

Abschlussbericht

Empfehlung zur Standardisierung der Infrastruktur (inkl. Betankungsprotokoll) für Intralogistikanwendungen mit Wasserstoff und Brennstoffzellen

Durchgeführt für das *Clean Intralogistics Net (CIN)* und durch die *NOW GmbH* koordiniert



Erstellt von Tim Schultz-Harzheim greecon Consulting und Nova Ing GmbH



Kurzfassung

Die vorliegende Studie wurde erstellt, um eine Empfehlung zur Standardisierung der Wasserstoff-Infrastruktur für Intralogistikanwendungen zu geben, die als Grundlage für eine mögliche europäischen oder internationalen Norm dienen soll.

In Auftrag gegeben wurde diese Studie von dem Clean Intralogistics Net (CIN), einem Zusammenschluss von aktuell zwölf Unternehmen, die sich zum Ziel gesetzt haben, Intralogistikanwendungen und ihre Infrastruktur bei industriellen Anwendungen und an Flughäfen emissionsärmer und wirtschaftlicher zu gestalten. Das CIN-Netzwerk wird als Innovationscluster durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) aus Mitteln des Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – Phase 2 (NIP II) gefördert.

Die in dieser Studie entwickelte Empfehlung basiert auf der Untersuchung des aktuellen Ist-Zustandes verschiedener bereits installierter Anwendungen von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen in Europa sowie der Befragung von marktführenden Herstellern von Brennstoffzellensystemen (BZS) und Flurförderzeug-Herstellern, die Mitglied im CIN-Netzwerk sind. Die Aufnahme des IST-Zustandes diente dazu, aktuelle anwendungstechnische Herausforderungen zu identifizieren sowie eine Markt-Übersicht über aktuelle Produkte und Lösungen zu erhalten.

Einerseits stellte sich als herstellerübergreifende Gemeinsamkeit heraus, dass bei allen aktuell bekannten Intralogistikanwendungen in Europa und Nordamerika ausschließlich 350bar-Betankungen durchgeführt werden. Andererseits wurden noch nicht gelöste Herausforderungen deutlich, die durch nicht eindeutig festgelegte Standards entstehen und Individuallösungen an den Einsatzorten fördern und damit der Interoperabilität und einer herstellerübergreifenden Nutzung betrieblicher H₂-Tankstellen entgegenwirken. Dazu zählt vor allem

1. das Betankungsprotokoll für die H₂-Betankung für Intralogistikanwendungen
2. die Kommunikationsschnittstelle zwischen Brennstoffzellensystem und H₂-Dispenser
3. Die Erdung bzw. der Potenzialausgleich zwischen H₂-Infrastruktur und Flurförderzeug während der Betankung
4. die Gestaltung der Wasserabsaugung (als Nebenprodukt),
5. die Gestaltung einer Wegfahrsperre für die Betankung

Ein zentraler Fokus der Studie war die Effizienz der H₂-Betankung von Intralogistikfahrzeugen, da die schnelle Betankung einen entscheidenden operativen Vorteil von Wasserstoff in der innerbetrieblichen Logistik darstellt. Aus anwendungstechnischer Sicht wird die aktuell häufig verwendete kabelgebundene Datenkommunikation zwischen Fahrzeug und Dispenser als nachteilig angesehen und durch alternative Daten- und Kommunikationsschnittstellen ersetzt, die allerdings erfordern, dass eine feste, konservative Druckrampe für alle Fahrzeuge am Dispenser voreingestellt wird. Die Intralogistikfahrzeugen werden dadurch deutlich langsamer betankt, als es technisch möglich wäre.

Durch die Bewertung der Anwendbarkeit von geltenden Richtlinien und Normen sowie der Betrachtung der technischen Randbedingungen kam die Studie zu folgenden Erkenntnissen:

- Für die Gestaltung der Betankungskupplungen für Intralogistikanwendungen empfiehlt es sich H35-Betankungskupplung gem. ISO 17268 zu verwenden.
- Die durch die SAE-2799 beschriebene Infrarot-Schnittstelle wird als drahtlose Kommunikationsschnittstelle für den anspruchsvoll und robusten Intralogistikeinsatz mit hohen Abnutzungserscheinungen an den H₂-Füllkupplungen als nicht geeignet angesehen.
- Sowohl für Betankungsprotokollen als auch für die Verfahrensgrenzwerte können aktuelle Normen, wie beispielsweise die SAE-J2601 nur bedingt für Intralogistikanwendungen herangezogen werden, da die kleineren Fahrzeugtanks vieler Flurförderzeugklassen aus den Anwendungsbereichen der Normen fallen.
- Die Entwicklung der Kommunikationstechnologien hat zu einem bemerkenswerten Fortschritt in den letzten Jahren geführt, die eine kabellose und sichere Kommunikationsübertragung mit hohen Übertragungsgeschwindigkeiten für eine prozessgeführte H₂-Betankung technisch ermöglicht.

Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass viele Schnittstellen bei der Wasserstoff-Betankung von Intralogistikfahrzeugen bedienerfreundlicher gestaltet werden können, u. a. durch eine drahtlose und bidirektionale Kommunikation.

Für diesen empfohlenen Soll-Standard müssen verschiedene hardware- und softwareseitige Implementierungen vorgenommen werden, die dann eine effiziente und kontinuierliche Datenkommunikation für eine prozessgeführte und schnelle Betankung ermöglicht.

Zusätzlich zeigte die Studie den Weg einer schrittweisen Implementierung der Kommunikationsschnittstelle vom „Modellansatz 1“ mit fehlender Kommunikationsschnittstelle bis zum „Modellansatz 4“ auf. Abschließend fasste die Studie die entsprechenden konstruktiven Anforderungen an die Brennstoffzellensysteme und der H₂-Infrastruktur zusammen.

Executive summary

This study has been prepared in order to provide a recommendation for the standardisation of hydrogen infrastructure for intralogistics applications, which should serve as a basis for a possible European or international standard.

This study was initiated by the Clean Intralogistics Net (CIN), an association of currently twelve companies that have set themselves the goal of making intralogistics applications and their infrastructure in industrial applications and at airports less emission-intensive and more economical. The CIN network is funded as an innovation cluster by the Federal Ministry for Digital and Transport Affairs (BMDV) with funds from the National Innovation Programme Hydrogen and Fuel Cell Technology - Phase 2 (NIP II).

The recommendation developed in this study is based on an analysis of the current status of various already installed applications of hydrogen-powered industrial trucks in Europe as well as a survey of market-leading manufacturers of fuel cell systems (FCS) and industrial truck manufacturers who are members of the CIN network. The purpose of surveying the current situation was to identify current application technology challenges and to obtain a market overview of current products and solutions.

Firstly, it emerged as a common feature across all manufacturers that all currently known intralogistics applications in Europe and North America exclusively use 350 bar refuelling. However, there are still unresolved challenges that arise due to the lack of clearly defined standards and which encourage individual solutions at sites of use, thus hindering interoperability and the cross-manufacturer use of operational H₂ refuelling stations. This includes above all

1. the refuelling protocol for H₂ refuelling for intralogistics applications
2. the communication interface between the fuel cell system and the H₂ dispenser
3. the grounding or equipotential bonding between the H₂ infrastructure and the industrial truck during refuelling
4. the design of the dewatering system (as a by-product),
5. the design of an immobiliser during refuelling

A key focus of the study was on the efficiency of H₂ refuelling of intralogistics trucks, as fast refuelling is a key operational benefit of hydrogen in internal logistics. From an application technology perspective, the currently common wired data communication between truck and dispenser is considered disadvantageous and should be replaced by alternative data and communication interfaces, which require, that a fixed, conservative pressure ramp is preset for all trucks at the dispenser. This means that the intralogistics trucks are refuelled significantly slower than technologically possible.

By evaluating the suitability of applicable guidelines and standards and considering the technical boundary conditions, the study came to the following conclusions:

- For the design of refuelling couplings for intralogistics applications, it is recommended to use H35 refuelling couplings in accordance with ISO 17268.
- The infrared interface described by SAE-2799 is not considered suitable as a wireless communication interface for demanding and robust intralogistics applications with high wear and tear on the H2 refuelling nozzles.
- Current standards, such as SAE-J2601, can only be used to a limited extent for intralogistics applications, both for refuelling protocols and for the process limit values, as the smaller vehicle tanks of many industrial truck classes fall outside the scope of the standards.
- The development of communication technologies has led to remarkable progress in recent years, making wireless and secure communication transmission with high transmission speeds technically possible for process-controlled H2 refuelling.

The study came to the conclusion that many interfaces in the hydrogen refuelling of intralogistics vehicles can be designed to be more user-friendly, for example through wireless and bidirectional communication.

For this recommended target standard, certain hardware and software implementations must be carried out, which then enable efficient and continuous data communication for process-controlled and fast refuelling.

In addition, the study showed the path of a step-by-step implementation of the communication interface from "Model Approach 1" with no communication interface to "Model Approach 4". Finally, the study summarised the corresponding design requirements for the fuel cell systems and the H2 infrastructure.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	
EXECUTIVE SUMMARY	
INHALTSVERZEICHNIS	
EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG	1
A. BEGRIFFSBESTIMMUNG	2
A.1. BRENNSTOFFZELLENSYSTEM	2
A.2. ABKÜRZUNGEN	4
B. AUFNAHME DER IST-SITUATION	5
B.1. BRENNSTOFFZELLENMODELLE	7
B.2. FIXIERUNG BRM IM FFZ	9
B.3. POTENZIALAUSGLEICH	10
B.4. WEGFAHRSPERRE	13
B.5. DISPENSER	15
B.6. WASSERABSAUGUNG	17
B.7. DATEN- UND KOMMUNIKATIONSSCHNITTSTELLE	21
B.8. BETANKUNGSPROTOKOLL	27
C. ANWENDBARKEIT VON GELTENDEN RICHTLINIEN UND NORMEN	29
C.1. MASCHINENRICHTLINIE 2006/42/EG	32
C.2. TRGS 751/TRBS3151 - VERMEIDUNG VON BRAND-, EXPLOSIONS- UND DRUCKGEFÄHRDUNGEN AN TANKSTELLEN UND GASFÜLLANLAGEN ZUR BEFÜLLUNG VON LANDFAHRZEUGEN	35
C.3. ISO 19880-1:2020 -GASEOUS HYDROGEN – FUELLING STATIONS	36
C.4. ISO 17268:2020 - GASEOUS HYDROGEN LAND VEHICLE REFUELING CONNECTION DEVICES	41
C.5. ISO 15118 – 20 – ROAD VEHICLES - VEHICLE TO GRID COMMUNICATION INTERFACE – PART 20: 2ND GENERATION NETWORK LAYERS AND APPLICATION LAYERS REQUIREMENTS	46
C.6. SAE J2600 - COMPRESSED H2 SURFACE VEHICLE FUELING CONNECTION DEVICES	51
C.7. SAE J2601-1 – FUELING PROTOCOLS FOR LIGHT DUTY GASEOUS HYDROGEN SURFACE VEHICLES	54
C.8. SAE J2601-3: - FUELING PROTOCOL FOR GASEOUS HYDROGEN POWERED INDUSTRIAL TRUCKS	58
C.9. SAE J2799 - HYDROGEN SURFACE VEHICLE TO STATION COMMUNICATIONS HARDWARE AND SOFTWARE	61
C.10. EN 1175 – SICHERHEIT VON FLURFÖRDERZEUGEN	64
C.11. DIN EN 17127-2019-09-WASSERSTOFFTANKSTELLEN IM AUBENBEREICH	67

C.12.	EN IEC 62282-4-101 - BRENNSTOFFZELLEN-ENERGIESYSTEME FÜR ELEKTR. BETRIEBENE FLURFÖRDERZEUGE	69
-------	---	----

D.	TECHNISCHE RANDBEDINGUNGEN	72
-----------	-----------------------------------	-----------

D.1.	DRAHTLOSE DATENÜBERTRAGUNG	72
D.2.	WASSERABSAUGUNG	95
D.3.	WEGFAHRSPERRE	99
D.4.	BETANKUNGSPROTOKOLL	104
D.5.	AUTOMATISIERUNG	105
D.6.	BEDIENEINHEIT	107
D.7.	POTENZIALAUSGLEICH	112
D.8.	KOMPATIBILITÄT	114

E.	BESCHREIBUNG EMPFOHLENER SOLL-STANDARDS FÜR INTRALOGISTIKANWENDUNGEN	118
-----------	---	------------

E.1.	VORBEMERKUNGEN	118
E.2.	DRAHTLOSE KOMMUNIKATION	118
E.3.	KONSTRUKTIVE ANFORDERUNGEN AN DIE SYSTEME	120

F.	BESCHREIBUNG DES PROZESSES ZUR ÜBERFÜHRUNG IN EINEN ISO-STANDARD	125
-----------	---	------------

F.1.	KOORDINATION NATIONALER UND INTERNATIONALER NORMUNGSARBEIT	125
F.2.	ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION	126
F.3.	DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.	128

G.	ÜBERSICHT WISSENSCHAFTLICHER EINRICHTUNGEN	132
-----------	---	------------

H.	HAFTUNGSAUSSCHLUSS	134
-----------	---------------------------	------------

I.	QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS	135
-----------	--	------------

Einleitung und Aufgabenstellung

Das Clean Intralogistics Net (CIN) hat stellvertretend durch die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH) die Unternehmensberatung greecon Consulting zusammen mit der NOVA Ing GmbH beauftragt, eine Studie zur Standardisierung der Infrastruktur (inkl. Betankungsprotokoll) für Intralogistikanwendungen mit Wasserstoff und Brennstoffzellen durchzuführen.

