOC-Wert von mehr als 100% ergibt.

Es ist zu beachten, dass die Zapfsäule möglicherweise über eine Schutzvorrichtung verfügt, die die Betankung unterbricht, wenn $MT < 233,15$ K (-40°C) ist. Um sicherzustellen, dass die Zapfsäule die Betankung aufgrund des SOC und nicht aufgrund eines Mindest-MT-Schwellenwerts stoppt, muss der Test mit einem ausreichend hohen Druck durchgeführt werden, so dass MT größer als $233,15$ K ist.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird innerhalb von 5 s nach Empfang des Signals gestoppt.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist möglich. Ziel ist das Herbeiführen eines Betankungsstopps innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch Senden von entsprechenden SAE J2799-Parametern. Hierbei werden ausschließlich digitale Signale verwendet und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen.

Test 22: Durchlaufkontrolle

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Cycle control: (ensure software has a counter for unintentional fuel stopping events)"

Art des Tests:

Response Test

Beschreibung:

Im Vorfeld muss sichergestellt sein, dass die Software über einen Zähler für ungewollte Tankstopps verfügt. Die Software ist darauf zu überprüfen, dass die Betankung bei mehr als 10 Unterbrechungen des Kraftstoffflusses (unter 0,6 g/s) während eines Betankungsvorgangs gestoppt wird. Der Test kann z. B. durch Manipulation der Signalschleife durchgeführt werden. Ein Hardware-Test wird hier normativ nicht empfohlen.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird innerhalb von 5 s nach Eintritt der Bedingung gestoppt.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Ziel ist das Herbeiführen eines Betankungsstopps innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit z. B. durch wiederholte Manipulation der Signalschleife. Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Bei entsprechender Anlagenkonstruktion und vorliegender Dokumentation kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen. Eine Simulation des Tests ist möglich und in der Beschreibung von ISO 19880-1 auch empfohlen.

Test 23: Überwachung des Wasserstoffförderdrucks, obere Grenze

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Hydrogen delivery pressure monitoring", upper limit

Art des Tests:

Response Test

Beschreibung:

Es die Reaktion der HRS auf eine Überschreitung des oberen Grenzwertes des Druckkorridors durch den Kraftstoffförderdruck $P_{station}$ während des Tankvorgangs zu prüfen. Dies kann im Simulationsmodus durchgeführt werden.

Es sind zwei Tests durchzuführen, einer im Comm-Modus und einer im Non-Comm-Modus. Dazu ist jeweils während einer simulierten Betankung die $P_{station}$ so zu manipulieren, dass die obere Grenze des Druckkorridors überschritten wird.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird innerhalb von 5 s nach Limit-Überschreitung gestoppt.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist möglich. Ziel ist das Herbeiführen eines Betankungsstopps innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch Manipulation von $P_{station}$. Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Wie bereits in der Testbeschreibung beschrieben, kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen.

Test 24: Überwachung des Wasserstoffförderdrucks, untere Grenze

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Hydrogen delivery pressure monitoring", lower limit

Art des Tests:

Response Test

Beschreibung:

Es die Reaktion der HRS auf eine Unterschreitung des unteren Grenzwertes des Druckkorridors durch den Kraftstoffförderdruck $P_{station}$ während des Tankvorgangs zu prüfen. Dies kann im Simulationsmodus durchgeführt werden.

Es sind zwei Tests durchzuführen, einer im Comm-Modus und einer im Non-Comm-Modus. Dazu ist jeweils während einer simulierten Betankung die $P_{station}$ so zu manipulieren, dass die untere Grenze des Druckkorridors unterschritten wird (während der Massenstrom $>0,6$ g/s beträgt).

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird innerhalb von 5 s nach Limit-Unterschreitung gestoppt.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist möglich. Ziel ist das Herbeiführen eines Betankungsstopps innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch Manipulation von $P_{station}$. Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Wie bereits in der Testbeschreibung beschrieben, kann durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen.