Unter Intralogistikfahrzeugen werden die Fahrzeuge zusammengefasst, die Waren, Güter, Materialien und Produkte ausschließlich innerbetrieblich – also innerhalb eines Logistikstandortes bzw. Werksgeländes - transportieren und ggf. dem Produktionsprozess zuführen.

Es gibt eine Vielzahl von Intralogistikfahrzeugen, deren Bauformen sich je nach Anwendungsbereich und spezifischen Anforderungen des Betriebs in Ausführung und Größe unterscheiden. Zu den gängigsten Intralogistikfahrzeugen zählen Flurförderzeuge, wie z. B.

- Gegengewichtsstapler
- Schubmaststapler
- Lagertechnikgeräte, wie u.a. Niederhub- und Hochhubwagen
- Kommissionierer
- Hochregalstapler
- Routenzüge
- Schlepper inkl. Flughafenschlepper
- Containerstapler und Reachstacker

Flurförderzeuge können sowohl personengeführte als auch als fahrerlose Transportsysteme sein.

An Logistikstandorten werden Waren nicht nur innerbetrieblich transportiert und gelagert, sondern auch umgeschlagen. So werden Güter von beispielsweise Nutzfahrzeugen und LKWs über den öffentlichen Straßenverkehr zwischen den Werksgeländen und Logistikstandorten transportiert. Dieses wird als Extralogistik bezeichnet und grenzt sich so von der Intralogistik ab.

An einem Logistikstandort treffen somit Extra- und Intralogistikfahrzeugtypen aufeinander, wodurch zukünftig der Wusch zur Nutzung von Synergien und einer für möglichst verschiedene Anwendungen interoperablen Wasserstoffinfrastruktur entstehen kann, um das Verhältnis von Infrastrukturkosten zur Flottengröße weitestmöglich zu optimieren.

Vordergründig steht aber das Ziel die Wasserstoffabgabe über H₂-Dispenser herstellerunabhängig und modellübergreifend für alle Intralogistikfahrzeugen bzw. Brennstoffzellensysteme nutzbar zu machen.

In diesem Rahmen soll eine Zieldefinition für einen europäischen Industrie-Standard der Wasserstoffinfrastruktur für Intralogistikanwendungen herausgearbeitet werden.

A. Begriffsbestimmung

A.1. Brennstoffzellensystem

Im umgangssprachlichen Kontext wird das Brennstoffzellensystem, welches in einem Flurförderzeug eingesetzt wird, oftmals vereinfacht als „Brennstoffzelle“ tituliert. Diese verkürzte Bezeichnung vernachlässigt jedoch die Komplexität und Detailliertheit der konstitutiven Struktur dieses Systems.

Die hier betrachteten Brennstoffzellensysteme sind derart konstruiert, um als ersetzende Module für die konventionellen Energiequellen, wie beispielsweise die Bleisäure-Batterie eines Elektro-Flurförderzeugs, zu fungieren. Sie besitzen das Potenzial, die Charakteristiken eines batteriebetriebenen Elektrostaplers zu verändern und diesen in einen wasserstoffbetriebenen Elektrostapler zu transformieren. Ein herausstechender Vorteil dieses Systems ist die Möglichkeit, aktuelle Elektro-Flurförderzeuge entsprechend der jeweiligen Einsatzanforderungen mit verschiedenen Energiepaketen, wie Bleisäure-, Lithium-Ionen-Batterien oder eben Brennstoffzellensystemen, auszustatten. Für den Umbau der Energiesysteme sind keine vollständig neuen Flurförderzeug-Modelle notwendig. Im Übergang zwischen den unterschiedlichen Antriebsenergiequellen bedarf es in der Regel lediglich geringfügiger konstruktiver Anpassungen der Flurförderzeuge.

Ein Brennstoffzellensystem besteht aus verschiedenen Komponenten:

- a) Im **Brennstoffzellenstack** findet die chemische Reaktion zwischen Wasserstoff (H_2) und dem Sauerstoff (O_2) aus der Umgebungsluft statt, bei der Energie und als Nebenprodukte reines Wasser (H_2O) und Wärme entstehen.
- b) Der hochverdichtete Wasserstoff wird im **H₂-Tank** bzw. VSS (vehicle storage system) gespeichert.
- c) Der für die Reaktion benötigte Sauerstoff wird aus der Umgebungsluft angesaugt. Hierfür sind **Zuluftöffnungen** am Gehäuse des Brennstoffzellensystems vorhanden.
- d) Da der Brennstoffzellenstack nur eine konstante Leistung liefert, speist dieser zunächst einen **Energiezwischenspeicher** (Li-Ionen-Batterie), der u.a. die Aufgabe hat kurzzeitig Lastspitzen abzufangen.
- e) Die als Nebenprodukt entstehende Reaktionswärme wird über das **thermische Management** bestehend aus Ventilatoren und Zu- sowie Abluftöffnungen am Gehäuse des Brennstoffzellensystems abgeführt wird.

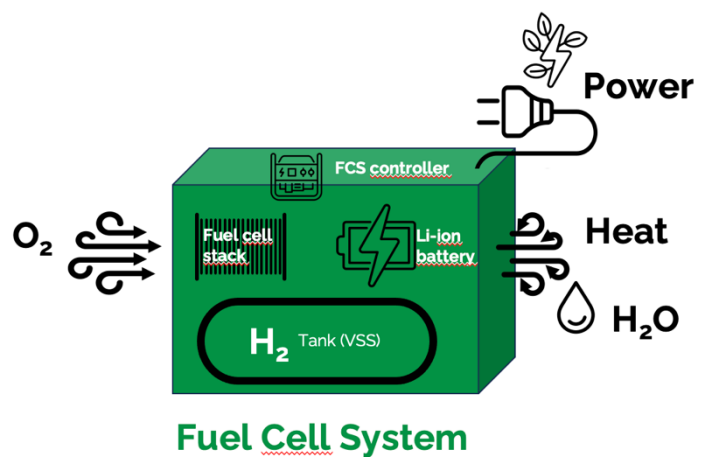


Abbildung 1: Brennstoffzellensystem

- e) Als weiteres Nebenprodukt entsteht demineralisiertes und deionisiertes Wasser, das entweder über das thermische Management als Wasserdampf ausgeblasen wird oder bei leistungsstärkeren Brennstoffzellensystemen als Flüssigkeit in einem integrierten **Wasser-Abscheidungstank** gesammelt und anschließend beim Betankungsprozess abgeführt werden muss.
- f) Die Bleisäure-Batterien sind in vielen Elektro-Flurförderzeugen Bestandteil des Gegengewichts. Die Brennstoffzellensysteme müssen daher entsprechend aufgelastet werden, damit sie den hohen Gewichtsanforderungen der FFZ-Hersteller¹ entsprechen. Das zusätzlich Ballast wird meist um den H₂-Tank im unteren Bereich des Brennstoffzellensystems verbaut.

Innerhalb der Spezifikationen der SAE J2601 wird für Brennstoffzellensysteme der Ausdruck "battery replacement module" (BRM) verwendet. Allerdings wurde dieser Begriff im Rahmen des Clean Intralogistics Net als potenziell irreführend erachtet, da er hauptsächlich die Substitutionsfunktion der Batterie betont, ohne explizit darauf hinzuweisen, dass es sich dabei um ein wasserstoffbetriebenes Brennstoffzellensystem handelt. Innerhalb der aktuellen DIN EN IEC 62282-4-101 wird die Bezeichnung „Brennstoffzellen-Energiesystem“ synonym verwendet, wobei diese Bezeichnung nicht in den terminologischen Datenbanken der ISO (www.iso.org/obp) und IEC (www.electropedia.org) genannt wird. Um eine konsistente und präzise Terminologie zu gewährleisten, wurde zu Beginn dieser Studie eine Befragung unter den führenden Akteuren des CIN-Netzwerks durchgeführt. Dabei hat man sich auf die Verwendung des Begriffs "Brennstoffzellensystem" (BZS) bzw. "fuel cell system" (FCS) geeinigt.

Es wird empfohlen, diese terminologische Auswahl auch in der weiteren Nutzung zu berücksichtigen. Sie wurde von allen relevanten Herstellern von Flurförderzeugen und Brennstoffzellensystemen als geeignet anerkannt.

Bei den Wasserstofftanks werden folgende Typen unterschieden:

- **Typ I** Metall- bzw. Stahlflasche zur Speicherung von Gasen
- **Typ II** Verbundtank. Bestehend aus einem inneren Stahltank, der von einer zusätzliche Kohlefaserverstärkung umwickelt ist.
- **Typ III** Kohlefasertank innenliegendem Stahl- oder Aluminiumliner. Der Typ III verfügt über einen höheren Kohlefaserteil als ein Typ II-Tank
- **Typ IV** Kohlefasertank mit einem innenliegenden Liner aus Kunststoff ²

¹ Vgl. (EU COMMISSION REGULATION No 406/2010, 26 April 2010)

A.2. Abkürzungen

AGV	- Automated guided vehicle (Synonym für FTS)
BLE	- Bluetooth low energy
BRM	- Battery replacement module (Synonym für BZS)
BZS	- Brennstoffzellensystem (s. Abschnitt A.1)
CEN	- Comité Européen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
CIN	- Clean Intralogistics Net
ECU	- Electronic control unit (Steuereinheit)
FAT	- Factory acceptance test
FCS	- Fuel cell system (englische Bezeichnung für BZS)
FFZ	- Flurförderzeug
FTS	- Fahrerloses Transportsystem
GHLV	- Gaseous hydrogen land vehicle (wasserstoffbetriebene Landfahrzeuge)
GH ₂	- gaseous hydrogen (gasförmiger Wasserstoff)
HRS	- Hydrogen refueling station (Wasserstoff-Betankungsanlage)
H ₂	- Hydrogen (Wasserstoff)
IR/IF	- Infrared/Infrarot
LFL	- lower flammable limit (unteren Zündgrenze)
LV	- Land vehicle (Fahrzeuge mit Fahrwerk)
LH ₂	- liquid hydrogen (flüssiger Wasserstoff)
MSR	- Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen
MWP	- Maximum working pressure (maximaler Betriebsdruck)
NWP	- nominal working pressure (Nennbetriebsdruck)
RFID	- Radio-frequency identification
SAT	- Site acceptance test
SDO	- Standard Development Organisation (Normenerarbeitsorganisation)
SPS	- Speicherprogrammierbare Steuerung (Gerät zur Steuerung und Regelung von Maschinen)
SSPS	- sicherheitsgerichtete Speicherprogrammierbare Steuerung
U _{BZS}	- Potenzial des Brennstoffzellensystems
U _{FFZ}	- Potenzial des Flurförderzeugs
U _{HRS}	- Potenzial der Wasserstoff-Infrastruktur (hier Dispenser)
UWB	- Ultra-Wideband (Ultra-Breitband-Technologie)
VSS	- Vehicle storage system (H ₂ -Tank im Fahrzeug)
WMS	- Warehouse management system (Lagerverwaltungs-Software)
ZÜS	- Zugelassene Überwachungsstelle

² Vgl. (NPROXX B.V., 2023)

B. Aufnahme der Ist-Situation

Die überwiegende Mehrheit der Flurförderzeuge, die aktuell mit Brennstoffzellensystemen ausgestattet sind, finden ihren Einsatz in der Wirtschaftsregion Amerika (AMER). Waren vor zehn Jahren etwa nur 5.000 Einheiten dort im Einsatz, sind es heute (Stand: Ende 2022) bereits über 60.000 Einheiten.

Der Markt in Europe-Middle East (EMEA) ist hingegen mit knapp 1.000 Brennstoffzellensystemen in Intralogistikfahrzeugen noch überschaubar. Allerdings wächst der europäische

Markt prozentual aktuell deutlich schneller als der amerikanische Markt und verzeichnet seit 2020 ein markantes Wachstum von ca. 50% im Jahr. Über die Marktverhältnisse in der Wirtschaftsregion Asia-Pacific (APAC) liegen nur wenige belastbare Daten vor - nachweisbar sind etwa 100 Einheiten. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich auch dort das Wachstum in den letzten Jahren beschleunigt hat und mittlerweile deutlich mehr Brennstoffzellensysteme im Einsatz sind.

In den Wirtschaftsregionen Amerika (AMER) und Europe-Middle East (EMEA) dominiert der amerikanische BZS-Hersteller Plug Power Inc. den Markt für Brennstoffzellensysteme in der Intralogistik. Die für den amerikanischen Markt angebotene Produktpalette an Brennstoffzellensystemen ist weitaus größer als die für den europäischen Markt zur Verfügung stehenden Modelle. Aufgrund unterschiedlicher technischer und regulatorischer Rahmenbedingungen sind die Brennstoffzellensysteme zwischen den Wirtschaftsregionen nicht zwingend interoperabel. Es gibt nur wenige Brennstoffzellensysteme, die in beiden Märkten angeboten werden.

In diesem Kontext sind in den letzten Jahren neue europäische Brennstoffzellensystem-Hersteller auf den europäischen Markt getreten, wie u.a. die deutschen Unternehmen FES GmbH Fahrzeug-Entwicklung Sachsen, Globe Fuel Cell Systems GmbH und die KION Group. Da an großen Logistikstandorten, wie u.a. Automobilwerke meist mehrere Unternehmen mit eigenen Fahrzeugflotten operieren, ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Brennstoffzellensysteme und die H₂-Infrastrukturen herstellerübergreifend interoperabel sind. Das angestrebte Ziel ist, dass Flotten verschiedener BZS-Hersteller an einer gemeinsamen Infrastruktur betankt werden können, wobei Sicherheit, Leistung und Kompatibilität zu gewähr-

Entwicklung des globalen Einsatzes von Brennstoffzellensystemen in Flurförderzeugen

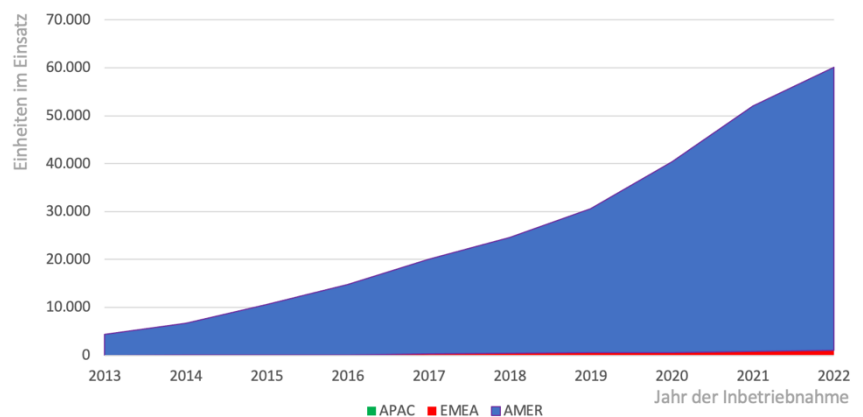


Abbildung 2: Grafik Entwicklung des Weltmarkts

leisten ist. Diese marktübergreifende Interoperabilität unterstützt die Wettbewerbsfähigkeit der noch recht jungen Technologie, insbesondere da die Lebensdauer einer H₂-Infrastruktur und der Brennstoffzellensysteme nicht identisch ist.

In der vorliegenden Studie wurde eine detaillierte Untersuchung des aktuellen Ist-Zustandes bei den CIN-Partnern durchgeführt. Verschiedene Wasserstoff-Infrastrukturlösungen und Wasserstoff-Betankungsanlagen für Intralogistikfahrzeuge wurden vor Ort bei den Betreibern inspiziert. Diese Prüfungen dienten dazu, Gemeinsamkeiten zu identifizieren, aufgetretene Probleme zu dokumentieren sowie Wünsche und Verbesserungsvorschläge der Betreiber zu erfassen und zu katalogisieren.

Darüber hinaus wurden intensive Gespräche mit Herstellern von Brennstoffzellensystemen (BZS) sowie Flurförderzeug-Herstellern geführt. Der Zweck dieser Gespräche bestand darin, das Produktportfolio abzustecken und zu verstehen, welche Produkte und Lösungen bereits auf dem Markt sind und welche sich noch in der Entwicklungsphase befinden.

Ergänzend dazu wurde ein Fragebogen entwickelt, der die umfangreichen Aspekte der Betankungsschnittstellen und notwendigen Komponenten abfragt. Dieser dient dazu, tiefer gehende und spezifischere Informationen zu sammeln und eine umfassende Datenbasis für die Bewertung und Verbesserung von Wasserstoff-Infrastrukturen und -Betankungsanlagen zu schaffen.

In den nachfolgenden Kapiteln wird diese Ist-Situation detailliert erläutert, wobei auf die gewonnenen Erkenntnisse eingegangen wird. Die daraus resultierenden Herausforderungen und möglichen Lösungen sind Grundlage der Empfehlung des in Kapitel E beschriebenen Soll-Standards.

B.1. Brennstoffzellenmodelle

Basierend auf der Befragung aller CIN-Mitglieder stehen aktuell folgende Brennstoffzellensysteme für Intralogistikfahrzeuge dem deutschen und europäischen Markt zur Verfügung.

Hersteller	Modell	Ausgangsspannung [V]	Abmessungen (L x B x H) [mm]	Wasser- tank
KION	HyPower 24V	24	784 x 309 x 629	nicht vorhanden
FES	FEScell HL 24/3 FTF	24	677 x 418 x 335	nicht vorhanden
FES	FEScell HL 24/7 210	24	790 x 210 x 622	nicht vorhanden
FES	FEScell HL 24/7 310	24	790 x 310 x 622	nicht vorhanden
PLUG	3210-24CE	24	624 x 284 x 627	nicht vorhanden
PLUG	3210-24FCE	24	624 x 284 x 627	nicht vorhanden
PLUG	3342-24HFCE	24	784 x 330 x 756	nicht vorhanden
PLUG	6100-48CE	48	830 x 414 x 625	nicht vorhanden
PLUG	1510-48CE	48	827 x 627 x 625	vorhanden
PLUG	2200-48CE	48	1223 x 419 x 781	vorhanden
PLUG	2200-48FCE	48	1223 x 419 x 781	vorhanden
PLUG	1600-80CEA	80	1025 x 708 x 771	vorhanden
PLUG	1600-80HCE	80	1025 x 996 x 769	vorhanden
GLOBE	XLP80	80	1027 x 852 x 764	vorhanden

Tabelle 1: Übersicht verfügbare Brennstoffzellenmodelle in Europa

B.1.1. Allgemeine Spezifikationen

Alle aufgeführten Modelle von Brennstoffzellensysteme besitzen folgende Eigenschaften:

- Nennbetriebsdruck (NWP): 350 bar
- Verwendete Tanktypen:
 - Typ 1 (Metall) oder
 - Typ 3 (Komposit)
 - Anmerkung: Aufgrund des Wunschs der Anonymisierung dieser Angaben,
 - wird der Tanktyp nicht in der Tabelle 1 erfasst.
- H₂-Fassungsvermögen: 0,26 – 1,8 kg

B.1.2. Sensorik und Überdruckabsicherung

Auch bei den Sicherheitssystemen gibt es Gemeinsamkeiten bei allen Brennstoffzellensystem-Herstellern im CIN-Netzwerk.

Temperaturerfassung

Für die interne Überwachung der Wasserstofftemperatur in Brennstoffzellensystemen implementieren alle Hersteller im CIN-Netzwerk eine Temperaturerfassung in den Wasserstofftank (VSS). Diese ermöglicht eine kontinuierliche Kontrolle der Betriebsbedingungen und eine Anpassung der Systemleistung bei Bedarf, um die Sicherheit und Effizienz des Brennstoffzellensystems zu gewährleisten.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Klassifizierung dieser Temperaturerfassung/-verarbeitung unter den Herstellern nicht einheitlich gelöst ist. Ein Hersteller von Brennstoffzellensystemen verwendet Erfassungs- und Verarbeitungssysteme, die nach dem Safety Integrity Level (SIL) 2 klassifiziert sind. SIL ist ein relativer Maßstab zur Bestimmung des Ausfallsicherheitsniveaus eines sicherheitsrelevanten Systems und wird häufig in sicherheitskritischen Anwendungen und Industrien eingesetzt.

Im Gegensatz dazu wird bei den übrigen BZS-Herstellern dahingehend keine SIL-Klassifizierung verwendet. Diese Diskrepanz kann auf Unterschiede in den spezifischen technischen Anforderungen und den gewählten Sicherheitsstrategien der einzelnen Hersteller zurückgeführt werden.

Sicherheitsventil

Thermische Druckentlastungsvorrichtungen (Thermal Pressure Relief Devices, TPRDs) dienen dazu, eine kontrollierte Freisetzung von komprimiertem Wasserstoff aus einem Hochdrucktank zu ermöglichen, wenn die Temperatur signifikant über den normalen Betriebsbedingungen liegt. Dies verhindert, dass bei extremen Ereignissen wie beispielsweise einem Brand im Lager, die Wand oder die Hülle des Hochdrucktanks so stark geschwächt wird, dass ein gefährlicher Bruch auftreten könnte.

Ein TPRD ist mit einer "Schmelzsicherung" ausgestattet, die bei Auslösung den gesamten Inhalt des Wasserstofftanks schnell entweichen lässt. Der dabei austretende Wasserstoff entzündet sich auf kontrollierte Weise, um das größere Risiko eines unkontrollierten Bruchs ("Explosion") des Wasserstofftanks zu minimieren. Sobald ein TPRD ausgelöst wurde, kann es nicht wieder verschlossen werden, und eine Druckbetankung des Wasserstofftanks ist nicht mehr möglich.

Es ist vorgesehen, dass H₂-Tanks und TPRDs, die einem Brand ausgesetzt waren, außer Betrieb genommen und entsorgt werden.

In der Europäischen Verordnung (EU) Nr. 406/2010 der Kommission, die für H₂-motorisierte Fahrzeuge gilt, ist u.a. vorgeschrieben, dass alle in einem Fahrzeug verbauten H₂-Tanks über ein TPRD verfügen müssen.³

Entsprechend dieser Verordnung sind auch bei allen Brennstoffzellensystemen für die Intralogistik TPRDs verbaut.

³ (EU COMMISSION REGULATION No 406/2010, 26 April 2010)

B.2. Fixierung BZS im FFZ

Bei Intralogistikfanwendungen werden die Brennstoffzellensysteme in Elektrostaplern und Lagertechnikgeräten eingesetzt, die ursprünglich für den Einsatz von konventionellen Bleisäure-Batterien entwickelt wurde.

Der Vorteil ist, dass dadurch keine komplett neuen Brennstoffzellenfahrzeuge entwickelt werden müssen, sondern vorhanden Modelle mit kleineren Modifikationen „Fuel Cell-Ready“ vorbereitet werden können.