Test 25: Zielwert für den Druck der Wasserstoffzufuhr (kommunikationslos)

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Hydrogen delivery pressure target", non-comm-mode

Art des Tests:

Response Test

Beschreibung:

In diesem Test wird eine Non-Comm-Betankung durchgeführt. Dafür ist eine manuelle (oder softwaregestützte) Berechnung des erwarteten Zieldrucks auf der Grundlage der beobachteten Startbedingungen durchzuführen und mit den festgelegten Parametern der HRS zu vergleichen.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird nach Erreichen des errechneten Zieldrucks gestoppt.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Die Testbeschreibung nach ISO 19880-1 fordert eine Betankung des CHSS mit der HRS ohne Kommunikation. Der Fokus dieses Tests liegt auf der korrekten Zieldruckberechnung. Er dient dem Vergleich des von der Anlage auf Grundlage der beobachteten Startbedingungen

errechneten Zieldrucks mit einer selbst durchgeführten Berechnung. Eine Simulation kann dem Ziel des Tests gerecht werden, jedoch wird dann das in der ISO 19880-1 niedergeschriebene, erwartete Prüfergebnis, wie oben genannt, nicht real erreicht.

Durch die korrekte Berechnung des zu erreichenden Zieldrucks kann aber ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Ziele erfolgen. Wird in der Anlagensteuerung der richtige Zielwert hinterlegt und danach die Abschaltung durch Simulation bei ebenjenem Zielwert herbeigeführt, ist von einer Erfüllung der Testkriterien unter realen Bedingungen auszugehen.

Test 26: Zielwert für den Druck der Wasserstoffzufuhr (kommunikationsgestützt)

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Hydrogen delivery pressure target", comm-mode

Art des Tests:

Response Test

Beschreibung:

In diesem Test wird eine Comm-Betankung durchgeführt. Dafür ist eine manuelle (oder softwaregestützte) Berechnung des erwarteten Zieldrucks auf der Grundlage der beobachteten Startbedingungen durchzuführen und mit den festgelegten Parametern der HRS zu vergleichen.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird nach Erreichen des errechneten Zieldrucks gestoppt.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Die Testbeschreibung nach ISO 19880-1 fordert eine kommunikationsgestützte Betankung des CHSS mit der HRS. Der Fokus dieses Tests liegt auf der korrekten Zieldruckberechnung. Er dient dem Vergleich des von der Anlage auf Grundlage der beobachteten Startbedingungen errechneten Zieldrucks mit einer selbst durchgeführten Berechnung. Eine Simulation kann dem Ziel des Tests gerecht werden, jedoch wird dann das in der ISO 19880-1 niedergeschriebene, erwartete Prüfergebnis, wie oben genannt, nicht real erreicht.

Durch die korrekte Berechnung des zu erreichenden Zieldrucks kann aber ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Ziele erfolgen. Wird in der Anlagensteuerung der richtige Zielwert hinterlegt und danach die Abschaltung durch Simulation bei ebenjenem Zielwert herbeigeführt, ist von einer Erfüllung der Testkriterien unter realen Bedingungen auszugehen.

Test 27: CHSS-Größenbestimmung

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"CHSS size determination"

Art des Tests:

Response Test

Beschreibung:

Dieses Prozedere testet die Fähigkeit der HRS darauf, ob die Größe des Betankungsvolumens auf eine Genauigkeit von +/-15 % bestimmt werden kann.

Dazu soll mittels HSTA oder einem gleichwertigen CHSS im Bereich der für die HRS zugelassenen Betankungsvolumina getestet werden, um die Genauigkeit des Volumens innerhalb von ±15 % zu bestätigen.

Erwartetes Prüfergebnis:

Liegt das Volumen nicht innerhalb einer Toleranz von ±15 %, sollte die Hauptbetankung standardmäßig unter Verwendung der konservativsten Befüllungstabellen (tabellenbasiertes

Protokoll) durchgeführt werden oder die Indikator-RR-Flag-Variable auf TRUE gesetzt werden (MC-Formel).

Alternativ ist der Betankungsvorgang zu beenden.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Eine Simulation des Tests ist nicht möglich. Die Anlage muss auf angeschlossene Tankvolumina reagieren. Dies setzt im kommunikationslosen Modus das Vorhandensein (mindestens) eines entsprechenden Tanks voraus.

Test 28: Fallback-Test

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

" Fallback test (for table-based protocol only and communications fuelling only. Implementation of Fallback is optional) "

Art des Tests:

Response Test

Name nach CEP:

"Precooling Fallback Switch"

Beschreibung:

Mit diesem Test soll geprüft werden, ob das Rückgriffsverfahren für die Vorkühlung (Fallback) bei einer Änderung des Temperaturkorridors ordnungsgemäß funktioniert. Es sollten Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden, um eine Überfüllung des Prüfstands zu verhindern und diese sind klar zu erklären.

Die erwartete APRR und der Zieldrucks sind auf der Grundlage der beobachteten Startbedingungen und der erwarteten Rückfallkategorie der Vorkühlung zu berechnen.