Die Bleisäure-Batterien verfügen über ein sehr hohes Eigengewicht und sind bei den meisten Flurförderzeugen ein wesentlicher Teil des Gegengewichts. So wiegt beispielsweise die 80V-Batterie für einen Elektrostapler mit 2,5 Tonnen Tragfähigkeit, ca. 1.600 kg. Da das Brennstoffzellensystem die konventionelle Bleisäure-Batterie im Fahrzeug substituiert und damit einen „Batterie-Stapler“ zum „Brennstoffzellen-Stapler“ wandelt, muss die Brennstoffzelle den Abmessungen des Batterietrags und den Gewichtsvorgaben der Bleisäure-Batterie entsprechen und aufgelastet werden. In der SAE J2601 wird das Brennstoffzellensysteme dem entsprechend als BRM – battery replacement module – bezeichnet.

Die konstruktiven Anforderungen für die Fixierung des Brennstoffzellensystems im Fahrzeug müssen die hohen dynamische Kräfte beim Beschleunigen und Kurvenfahrten berücksichtigen, was durch eine möglichst stabile und formschlüssige Befestigung des Brennstoffzellensystem erreicht wird.

Hierfür existieren eine Vielzahl von individuellen Lösungen der FFZ-Hersteller, wobei die Befestigung der Brennstoffzellensysteme überwiegend auf der Batterie-Verriegelung basiert. Eine Austauschbarkeit der Brennstoffzellenmodelle unterschiedlicher Hersteller ist beim gleichen FFZ-Typ dadurch nicht sicher gewährleistet.



Abbildung 3: Einbausituation der Brennstoffzelle.

Bild oben: Brennstoffzelle sitzt passgenau auf dem Wechselschlitten.

Bild unten: Brennstoffzelle musste seitens des FFZ-Herstellers mit Distanzstücken fixiert werden.

B.3. Potenzialausgleich

Der Potenzialausgleich ist eine Maßnahme zur Erhöhung der elektrischen Sicherheit und dient dem Schutz gegen elektrische Schläge, Überspannungen und Funkenvermeidung, da explosionsfähiges Gas betankt wird. Die zwischen leitfähigen Baugruppen auftretenden Potentialunterschiede müssen dafür entsprechend mit einem niedrigen ohmschen Widerstand leitfähig miteinander verbunden werden. Die Potentialunterschiede sind dabei nicht nur innerhalb eines Fahrzeuges, sondern auch in der Wechselwirkung mit der Umgebung, wie z. B. zu Bedienpersonal, Boden aber auch Betankungsanlagen zu betrachten.

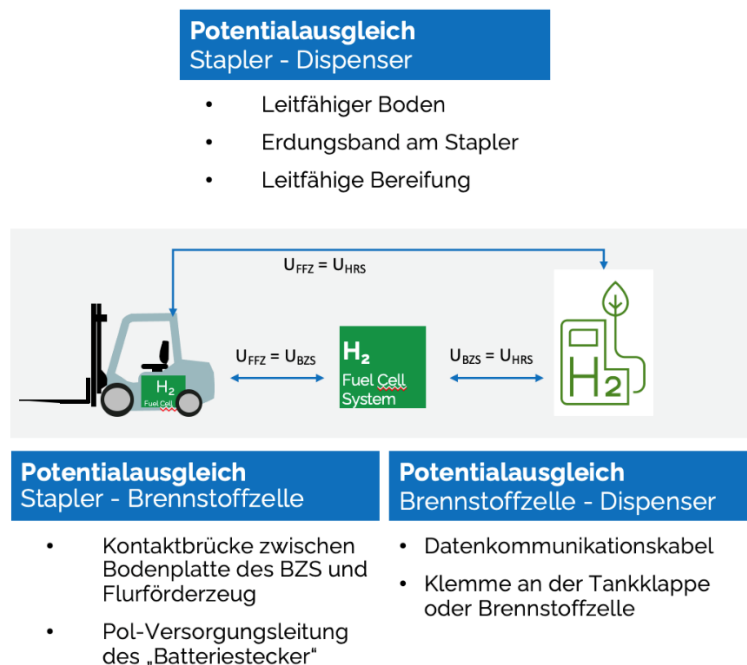


Abbildung 4: Potenzialausgleich zwischen Stapler, Brennstoffzellensystem und H₂-Dispenser

Für die H₂-Betankung wird der Potenzialausgleich zwischen folgenden Komponenten betrachtet:

- a) Flurförderzeug – Brennstoffzellensystem
- b) Brennstoffzellensystem – H₂-Dispenser
- c) Flurförderzeug – Boden bzw. H₂-Dispenser

Auch für den Potenzialausgleich existieren zurzeit unterschiedliche Lösungen.

Potenzialausgleich zwischen Flurförderzeug – Brennstoffzellensystem

Der Potenzialausgleich zwischen dem Brennstoffzellensystem und Fahrzeug erfolgt direkt über einen Vorschaltkontakt im Boden des Batteriefachs, über ein Potenzialausgleichskabel oder über die Polversorgungsleitung des Batteriesteckers am Brennstoffzellensystem.

Potenzialausgleich zwischen Brennstoffzellensystem – H₂-Dispenser

Der marktführende Hersteller Plug Power stellt den Potenzialausgleich zwischen dem Brennstoffzellensystem und dem H₂-Dispenser während des Betankungsvorgangs über das Datenkommunikationskabel her.

Die geringe Akzeptanz bei vielen Betreibern ein zusätzliches Datenkommunikationskabel für die Betankung anzuschließen, hat zur Verwendung alternativer Methoden zur Sicherstellung des Potenzialausgleichs geführt. Eine solche Alternative beinhaltet die Verwendung von Erdungsklemmen, die vor dem Anschluss der Zapfpistole entweder an der Tankklappe des Flurförderzeugs oder direkt an den Brennstoffzellen angebracht werden.

All diesen Lösungswegen gemein ist, dass der Anschluss des Potenzialausgleichskabel zu erfolgen hat, bevor die Zapfpistole mit dem Tankstutzen verbunden ist. Dieses wird i. d. R. durch entsprechende Bedienungsanweisungen an dem Dispenser realisiert. Im Beispiel des Plug Power-Dispensers (s. Abbildung 5) sind dazu die Kupplungen nummeriert, die entsprechenden Zahlen und Symbole findet man auf den Plug Power GenDrive-Brennstoffzellensystemen wieder⁴:

- „1“: Datenkommunikations- und Erdungskabel
- „2“: Entwässerungsschlauch
- „3“: H₂-Zapfpistole bzw. -Tankstutzen



Abbildung 5: Chronologische Anordnung der Betankungskupplungen beim Plug Power-Dispenser

Die Bedienungsweisung allein stellt allerdings nicht sicher, dass das Potenzialausgleichskabel vor der H₂-Betankung angeschlossen ist. Zumindest bei allen besuchten Einsatzorten in Europa fand allerdings eine Signal-Überprüfung innerhalb des Dispensers statt, so dass die Betankung nur bei angeschlossenem Potenzialausgleichskabel gestartet werden konnte.

⁴ Vgl. (Plug Power Inc., 2019, S. 37)

Potenzialausgleich zwischen Flurförderzeug – H₂-Infrastruktur

Aufgrund der geltenden Richtlinien und den in den Normen und technischen Regeln weiter definierten Maßnahmen, müssen Flurförderzeuge jeweils für sich geerdet werden, um statische Aufladungen, die sich z. B. durch die Reibung der Räder beim Fahren ergeben, ableiten zu können.

In der praktischen Umsetzung zeigen sich grundsätzlich zwei Methoden zur Herstellung eines Potenzialausgleichs:

- a) Potenzialausgleich über Erdungsbänder (oft als „Massebänder“ bezeichnet), die unter dem Chassisboden des Flurförderzeugs angebracht sind oder
- b) Potenzialausgleich über eine leitfähige Bereifung.

Beide Möglichkeiten zeigen in der Praxis jedoch potenzielle Schwachstellen, die eine konstant zuverlässige Wirkung des Potenzialausgleichs in Frage stellen. Einerseits besteht die Möglichkeit, dass die Erdungsbänder während des Betriebs unbemerkt abreißen, z. B. wenn sich diese in Bodenunebenheiten verfangen. Die Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Erdungsbänder vor jeder Betankung durch den Gabelstaplerfahrer ist grundsätzlich als unpraktikabel zu bewerten.

Andererseits wurde bei der Verwendung leitfähiger Bereifung für den Potenzialausgleich festgestellt, dass obwohl die Hersteller von Flurförderzeugen in der Regel die kostspieligeren leitfähigen Reifen verwenden, die Felgen jedoch häufig vollständig lackiert sind. Diese Lackschicht verringert aber die Leitfähigkeit und somit die zuverlässige Ableitung von Potenzialunterschieden von der Achse über die Felgen zur Bereifung. Um eine sichere Ableitung zu gewährleisten, müssten die Felgen zumindest um die Bohrlöcher herum blankgeschliffen sein, was jedoch in der Praxis nicht erkennbar war. Zudem besteht bei Außeneinsätzen das Risiko, dass die Bereifung so stark verschmutzt, dass dieses ebenfalls die Leitfähigkeit zum Boden beeinträchtigen kann.

Eine weitere Unsicherheit bei der Ableitung über den Boden – sowohl für Erdungsbänder als auch bei funktionierender leitfähiger Bereifung -, stellt die Frage dar, inwieweit der Industrieboden tatsächlich die erforderliche Leitfähigkeit aufweist. Selbst wenn der Industrieboden gemäß den entsprechenden Anforderungen konzipiert wurde, können betriebsbedingte Verunreinigungen, wie beispielsweise Hydrauliköl aus den Schläuchen des Hubgerüsts, die Leitfähigkeit des Bodens beeinträchtigen. Daher kann der Potenzialausgleich über den Boden bei der Wasserstoffbetankung nicht uneingeschränkt sichergestellt werden.

B.4. Wegfahrsperr

Die Wasserstoff-Dispenser sind mit einer Abreißkupplung ausgestattet. Diese gewährleistet, dass im Fall des versehentlichen Wegfahrens eines Flurförderzeug mit noch angeschlossener Füllkupplung, die Abreißsicherung kontrolliert die Verbindung zwischen Zapfsäule und Betankungsschlauch zum Flurförderzeug trennt. Parallel dazu schließt ein Rückschlagventil und verhindert so ein Ausströmen von Wasserstoff. Hierdurch sollen auch potenzielle Schäden an der Füllkupplung oder dem Tankstutzen minimiert werden. Trotz dieser Sicherheitsmaßnahmen kann eine Auslösung der Abreißsicherung gewisse Schäden aber nicht gänzlich vermeiden.

Die Abreißsicherungen können nach einer Funktionsprüfung zwar erneut verwendet werden, jedoch kann der Dispenser bis zur abgeschlossenen Instandsetzung nicht weiter genutzt werden. Das bedeutet, dass die Auslösung der Abreißsicherung trotz aller Vorichtsmaßnahmen zu einer vorübergehenden Betriebsunterbrechung führen kann.

Um zu verhindern, dass der Fahrer vor dem Abschluss des Betankungsvorgangs wegfährt, werden die meisten H₂-Flurförderzeuge mit einer Wegfahrsperr ausgestattet.

Bei Aktivierung der Wegfahrsperr versorgt das Brennstoffzellensystem das Flurförderzeug mit einer nur begrenzten Leistung, wodurch sichergestellt wird, dass das Fahrzeug nicht weggefahren werden kann. Gleichzeitig wird aber die Betriebsbereitschaft des Fahrzeugs aufrechterhalten und für kleinere Verbraucher wie z. B. externe Monitore für Lagerverwaltungssoftware eine ausreichende Stromversorgung zur Verfügung gestellt.

Der Weg, wie die Wegfahrsperr aktiviert wird, ist jedoch unterschiedlich gelöst:

- **Variante „Kommunikationskabel“:**
Durch das Kommunikationskabel, dass vor der Betankung anzuschließen ist, erhält das Brennstoffzellensystem das entsprechende Signal. Diese Methode wird aktuell von Globe und Plug Power angeboten.
Bei den Einsatzfällen, bei denen kein Kommunikationskabel genutzt wird, kommen andere Aktivierungsmethoden zum Einsatz.
- **Variante „Tankklappe“:**
Bei größeren Flurförderzeugen, wie z. B. Gegengewichtsstaplern oder 80V-Schleppern, ist das Brennstoffzellensystem oft hinter einer seitlichen Verkleidung bzw. Batterie-trogtür eingebaut. Einige FFZ-Hersteller haben bei diesen Einbausituationen einen Ausschnitt mit Tankklappe (s. Abbildung 6, Bild Mitte) in dieser Seitenverkleidung des Staplers vorgesehen, um einen einfachen Zugang zur Betankungskupplung zu ermöglichen. In diesen Fällen wird oft ein Kontaktschalter in der Tankklappe verbaut, der im



Abbildung 6: Wegfahrsperr

geöffneten Zustand der Klappe die Wegfahrsperre aktiviert. Insbesondere bei kleineren, vor allem 24V-Lagertechnikgeräten ist das Brennstoffzellensystem meist nicht hinter einer Verkleidung, sondern ist von außen direkt sichtbar. Herstellerseitig gibt es hierfür weder von den Brennstoffzellensystem - noch von Flurförderzeug-Herstellern eine standardisierte Lösung. Eine teilweise verwendete Sonderlösung hierfür ist die

- **Variante „Kontaktschalter am Tankstutzen“:**
Hierbei befindet sich ein Aktivator am Tankstutzen des Brennstoffzellensystems, der beim Ankuppeln der Zapfpistole aktiviert wird und das entsprechende Signal im Brennstoffzellensystem weitergibt.

Eine Wegfahrsperre ist eine sicherheitsrelevante Funktion, die bereits für batteriebetriebene Flurförderzeuge mit integriertem Onboard-Ladegerät standardisiert ist. Bei wasserstoffbetriebenen Intralogistikfahrzeugen ist dieses aktuell nicht einheitlich gelöst und bei einigen Fahrzeugeinsätzen gar nicht vorhanden. Im letzteren Fall gewährleistet nur die Abreißkuppelung am Dispenser, dass durch das Wegfahren während des Betankungsvorgangs kein Wasserstoff austreten kann. Durch eine Wegfahrsperre können unnötige Reparaturkosten und Ausfallzeiten des Dispensers vermieden werden.

B.5. Dispenser

Folgende Hersteller für H₂-Infrastrukturen bzw. der Dispenser wurden befragt:

- Linde Gas (CIN)
- Maximator (CIN-extern)
- Plug Power (CIN)
- Rheingas (CIN)
- Wolf tank (CIN-extern)

B.5.1. Tankstutzen und Zapfpistole

Je nach Brennstoffzellensystem-Hersteller und Einsatzort werden zwar unterschiedliche Tankstutzen und Füllkupplung verwendet, untereinander sind die Komponenten aber günstiger Weise kompatibel zueinander. Damit hat sich in dem Bereich bereits ein „Marktstandard“ etabliert.

Die derzeit weltweit am häufigsten verwendete Füllkupplung ist die TK16 von WEH, die beispielsweise von Plug Power eingesetzt wird. Die TK17 hingegen stellt eine bedienerfreundlichere Alternative dar, die für die Einhandbedienung konzipiert ist.

Die Stäubli-Füllkupplung CHV08 findet u.a. bei der automatisierten Betankungsanlage bei BMW in Leipzig Verwendung. Der Vorteil der Stäubli-Kupplung ist der Bajonett-Verschluss, der sich für Greifmechanismen bei Betankungsrobotern einfacher automatisieren lässt. Der Nachteil des Bajonett-Verschlusses ist, dass dieser vom Bediener während des Betankungsvorgangs mit einem kräftigen Zug gelöst werden kann (beabsichtigte Fehlbedienung).

Die Füllkupplungen und passenden Tankstutzen entsprechen der SAE 2600 für 350bar-Betankung. Hier gibt es noch die Klasse „High Flow“, die allerdings für größere H₂-Tankvolumina (wie z. B. Busse) vorgesehen ist. Für die Intralogistik wird die „High-Flow“-Variante nicht verwendet.



Abbildung 7: Tankstutzen und Zapfpistolen für Intralogistik



Abbildung 8: Abnutzungserscheinungen an der Füllkupplung

Bei dem üblichen, sehr robusten Einsatz der Infralogistikfahrzeuge sind bei allen Einsätzen deutliche Abnutzungserscheinungen an den Füllkupplungen zu erkennen. Bei klassischen H₂-Einsätzen in der Intra-logistik werden die Dispenser oft mehrmals pro Stunde angefahren. Der Betankungsvorgang soll dabei möglichst schnell vonstattengehen. Hierbei zeigen sich im praktischen Einsatz, dass Füllkupplungen bisweilen unbeabsichtigt fallengelassen werden oder mit Objekten innerhalb des Bewegungsradius kollidieren. Bei einem betrachteten Einsatzort war sogar festzustellen, dass eine Gummidichtung an der Füllkupplung fehlte und offenbar während des Betriebs verloren gegangen war.

B.5.2. Sensorik und Überdruckabsicherung

Alle befragten Hersteller von Wasserstoff-Infrastrukturen verbauen im Dispenser einen Drucksensor und Sicherheitsventile, um eine unzulässige Überschreitung des Maximaldrucks des H₂-Tanks zu vermeiden.

Die Temperatur in den H₂-führenden Leitungen werden hingegen nicht von allen Dispenser über eine Sensorik überwacht.

Wenn Druck- und Temperatur am Dispenser erfasst werden, entsprechen diese nur teilweise den Anforderungen der funktionalen Sicherheit.

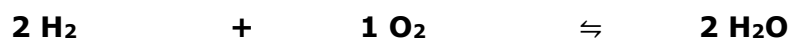
B.6. Wasserabsaugung

Bei der chemischen Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff entsteht als Nebenprodukt reines deionisierte und demineralisierte Wasser. Bei den meisten mobilen Brennstoffzellen-Anwendungen, z. B. im Automobilbereich, wird das Nebenprodukt Wasser entweder ausgeblasen oder über ein Blech kondensiert und kontinuierlich auf den Boden abgetropft. Würde man analog bei wasserstoffbetriebenen Intralogistikfahrzeugen verfahren, würde so viel Feuchtigkeit entstehen, dass dieses in den Lagerhallen merklich wäre, so könnte u.a. der Industrieboden nass und rutschig werden.

Wieviel Wasser entsteht bei der Reaktion?

Ein Rechenbeispiel:

Chemische Reaktion:



Molare Masse:

$$2 \times 1,0079 \frac{\text{g}}{\text{mmol}} + 1 \times 15,9994 \frac{\text{g}}{\text{mmol}} = 18,0153 \frac{\text{g}}{\text{mmol}}$$

Das bedeutet, es kann bei einer 100%igen Ausbeute der Reaktion aus 2 kg Wasserstoff ca. 18 kg Wasser bzw. 18 Liter Wasser entstehen. Was einem Umrechnungsfaktor von ca. 1 kg Wasserstoff: 9 Liter Wasser entspricht.

Da in der Realität nie 100% Wasserstoff in Wasser umgewandelt wird, entsteht tatsächlich deutlich weniger Wasser als Nebenprodukt bei der Reaktion in einer Brennstoffzelle.

Alle im Markt verfügbaren 24 Volt-Brennstoffzellensysteme sind luftgekühlt und blasen das Nebenprodukt Wasser über die Lüfter aus. Die geringen Wassermengen, die dort bei der Reaktion entstehen, können für die großen Logistikhallen vernachlässigt werden. Bei den leistungsstärkeren, insbesondere den 48V- und 80V-Brennstoffzellensystemen, wird das Wasser hingegen im System kondensiert und in einem Wasser-Abscheidungstank gesammelt.

Eine Wasserabsaugung am Dispenser kann aktuell als Sonderlösung angesehen werden und gehört nicht zum Standard von marktüblichen H₂-Dispensern für mobile Anwendungen – Ausnahme ist hier Plug Power, die mit den GenFuel-Dispensern eine eigene Komplettlösung für In-tralogistikanwendungen mit passender Wasserabsaugung anbieten.

Andere Infrastruktur-Hersteller bieten die Wasserabsaugung optional (auf ausdrücklichen Wunsch des Endanwenders) an.

Für die Wasserabsaugung hat sich in der Intralogistik eine Schnellverschlusskupplung mit einer Nennweite von 7.8 etablierte die u.a. folgende Spezifikationen aufweist:

- Arbeitsdruck: 35bar
- Temperaturbereich: -20 bis 100°C
- Doppeltes Absperrventil
- Einseitige Schlauchtülle für einen Schlauchdurchmesser von 13 mm (1/2 Zoll)
- Material der Kupplung: vernickeltes Messing
- Dichtungsmaterial: Mischung von Fluorkautschuk (FKM) und Perfluorelastomer (FPN)

Das fahrzeugseitig verwendete Kupplungsstück für die Wasserabsaugung entspricht den Abmessungen und Konstruktion wie in Abbildung 9 und Abbildung 10 gezeigt.

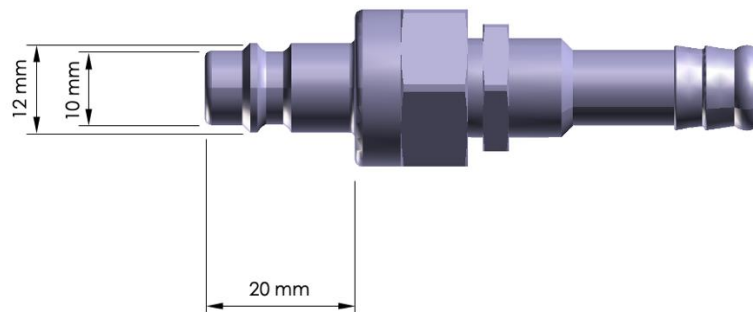


Abbildung 9: Bemaßung Schnellverschlusskupplung für Wasserabsaugung (fahrzeugseitig)⁵

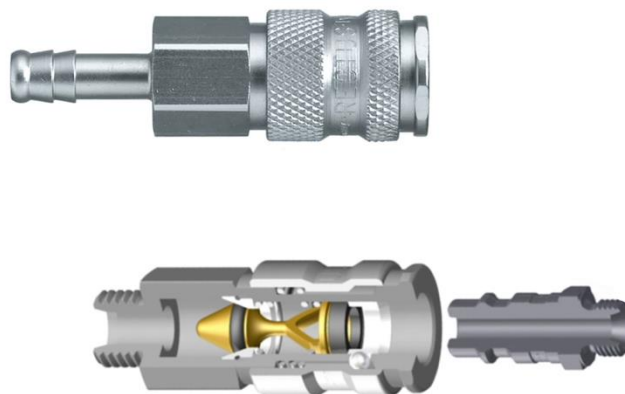


Abbildung 10: 3D-Ansicht Schnellverschlusskupplung für Wasserabsaugung (Dispenser)⁶

⁵ S. vgl. (Parker Hannifin GmbH, 2023)

⁶ S. vgl. (Parker Hannifin GmbH, 2023)

Zudem weist der von Plug Power verwendete Stecknippel (Rectus 25SBTS10MVN) die Besonderheit auf, dass als Rückschlagelement eine Kupplung mit Stift und nicht mit Kugel verwendet wird.

Nicht einheitlich gelöst ist hingegen, wohin das Wasser abgeführt wird. Dieses ist meist eine Frage, die am Einsatzort und in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten individuell gelöst wird.

Weitere Verwendung und Ableitung über das Hallendach

Das Reinstwasser kann für andere Prozesse wie z. B. für Reinigungsgeräte, für die Aquamatik von Bleisäure-Batterien oder auch für Lackieranlagen weitergenutzt werden, um Bezugskosten für, das hochwertige Wasser an anderen Stellen einsparen zu können. In diesem Fall kann es vor Ort in Behälter gesammelt werden oder wird z. B. über das Hallendach zur weiteren Verwendung abgeführt.