Während der Betankung ist die Wasserstoffeintrittstemperatur so zu beeinflussen, dass sie oberhalb des vorgesehenen Temperaturkorridors liegt. Bei der Prüfung sollte laut CEP das SOC-Ziel für die Kommunikationsbetankung ignoriert werden, um zu prüfen, ob das neue Fallback-Ziel ordnungsgemäß berücksichtigt wird.

Erwartetes Prüfergebnis:

Nach Verlassen des Temperaturkorridors passt die Anlage die APRR auf das entsprechende Fallback-Ziel an.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Ziel ist die Anpassung der Rampenrate und des Zieldrucks innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch Manipulation von T_{fuel} . Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Wie bereits in der Testbeschreibung beschrieben, kann mit Hilfe der zu berechnenden, erwarteten Werte für APRR und Zieldruck durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen. Eine Simulation des Tests ist daher möglich.

Test 29: Fallback-Test

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

" Fallback test (for table-based protocol only and communications fuelling only. Implementation of Fallback is optional) "

Art des Tests:

Response Test

Name nach CEP:

"Precooling Fallback Switch and back"

Beschreibung:

Mit dieser Prüfung soll sichergestellt werden, dass die Anlage nach Rückgriff auf die Vorkühlung (Fallback) nicht wieder auf die normale Rampenrate umschaltet, falls der ursprüngliche Temperaturkorridor wieder erreicht wird. Es sollten Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden, um eine Überfüllung des Prüfstands zu verhindern. Diese sind klar zu erläutern.

Die erwartete APRR und der Zieldrucks sind auf der Grundlage der beobachteten Startbedingungen und der erwarteten Rückfallkategorie der Vorkühlung zu berechnen.

Während der Betankung ist die Wasserstoffeintrittstemperatur so zu beeinflussen, dass sie oberhalb des vorgesehenen Temperaturkorridors liegt. Die Beeinflussung ist zu unterbrechen, sobald der Temperaturkorridor verlassen wurde und die Anlage das Fallback-Ziel angenommen hat. Bei der Prüfung sollte laut CEP das SOC-Ziel für die Kommunikationsbetankung ignoriert werden, um zu prüfen, ob das neue Fallback-Ziel ordnungsgemäß berücksichtigt wird.

Erwartetes Prüfergebnis:

Nach Verlassen des Temperaturkorridors passt die Anlage die APRR auf das entsprechende Fallback-Ziel an und behält dieses nach Wiedererreichen des Temperaturkorridors bei.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Im Unterschied zum vorhergehenden Test ist hier die Bestätigung des korrekten Verhaltens nach Wiedererreichen des Temperaturkorridors das Ziel. Nach erfolgter Anpassung der Rampenrate und des Zieldrucks und zurückgenommener Manipulation von T_{fuel} muss die HRS die Rückfall-APRR und den Zieldruck beibehalten. Auch hierbei wird ausschließlich die Reaktion der Anlage nach Beeinflussung von Eingangswerten bewertet. Wie bereits in der Testbeschreibung beschrieben, kann mit Hilfe der zu berechnenden Erwartungswerte für APRR und Zieldruck durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen. Eine Simulation des Tests ist daher möglich.

Test 30: Fallback-Test

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

" Fallback test (for table-based protocol only and communications fuelling only. Implementation of Fallback is optional) "

Art des Tests:

Response Test

Name nach CEP:

"Precooling Fallback Threshold High"

Beschreibung:

Mit dieser Prüfung soll sichergestellt werden, dass die Anlage ordnungsgemäß abschaltet, wenn die Temperatur nach Rückgriff auf die Vorkühlung (Fallback) weiter ansteigt und den oberen Grenzwert des Rückkühlkorridors überschreitet.

Die erwartete APRR und der Zieldrucks sind auf der Grundlage der beobachteten Startbedingungen und der erwarteten Rückfallkategorie der Vorkühlung zu berechnen.

Während der Betankung ist die Wasserstoffeintrittstemperatur so zu beeinflussen, dass sie oberhalb des vorgesehenen Temperaturkorridors liegt. Die Beeinflussung ist fortzuführen, wenn die Anlage das Fallback-Ziel angenommen hat, so dass die Wasserstoffvorlauf-

temperatur einen Wert oberhalb des Rückkühltemperaturkorridors (z. B. -26 °C für T30 oder 17,5 °C für T20) erreicht.