Ableitung über die Schmutzwasserkanalisation

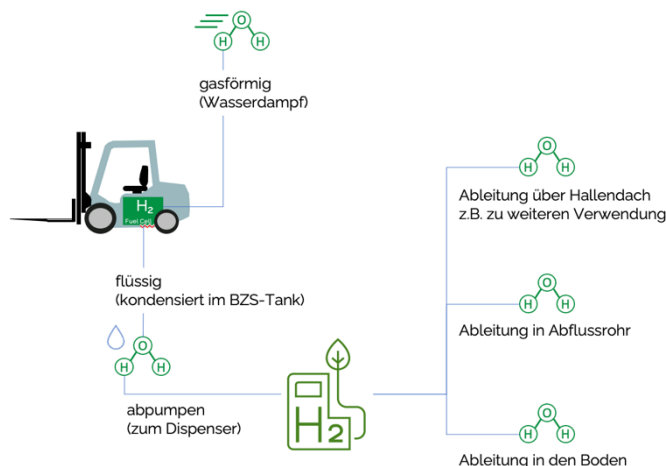


Abbildung 11: Wasserabführung

Für den Fall das aus dem Brennstoffzellensystem extrahierte Wasser betriebstechnisch nicht weiterverwendet werden kann und eine Entsorgung notwendig ist, variieren die regulatorische Anforderungen regional teils unterschiedlich. Einige Regulierungsbehörden nehmen die Position ein, dass das deionisierte Wasser nicht in das Grundwasser gelangen sollte. In diesen Fällen muss es dem Schmutzwasserkanal zugeführt werden.

Eine alternative, teilweise verfolgte Methode besteht darin, das Wasser auf den Boden im Freien ablaufen zu lassen, wo es entweder verdunstet oder po-

tenziell ins Grundwasser gelangt. Die Annahme hierbei ist, dass die natürlichen Verunreinigungen auf dem Boden das demineralisierte Wasser hinreichend mit Mineralien anreichert und eine Ableitung in das Grundwasser - selbst in geringen Mengen - unbedenklich ist.

Herausforderung für die Außenbetankung

Die Wasserabsaugung stellt zudem eine kritische Anforderung für die Außenbetankung von Intralogistikfahrzeugen dar. Da bei winterlichen Temperaturen (Minusgraden) das Wasser gefriert, sind die Dispenser nicht ohne weitere Maßnahmen für den Außeneinsatz bzw. für Umgebungstemperaturen < 5°C freigegeben.

Bei den Einsätzen, wo die Außenbetankung dennoch realisiert wird, gibt es zwei unterschiedliche Wege, wie vermieden wird, dass das Wasser in der Leitung gefriert:

1. Variante:

Durch eine externe Heizung, die z. B. den Abwasserschlauch erwärmt (z. B. im Einsatz im AUDI-Werk Neckarsulm)

2. Variante:

Bei der Wasserabsaugung wird genutzt, dass die Abwärmen des Brennstoffzellensystems auch das gesammelte Wasser so weit erwärmt, dass es nicht gefrieren kann.

Für die Wasserabsaugung wird dann entweder Druckluft verwendet (Venturiprinzip) oder über eine nach unten ablaufende Wasserableitung entlüftet, so dass das Wasser frei abfließen kann. Die Abwasserschläuche am Dispenser werden so weitestgehend entleert. Durch die Entlüftung kann sich zudem gefrierendes Wasser ungehindert ausdehnen, wodurch Frostschäden vermieden werden.

B.7. Daten- und Kommunikationsschnittstelle

Mit Ausnahme von einem einzelnen Brennstoffzellensystem-Hersteller wird grundsätzlich eine Kommunikationsschnittstelle zum Dispenser bereitgestellt. Die Wege, wie die Daten zwischen Brennstoffzellensystem und Dispenser übermittelt werden, sind im Markt allerdings sehr unterschiedlich gelöst.

B.7.1. Aktuell verwendete Kommunikationsschnittstellen im europäischen Markt

In folgendem Abschnitt wird ein erster Überblick über die aktuell im europäischen Markt realisierten und verfügbaren technischen Lösungen für die Kommunikationsübertragung zwischen Brennstoffzellensystem und Dispenser gegeben. Eine detaillierte technische Beschreibung und Vergleich der relevanten Technologie findet sich im Abschnitt D.1 - Drahtlose Datenübertragung.

Datenkommunikationskabel

Für Intralogistikanwendungen wird global die Übermittlung via Datenkommunikationskabel am häufigsten verwendet. Dabei ist der von Plug Power genutzte 10-polige Industriestecker vom Typ Samtec ACR-16-02-H-00.25-S-BC-M-1 am weitesten verbreitet.

Der Vorteil der kabelgebundenen Datenübertragung ist, dass das zu betankende Brennstoffzellensystem am Dispenser eindeutig identifiziert werden kann, wodurch Verwechslungen mit anderen Fahrzeugen in unmittelbarer Nähe ausgeschlossen werden.

Zu den Nachteilen zählt neben dem Verschleiß der Stecker - vorwiegend durch verbogene PINs oder gebrochene Kabel -, vor allem der höhere Handhabungsaufwand für die Bediener.

Da der Stecker in einer bestimmten Ausrichtung mit dem Brennstoffzellensystem verbunden werden muss und das Aufstecken mitunter nicht bedienerfreundlich ist, ist die Akzeptanz dieser Technik bei vielen Endnutzern gering. Obwohl eine optionale Aufsteckhilfe angeboten wird und das Anbringen des Steckers erleichtert, bleibt diese Methode dennoch für den Bediener suboptimal.



Abbildung 12: SamTec-Kabel mit Aufsteckhilfe

Infrarot (IR)-Schnittstelle



Abbildung 13: IR-Sensor an einer H₂-Befüllkupplung

Zu den im Markt erhältlichen Infrarot-Schnittstellen für Füllkupplungen (z. B. von WEH) werden von keinem BZS-Hersteller aktuell Infrarot-Schnittstellen am Brennstoffzellensystem im Bereich der Intralogistikanwendungen angeboten.

Der Einsatz in der Intralogistik ist sehr anspruchsvoll und auch an der Füllkupplung kommt es durch die Häufigkeit der Betankung zu starken Abnutzungserscheinungen (s. auch Abbildung 8: Abnutzungserscheinungen an der Füllkupplung). Würde in diesem Umfeld ein Infrarotsensor genutzt werden, müsste bei diesem die Funktionsfähigkeit regelmäßig überprüft werden und voraussichtlich oft ausgetauscht werden. Die Betriebskosten würden dadurch deutlich negativ beeinflusst werden.

Ein weiterer wesentlicher Kritikpunkt ist, dass die Infrarot-Schnittstelle durch die bereits beschriebene Anfälligkeit für Ausfälle nicht für eine sicherheitsgerichtete Datenkommunikation anwendbar ist,

RFID

Die RFID -Technologie ist ein Sender-Empfänger-System, das berührungslos über elektromagnetische Wellen Informationen zur Identifikation und Lokalisierung von Objekten übermittelt.

Das RFID-System besteht aus einem RFID-Transponder, auch RFID-Tag genannt, der am Brennstoffzellensystem z. B. an den Lüftungsgittern mit Kabelbindern angebracht wird und einem Lesegerät (Reader), das sich am Dispenser befindet. Der RFID-Reader erzeugt ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld, das vom RFID-Tag aufgenommen wird und während der Kommunikationsphase als Stromversorgung des Tags dient.

Aktuell werden in der Intralogistik für die H₂-Betankung, zur reinen Identifikation des Brennstoffzellensystems am Dispenser, bisher nur Systeme mit unidirektionaler Datenübertragung verwendet. Teilweise verfügen die FFZ-Fahrer bereits über separate RFID-Tags, die sie für ihre Identifikation am Dispenser nutzen.

Die Signalübertragung kann beispielsweise durch die Stahlverkleidung vom Brennstoffzellensystem, Flurförderzeug oder auch anderen im Nahbereich des Dispensers befindlichen metallischen Objekten beeinträchtigt werden. Dieses Fall wurde sogar bei einem besuchten Einsatzort beobachtet.

Ultra-Wideband (UWB)

Eine weitere Möglichkeit ist die kabellose Datenübertragung mittels Ultra-Wideband-Technologie, die an einem Einsatzort gerade in Betrieb genommen wurde.

Hierzu wird auf dem Brennstoffzellensystem eine UWB-Electronic Control Unit (kurz: ECU, Steuereinheit) angebracht. Diese Steuereinheit (kurz: ECU_{FCS}) wird mit 12 - 24 V DC direkt vom Brennstoffzellensystem mit Strom versorgt und verfügt über ein Funkmodul mit eigener MAC-Adresse (eineindeutige ID).

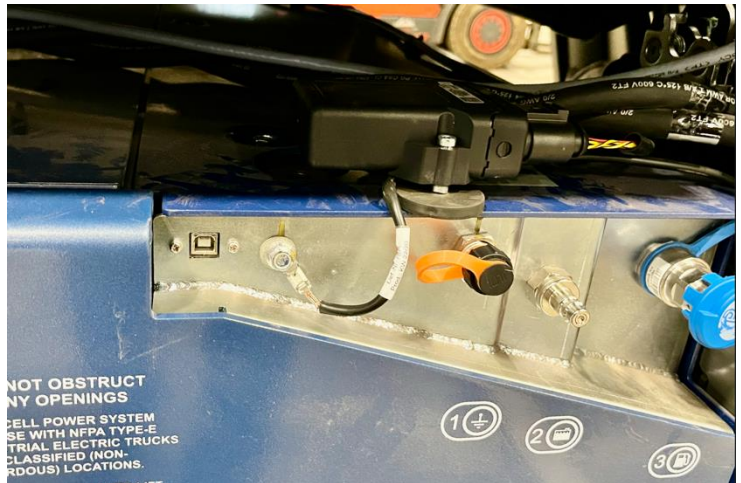


Abbildung 14: UWB-Electronic Control Unit (ECU) auf einem Brennstoffzellensystem

Die verwendete ECU_{FCS} -Einheit verfügt neben der UWB-Schnittstelle auch über 2x CAN-Busse und Schalt-Eingänge und -Ausgänge. Somit besteht die Möglichkeit, weitere Schnittstellen zum Flurförderzeug oder zum Dispenser anzubinden. Bislang wird diese Option jedoch nicht verwendet.

Eine zweite Steuereinheit befindet sich am Dispenser (kurz: ECU_{HRS}). Sie kann die entsprechende MAC-Adressen und den Abstand in cm, der sich in der Nähe befindlichen ECU empfangen und über eine TTL-Schnittstelle via TTL-RS232 entsprechende Informationen des Brennstoffzellensystems (ECU_{FCS}) an die SPS des Dispensers weitergeben.

Beispiele von Daten die zwischen den beiden ECUs ausgetauscht werden können:

- MAC-Adressen im Umfeld
- relativer Abstand in cm
- getankte Menge an H₂
- Temperaturverlauf
- Druckverlauf
- Aktueller Füllstand des H₂-Tanks
- Synchronisierung der Zeitstempel der Einheiten
- Fehlercodes oder Status-Meldungen der jeweils angeschlossenen Einheiten Brennstoffzellensystem, Dispenser oder Flurförderzeug

Unter der Bedingung, dass diese ECU_{BZS} zuverlässig am Brennstoffzellensystem verbleibt, kann das Brennstoffzellensystem so eindeutig identifiziert werden.

Sowohl zusätzlich als auch alternativ kann eine weitere UWB-ECU am Flurförderzeug (ECU_{TRUCK}) installiert werden.

Als zusätzliche ECU_{TRUCK} kann der Stapler dann eigene Daten via Ultra-Wideband an die weitere Peripherie übermitteln. Die ECU_{TRUCK} könnte aber auch über den verfügbaren CAN-

Bus-Anschluss mit dem eingebauten Brennstoffzellensystem verbunden werden, so dass die ECU_{TRUCK} sowohl die Daten des Flurförderzeugs als auch des Brennstoffzellensystems an den Dispenser übermittelt.

Über die UWB-ECUs können neben der MAC-Adresse auch die relativen Abstände ermittelt werden. Ebenfalls besteht die Möglichkeit weitere Informationen uni-direktional oder bi-direktional via UWB zu übertragen. Diese Möglichkeit wird aktuell aber noch nicht genutzt.

CAN-Bus-Integration

Eine Sonderstellung nehmen die fahrerlosen Transportsysteme (FTS bzw. AGVs) ein, die über eine CAN-Bus-Schnittstelle zwischen Brennstoffzellensystem und Flurförderzeug verfügen. Das FTS kommuniziert kontinuierlich mit dem FTS-Leitstand. Der FTS-Leitstand benötigt u.a. die Daten des Tankfüllstands bzw. Tankdruck, um den Betankungsprozess in der Routenplanung mit zu berücksichtigen. Auch wird die Fälligkeit von Wartungsterminen oder Servicealarme an den Leitstand übermittelt. Der CAN-Kommunikationskanal wird z. T. auch genutzt, um für den Betankungsvorgang relevante Informationen wie z. B. das Temperatursignal des H₂-Tanks an den Dispenser weiterzuleiten.

Manuelle Dateneingabe

Neben der Übertragung von Daten über eine Kommunikationsschnittstelle findet oft auch noch eine manuelle Dateneingabe durch den Fahrer statt. Diese manuelle Eingabe kann auch in Ergänzung zu einer vorhandenen Kommunikationsschnittstelle dienen, um sowohl die Möglichkeit zu geben, den Betankungsvorgang auch bei fehlgeschlagener Datenverbindung zu starten oder als auch, um zusätzliche Daten einzugeben, die nicht über die eingerichtete Kommunikationsschnittstelle erfasst werden können.

B.7.2. Datenerfassung

Ob Erfassung über eine manuelle Eingabe am Dispenser oder Übertragung von Daten über eine Kommunikationsschnittstelle, aktuell wird bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Daten erfasst, wie eine Umfrage innerhalb der CIN-Mitglieder ergeben hat. Als wesentlich für die Betankung werden dabei nur folgende Daten angesehen:

- Initiale Tanktemperatur oder Außentemperatur
- Tankdruck
- Tankvolumen

Zusätzlich ist meist ist eine Autorisierung des Fahrers zur Freigabe der H₂-Tankstelle erforderlich. Hierfür werden meist werkseigene Systeme wie RFID-Karten oder auch eine manuelle Eingabe verwendet.

Da die Brennstoffzellensysteme austauschbar sind und in der Praxis nicht fest einem Fahrzeug zugeordnet sind, werden oft die Fahrzeug-ID und die Identifikationsnummer des Brenn-

stoffzellensystems ergänzend erfasst. Auch diese Eingabe wird meist manuell oder über ein separaten RFID-Tag übermittelt.

Die Ergebnisse der Befragung zu Datenerfassung zeigt wie unterschiedlich die Relevanz verschiedener Daten eingeordnet werden. Daraus lässt sich aber zumindest der Wunsch ableiten, dass neben den für eine schnelle H₂-Betankung relevanten Parameter auch die Erfassung weiterer Betriebsdaten zumindest sehr wünschenswert, wenn nicht sogar erforderlich ist. So werden aktuelle teilweise zusätzliche Daten erfasst, deren Relevanz für die Betankung aber als nicht wesentlich angesehen werden oder nur bei einzelnen Einsätzen erfasst werden. Dazu gehören:

- Tankuhrzeit
- Tankdatum
- Betankungsdauer
- H₂-Befüllmenge
- Fehlermeldung des Brennstoffzellensystem
- Leistung bzw. Kapazität der Batterie (Zwischenspeicher)
- State of Charge Batterie (Zwischenspeicher)
- Energieverbrauch (Standby)
- Energieverbrauch (Durchschnittsverbrauch)
- Statusmeldungen des Brennstoffzellensystems
- MAC-Adresse
- Abstand

B.7.3. Datenverwendung

Obwohl eine Vielzahl von Daten bereits erfasst wird, wird ihre Anwendung zur Steuerung der H₂-Betankung durch den Endnutzer/Betreiber nur eingeschränkt realisiert. Der Hauptgrund hierfür ist, dass die Datenübertragung nicht sicherheitsgerichtet erfolgt und daher nicht zur Steuerung und Regulierung der Betankungsvorgänge verwendet werden kann.

Teilweise wird von den H₂-Infrastrukturanbietern die Tanktemperatur nur als Ausgangswert für die Druckrampe genutzt. Alternativ dazu wird bei den Einsätzen überwiegend die Umgebungstemperatur als Referenzwert erfasst und für die Betankung genutzt.

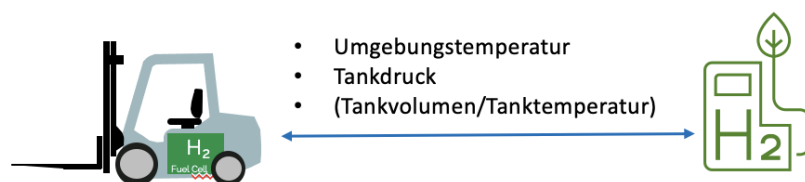


Abbildung 15: Datenverwendung

Auch eine Identifikation des konkret zur betankenden Brennstoffzellensystems bzw. der zu betankenden H₂-Tankgröße und des Tanktyps findet nur bei einigen wenigen Einsätzen statt.

Aufgrund der fehlenden Bezugsdaten wird die Druckrampe am Dispenser so voreingestellt, dass sie von den ungünstigsten Ausgangsbedingungen ausgeht – wie sommerlichen Höchsttemperaturen und der kleinstmögliche H₂-Tankgröße – ausgegangen wird. Dies wirkt sich nachteilig auf die Betankungszeit für größere Brennstoffzellensysteme aus, die dadurch deutlich langsamer betankt werden, als es technisch möglich wäre.

B.8. Betankungsprotokoll

Für Wasserstoffbetankungen wird oft auf das Betankungsprotokoll gemäß SAE J2601 verwiesen, welches jedoch nur sehr allgemeine Richtlinien für die Füllung und Umsetzung im Kontext von Intralogistikfahrzeugen liefert (s. genaueres im Abschnitt C.7 [SAE J2601-1 – Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles](#)). Bei Intralogistikanwendungen wird aktuell noch kein einheitliches Betankungsprotokoll genutzt, so dass die Betankung unterschiedlich durch die im Folgenden beschriebenen Prozesse charakterisiert wird.

Prüfstoß

Um die Dichtheit der H₂-Leitung vom Dispenser zum Fahrzeugtank zu Beginn des Betankungsvorgangs zu gewährleisten, erfolgt in der Regel ein erster Prüfstoß, meist mit 100 Bar oder weniger. Das automatische H₂-Absperrrventil des Dispensers wird dann geschlossen und der vorherrschende Befülldruck für einige Sekunden stabil gehalten. Der Drucksensor des Dispensers überwacht dabei Druckänderungen in der Leitung zum H₂-Fahrzeugtank. Läge der Druckabfall außerhalb vordefinierter Grenzen, bräche der Betankungsvorgang mit einer Fehlermeldung sofort ab.

In einigen Fällen wird eine weitere Dichtheitsprüfung während des Betankungsvorgangs durchgeführt. Hierbei wird gegen Ende des Betankungsvorgangs, also im oberen Druckbereich und nahe dem nominalen Betriebsdruck des Brennstoffzellensystems, die Betankung unterbrochen und ein möglicher Druckabfall erfasst.

Druckrampe

Bei der Inbetriebnahme wird die Betankungsgeschwindigkeit bzw. die Druckrampe und der Zieldruck am Dispenser voreingestellt. Hierfür wird bei Probetankungen die Temperaturentwicklung im H₂-Fahrzeugtank während der ersten Betankungsvorgänge über eine Service-Software des Brennstoffzellensystem-Herstellers überwacht und sich der bestmöglichen Druckrampe iterativ genähert.

Wenn am Dispenser keine sichere Identifikation des zu betankenden Brennstoffzellensystems möglich ist, wird für alle Betankungen eine konservative Druckrampe genutzt, die sich an dem möglichen „Worst-Case“-Szenario orientiert. Das Worst-Case Szenario wird dabei vom kleinstmöglichen Fahrzeugtank und einsatzortspezifischen Höchsttemperaturen am Dispenser bestimmt. Dieses hat zur Folge, dass die spätere Betankungszeit bei niedrigen Umgebungstemperaturen und vor allem für leistungsstärkere Brennstoffzellensysteme mit größerem H₂-Tank deutlich länger dauert als es tatsächlich notwendig wäre.

Ein häufiger Kritikpunkt der Infrastrukturanbieter ist zudem, dass es keine sicherheitsgerichtete Temperaturübermittlung gibt. Der einzige Hersteller der aktuell ein SIL-klassifiziertes Temperatursignal erfasst ist FES.

Bei allen besuchten Einsatzorten konnte beobachtet werden, dass die Betankung einer fixen Druckrampe folgt, die in den meisten Fällen bei ca. 100 bar/Minute eingestellt war. An dieser Stelle sei explizit erwähnt, dass dieses keine Empfehlung für eine Voreinstellung der Druckrampe sein soll, sondern lediglich als Referenzwert für spätere Betrachtungen dient

Zieldruck

Beim Überströmen steigt die Temperatur des gasförmigen Wasserstoffs. Abbildung 16 zeigt diesen Effekt in einem beispielhaften Druck- und Temperaturverlauf für eine H₂-Betankung von ca. 90 bar auf ca. 350 bar, wobei sich die Temperatur von ca. 20°C auf etwa 70°C erwärmt.

Kühlt sich der Wasserstoff im Tank dann nach dem Betankungsvorgang wieder kontinuierlich auf annähernd Umgebungstemperatur von 20°C ab, fiele damit auch der Druck im H₂-Tank analog ab.

Beispielhafter Druck-/Temperaturverlauf H₂-Betankung

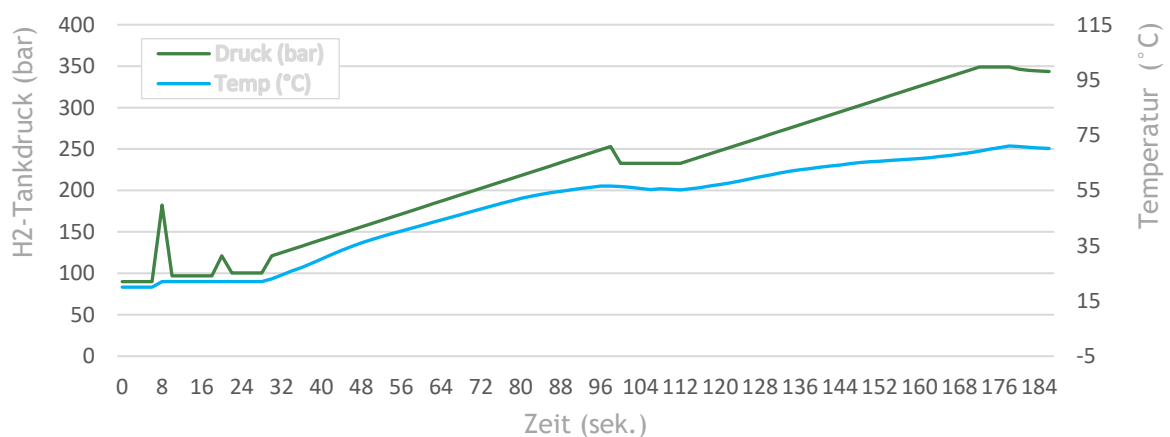


Abbildung 16: Beispiel des Druck- und Temperaturverlaufs bei einer H₂-Betankung

Das bedeutet, wenn die H₂-Infrastruktur den Druck vom Dispenser zum H₂-Tank des Intralogistikfahrzeugs nur bis zum Nennbetriebsdruck von 350 bar aufbaut, würde das mögliche Tankvolumen nicht vollständig ausgenutzt und das H₂-Flurförderzeug hätte zwischen den Betankungsvorgängen eine geringere Reichweite.

Um dem entgegenzuwirken, wird an einigen Einsatzorten zugelassen, dass der maximale Betriebsdruck des Dispensers tatsächlich bis auf über 400 bar ansteigt und damit oberhalb des Nennbetriebsdrucks von 350 bar liegt.

An den unterschiedlichen Einsatzorten konnte auch beobachtet werden, dass unterschiedliche Zieldrücke vom HRS-Hersteller zugelassen bzw. vor eingestellt waren.

Die Druckrampen und Zieldrücke werden meist gemeinsam vom Hersteller für die H₂-Infrastruktur (Dispenser) und dem BZS-Hersteller für jeden Einsatzort individuell ermittelt. Eine Ausnahme stellt dabei die Plug Power eigene Komplettlösung dar, die aus GenDrive-Brennstoffzellensystemen und GenFuel-Dispenser besteht. Plug Power überwacht auf Grund des Kommunikationskabels zwischen Brennstoffzellensystem und dem Dispenser die Temperatur während der Betankung und nutzt diese zusammen mit eigenen Erfahrungswerten, um die Druckrampe für eine schnelle H₂-Betankung zu optimieren.