Erwartetes Prüfergebnis:

Nach Verlassen des Temperaturkorridors passt die Anlage die APRR auf das entsprechende Fallback-Ziel an. Nach weiterer Beeinflussung und Überschreiten der Obergrenze des Fallback-Korridors bricht die Zapfsäule den Füllvorgang innerhalb von 5 s ab.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Ziel ist die Anpassung der Rampenrate und des Zieldrucks und im Folgenden der Abbruch der Betankung innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch Manipulation von T_{fuel} . Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Wie bereits in der Testbeschreibung beschrieben, kann mit Hilfe der zu berechnenden Erwartungswerte für APRR und Zieldruck durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen. Eine Simulation des Tests ist daher möglich.

Test 31: - (ohne Bezeichnung)

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

keine Bezeichnung

Art des Tests:

Response Test

Name nach CEP:

" Precooling Fallback Switch Com Loss "

Beschreibung:

Mit diesem Test soll überprüft werden, ob die Station ordnungsgemäß abschaltet, wenn nach dem Rückgriff auf die Vorkühlung eine Unterbrechung/ein Verlust des Kommunikationssignals auftritt.

Die erwartete APRR und der Zieldrucks sind auf der Grundlage der beobachteten Startbedingungen und der erwarteten Rückfallkategorie der Vorkühlung zu berechnen.

Während der Betankung ist die Wasserstoffeintrittstemperatur so zu beeinflussen, dass sie oberhalb des vorgesehenen Temperaturkorridors liegt. Anschließend ist die IrDA-Verbindung zu unterbrechen.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird innerhalb von 5 s nach Signalunterbrechung oder -verlust gestoppt.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Ziel ist die Anpassung der Rampenrate und des Zieldrucks innerhalb von der normativ geforderten Reaktionszeit durch Manipulation von T_{fuel} und im Folgenden der Abbruch der Betankung nach Kommunikationsverlust. Hierbei werden ausschließlich Eingangsdaten beeinflusst und die Reaktion der Anlage bewertet. Wie bereits in der Testbeschreibung beschrieben, kann mit Hilfe der zu berechnenden Erwartungswerte für APRR und Zieldruck sowie die manuelle Unterbrechung des Kommunikationssignals durch die Reaktion der Programmierung ein Rückschluss auf die korrekte Funktion der sicherheitstechnisch geforderten Maßnahmen erfolgen. Eine Simulation des Tests ist daher möglich.

Test 32: Top-off fuelling (for table-based protocol only and for communications fuelling only)

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

" Top-off fuelling (for table-based protocol only and for communications fuelling only) "

Art des Tests:

Response Test

Beschreibung:

Mit diesem Test soll überprüft werden, ob das Nachfüllen bei niedrigem CHSS-Anfangsdruck ordnungsgemäß funktioniert. Je nach HD-Betankungsprotokoll kann die Top-Off-Funktionalität zur Verbesserung der Betankungsgeschwindigkeit bei niedrigem CHSS-Anfangsdruck beitragen.

Der HSTA wird mit einem Anfangsdruck <3 MPa vorkonditioniert. Die erwartete APRR und der Zieldrucks sind auf der Grundlage der an der Station gemessenen Ausgangsbedingungen (z. B. T_{amb} und P_0) zu berechnen.

Anschließend wird eine Betankung durchgeführt.

Erwartetes Prüfergebnis:

Mit den Messwerten der Betankung wird bestätigt, dass Top-off-APRR und Druckkorridor korrekt implementiert sind. Es erfolgt kein Abbruch.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Das korrekte Verhalten soll laut Testbeschreibung von ISO 19880-1 anhand einer realen Betankung getestet werden. Die Vorkonditionierungsbedingungen des HSTA und damit dessen Verwendung sind festgelegt. Testbewertungen sollen auf Grundlage von Messwerten der Betankung erfolgen. Eine Simulation des Tests ist damit ausgeschlossen.

Test 33: Cold dispenser

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

" Cold dispenser "

Art des Tests:

Response Test

Beschreibung:

Mit diesem Test soll überprüft werden, ob das Verfahren der Vorkühl-Konditionierung ordnungsgemäß funktioniert.

Falls vorhanden und implementiert, soll eine Überprüfung von zwei Kalt-Tabellen-Betankungen bei Umgebungsbedingungen durchgeführt werden.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen gehalten.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Da in der normativen Testbeschreibung der ISO 19880-1 zwei reale Kalt-Tabellen-Betankungen unter Umgebungsbedingungen gefordert werden, ist eine Simulation dieses Tests nicht möglich.

Test 34: Test der Vorkühlungsleistung (PC) (falls installiert)

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

" Pre-cooling (PC) capacity test "

Art des Tests:

Capacity Test

Anmerkung:

Es muss sichergestellt sein, dass die T-Kategorie, z. B. T40, vor Ort verwendet werden kann.

Beschreibung:

Der Hersteller sollte, falls installiert, die Nenn-„Back-to-back“-Betankungskapazität per Bericht im Voraus ausweisen. Es sollten nacheinander mindestens zwei Testbetankungen von zwei CHSS (davon einer in der größten Kategorie für die Station) mit einem Anfangsdruck von 5 MPa nachgewiesen werden. Während der Betankungen wird die Temperatur der Wasserstoffzufuhr in der Tankstelle überwacht.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Station funktioniert wie geplant, die Temperatur bleibt innerhalb der Grenzen der erwarteten T-Rating- und Mengenkategorien.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Da in der normativen Testbeschreibung der ISO 19880-1 zwei reale Betankungen unter Umgebungsbedingungen gefordert werden, ist eine Simulation dieses Tests nicht möglich.

Test 35: Test der Befüllungsmöglichkeit aller CHSS-Kapazitätsklassen

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"CHSS size determination"

Art des Tests:

Capacity Test

Beschreibung:

Dieser Test ist in Abhängigkeit der HRS-Spezifikationen durchzuführen. Die korrekte Reaktion auf zutreffende Tankvolumina (CHSS-Volumenkategorien: 2 kg bis 4 kg, 4 kg bis 7 kg, 7 kg bis 10 kg) ist zu überprüfen.

Es ist mindestens eine Betankung durchzuführen.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Station funktioniert wie geplant, der erwartete Füllstand wird erreicht und es werden keine Grenzwerte überschritten.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Da in der normativen Testbeschreibung der ISO 19880-1 (mindestens) eine reale Betankung gefordert wird, ist eine Simulation dieses Tests nicht möglich.

Test 36: Bestätigung der Betankung ohne Kommunikation

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Non-communications fuelling validation for each pressure level (H70 and, if applicable, H35)"

Name des Tests nach DIN EN 17127:2019-09:

"Bestätigung der Betankung ohne Kommunikation für beide Druckpegel (H70 und ggf. H35)"

Art des Tests:

Fuelling Test

Beschreibung:

Die Betankung erfolgt ohne Kommunikation bis zu einem Druck, der dem bei einer Betankung zu erwartenden Enddruck entspricht (± 2 MPa), ohne dass die definierten Prozessgrenzen des Betankungsprotokolls überschritten werden.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird unter einem anzunehmenden (88 % bis 95 %) SOC/Druck ± 2 MPa durchgeführt. Es erfolgt kein Abbruch.

Besonderheiten:

Der Test ist mit zwei verschiedenen Startbedingungen pro angebotenem Drucklevel durchzuführen (Test a und b).

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Die Beschreibungen in ISO 19880-1 definieren den Test als "SAT-Betankungstest". Es werden explizit zwei Betankungsvorgänge mit unterschiedlichen Startbedingungen pro Drucklevel gefordert. Eine Test-Simulation ist daher nicht möglich.

Test 37: Bestätigung der Betankung mit Kommunikation

Name des Tests nach ISO 19880-1:2020:

"Communications fuelling validation"

Name des Tests nach DIN EN 17127:2019-09:

"Bestätigung der Betankung mit Kommunikation"

Art des Tests:

Fuelling Test

Beschreibung:

Die Betankung wird bis zu einem bei einer Betankung zu erwartenden SOC oder Druck durchgeführt, ohne Überschreitung der definierten Prozessgrenzen des Betankungsprotokolls und ohne, dass ein Abbruchsignal vom Fahrzeug empfangen wird.

Erwartetes Prüfergebnis:

Die Betankung wird unter einem anzunehmenden SOC/Druck (95 % bis 100 %) durchgeführt. Es erfolgt kein Abbruch.

Besonderheiten:

Der Test ist mit zwei verschiedenen Startbedingungen pro angebotenem Drucklevel durchzuführen (Test a und b). Bei einem Test ist ein Ausgangsdruck von weniger als 2 MPa einzuhalten.

Simulation des Tests ohne Einschränkung der Funktionalität und Sicherheit:

Die Beschreibungen in ISO 19880-1 definieren den Test als "SAT-Betankungstest". Es werden explizit zwei Betankungsvorgänge mit unterschiedlichen Startbedingungen pro Drucklevel gefordert. Eine Test-Simulation ist daher nicht möglich.