C. Anwendbarkeit von geltenden Richtlinien und Normen

In diesem Abschnitt erfolgt eine Übersicht und Bewertung einzelner wesentlicher Richtlinien und Normen, die für einen möglichen deutschen und europäischen Standard der H₂-Infrastrukturen zur Betankung für Intralogistikanwendungen zu berücksichtigen sind. Eine vollständige Evaluierung aller aktueller Richtlinien und Normen, die in diesem Kontext Bezug nehmen, ist nicht Bestandteil dieser Studie.

Richtlinien können auf verschiedenen Ebenen existieren, von internationalen oder nationalen Behörden bis hin zu Unternehmensrichtlinien. Durch Gesetze, Verordnungen und Verträge können Richtlinien rechtlich verbindlich gemacht werden oder in anderen Fällen auch nur als Leitlinien dienen. In vielen Ländern, wie u. a. in Deutschland, dienen Richtlinien oft als rechtlicher Rahmen, der allgemeine Ziele und Prinzipien beispielsweise im Bereich der Sicherheit, Umweltschutz und Qualitätssicherung festlegt.

Normen hingegen sind technisch Spezifikationen und Standards, die von anerkannten Standardisierungsorganisationen erstellt werden. Sie bieten detaillierte Anleitungen und Empfehlungen, die für die Einhaltung der Anforderungen der Richtlinien dienlich sind und helfen somit dabei die in den Richtlinien festgelegten Ziele zu erreichen.

Unabhängig davon, ob Normen durch Richtlinien rechtlich binden sind, entscheiden sich Unternehmen und Organisationen oft dafür, Normen zu befolgen, um bewährte Praktiken zu implementieren und sicherzustellen, dass Ihre Produkte und Dienstleistungen allgemein anerkannten Qualitäts- und Sicherheitsstandard und dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Diese gilt insbesondere in den Fällen neuerer Technologien, zu denen ein rechtlicher Rahmen noch nicht hinreichend festgelegt wurde.

Dieser Einordnung folgend wird hier zunächst auf die Richtlinien und dann auf die Normen eingegangen, wobei jeweils die übergeordneten internationalen, dann europäischen und abschließend nationale Normen genannt werden.

Zu beachten ist, dass einzelne Richtlinie jeweils nur ein Teil eines umfassenderen rechtlichen Rahmens der Europäischen Union ist und diese ggf. in Verbindung mit anderen Richtlinien und Verordnungen angewendet werden können. Als einer der wesentlichen Richtlinien für diese Studie, zählt die europäische Maschinenrichtlinie 2006/42/EG. Daneben existieren weitere Richtlinien, wie u. a.

- die Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU
- die EMV-Richtlinie 2014/30/EU
- die Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU
- die ATEX-Richtlinie 2014/34/EU
- die Richtlinie zum Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe AFIR 2014/35/EU

auf die im Einzelnen in dieser Ausarbeitung nicht weiter eingegangen wird, da sich dadurch keine anderen Erkenntnisse ergeben. So ist beispielsweise die AFIR 2014/35/EU für die Empfehlung zu der Standardisierung der H₂-Infrastruktur nur für die durchaus erwünschte Interoperabilität der Infrastruktur für die Betankung von Kraftfahrzeugen relevant. Hierzu

verweist diese EU-Richtlinie für die Betankungskupplung für die H₂-Betankung im Anhang 2 weiter auf die in dieser Ausarbeitung genannten Normen ISO 17268 und die ISO 19880-1 (ersetzt ISO/TS 2010o).

Den allgemeinen rechtlichen Rahmen für die Inbetriebnahme und das erforderliche Betriebsgenehmigungsverfahren einer H₂-Infrastruktur bilden meist nationale Verordnungen, wie die in Deutschland geltende Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) §18. So ist gemäß §18 BetrSichV der Betreiber von Anlagen mit explosionsgefährlichen Stoffen verpflichtet eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Konkretere methodische Hinweise und Empfehlungen für die Ermittlung und Bewertung der Gefährdungen liefert hierzu die „Leitlinie für die Durchführung von Gefährdungsbeurteilungen zur Ermittlung und Beurteilung von Gefährdungen durch explosionsfähige Atmosphäre“ – kurz „LV49“. Als Grundlagen für die Bewertung der Maßnahmen verweist die Leitlinie LV49 weiter auf z. B. Technische Regeln und weitere Erkenntnisquellen zum Stand der Technik wie z. B. Normen.⁷

Die Normen werden in diesem Abschnitt nur insoweit für Intralogistikanwendungen allgemein bewertet, wie sie inhaltlich Einfluss auf die Schnittstelle zwischen dem Dispenser (Zapfsäule) und dem Brennstoffzellensystem für Intralogistikfahrzeuge haben. Explizit nicht Bestandteil ist die Bewertung allgemeiner Anforderungen der Normen, die generell für H₂-Infrastrukturen und für mobile Anwendungen im Allgemeinen gelten.

Es wird vorgeschlagen für zukünftige Normungen für Intralogistikanwendungen mit Wasserstoff, den Anwendungsbereich klar auf austauschbare Brennstoffzellensysteme (fuel cell systems) im Sinne von „battery replacement module“ (BRM) der SAE J2601 für Leistungsklassen bis ca. 30kW bzw. Tankgrößen bis ca. 5 kg Wasserstoff zu beschränken. Hintergrund ist, dass es weitere Intralogistikanwendungen, wie z. B. Containerhandler gibt, die über vollintegrierte Brennstoffzellensysteme verfügen und deutlich größere Fahrzeugtanks einsetzen, für die zumindest perspektivisch auch andere Betankungstechnologien – z. B. 700 bar oder 350 high flow relevant werden könnten. Diese größeren Tanks können beispielsweise auch durch die SAE J2601 abgebildet werden oder sich an die Betankung von Wasserstoff-LKWs anlehnen.

Einordnung von ISO-Normen und SAE-Normen

Sowohl die ISO-Normen als auch die SAE-Normen sind Standards, auf die sich international bezogen werden.

Die SAE-Normen werden von der amerikanischen Society of Automotive Engineers (SAE) entwickelt. Die SAE stellt eine globale, nicht gewinnorientierte Organisation dar, die sich auf die Weiterentwicklung der Mobilitätstechnologie konzentriert, insbesondere im Bereich der Automobilindustrie. SAE-Normen sind in erster Linie auf die Bedürfnisse der Automobil- und Luftfahrtindustrie ausgerichtet. Sie decken Aspekte wie Fahrzeugtechnik, Motorleistung, Kraftstoffeffizienz, elektronische Systeme, Sicherheit und vieles mehr ab. Die Entwicklung von SAE-Normen basiert auf einer technischen Expertise und dem Input von Fachleuten aus der Industrie, einschließlich Ingenieuren, Herstellern und anderen Fachleuten. SAE-Normen sind in erster Linie amerikanische Normen, die allerdings aufgrund der Globalisierung und

⁷ Vgl. (Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI), Oktober 2017)

internationalen Struktur der Automobilindustrie auch von anderen Ländern und internationalen Organisation übernommen wurden.

Auf der anderen Seite stehen ISO-Normen, die von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelt und nicht auf spezielle Bedürfnisse eines konkreten Industrie- bzw. Anwendungsbereichs ausgerichtet sind. In Abgrenzung zu SAE-Normen sind ISO-Normen allgemeiner und breiter gefasst und zielen auf die Förderungen der internationalen Harmonisierung und Interoperabilität ab, um den internationalen Handel zu erleichtern und die Qualität von Produkten und Dienstleistungen weltweit zu verbessern. Die ISO-Normen basiert im Gegensatz zur SAE nicht auf der Expertise von Fachleuten aus der Industrie, sondern besteht aus einem Zusammenschluss von nationalen Normungsorganisationen aus verschiedenen Ländern. Sie strebt die Harmonisierung und Standardisierung von Produkten, Dienstleistungen und Prozessen auf globaler Ebene an und wird durch einen konsensbasierten Ansatz entwickelt, bei dem verschiedene Interessengruppen und Experten aus verschiedenen Ländern beteiligt sind.

Obwohl die ISO- und SAE-Normen ähnliche Ziele verfolgen und bestimmte Überschneidungen aufweisen können, gibt es dennoch Unterschiede zwischen ihnen. Zu beachten ist, dass die in diesem Abschnitt betrachteten SAE-Normen – soweit im Rahmen dieser Studie bekannt – keine direkte Verbindung zu gesetzlichen Regelungen in der EU haben und keine Harmonisierung der SAE-Normen zu EU-Richtlinien erfolgt ist. Allerdings können die SAE-Normen teilweise zur Spiegelung des „Stand der Technik“ herangezogen werden und somit für die Studie dennoch einen profunden Beitrag leisten.

C.1. Maschinenrichtlinie 2006/42/EG

Die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG ist eine europäische Richtlinie, die grundlegende Anforderungen für Maschinen festlegt, die auf dem europäischen Markt in Verkehr gebracht werden.

In den Mitgliedstaaten der Europäischen Union ist die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG durch die entsprechenden nationalen Rechtsvorschriften umgesetzt worden, wobei in Deutschland die rechtliche Umsetzung auf Grundlage des Produktsicherheitsgesetzes (ProdSG) erfolgt, das neben der Maschinenrichtlinie auch weitere europäische Richtlinien für den Binnenmarkt in nationales Recht umsetzt. Auch in der Neunte Produktsicherheitsverordnung wurden die Vorgaben der Maschinenrichtlinie umgesetzt.^{8 9} Je nach Land kann die rechtliche Umsetzung in den anderen EU-Mitgliedstaaten variieren, muss aber die grundlegenden Anforderungen und Prinzipien der Richtlinie berücksichtigen.

Die Maschinenrichtlinie regelt generelle Voraussetzungen für das Inverkehrbringen von Maschinen, Kennzeichnungsregeln, Verwaltungsmaßnahmen gegen unsichere Maschinen, sowie Konformitätsbewertungsverfahren. Dafür werden in der Maschinenrichtlinie auch entsprechende Anwendungstermine und Umsetzungsfristen festgelegt.

Die Artikel 1 bis 29 stellen den in der EU rechtlich bindenden Teil der der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG dar. Da dort auf die Anhänge I bis XII verwiesen wird, sind diese Anhänge ebenfalls rechtlich bindend.

In den Anhängen I bis XII der Maschinenrichtlinie werden folgende Aspekte behandelt:

- Anhang I
Grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen
- Anhang II
Erforderliche Angaben und Aufbewahrungsfrist für die EG-Konformitätserklärung
- Anhang III
Gestaltungs- und Kennzeichnungsregeln für die CE-Kennzeichnung
- Anhang IV
Auflistung von Maschinenkategorie, für die ein besonderes Konformitätsbewertungsverfahren anzuwenden ist
- Anhang V
Auflistung von Beispielen für Sicherheitsbauteile
- Anhang VI
Anforderungen an Montageanleitung für unvollständige Maschinen
- Anhang VII
Anforderungen an die technischen Unterlagen für Maschinen
- Anhang VIII
Beschreibung des Konformitätsbewertungsverfahren

⁸ (Bundesministerium der Justiz, 2023)

⁹ Vgl. (DGUV Test - Prüf- und Zertifizierungssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung , 2023)

- Anhang IX
Beschreibung der EG-Baumusterprüfung
- Anhang X
Beschreibung des Verfahrens zur umfassenden Qualitätssicherung
- Anhang XI
Anforderungen an die benannten Stellen für die Konformitätsbewertung
- Anhang XII
„Entsprechungstabelle“, die die Artikel der vorherigen Maschinenrichtlinie 98/37/EG der neuen MRL zuordnet

C.1.1. Anwendungsbereich der Richtlinie

Die Richtlinie gilt für eine Vielzahl von Maschinen und Erzeugnissen u.a. auch für austauschbare Ausrüstungen, Sicherheitsbauteile, Lastaufnahmemittel, Ketten, Seile und Gurte, abnehmbare mechanische Übertragungseinrichtungen sowie nicht vollständig installierte Maschinen. Kraftfahrzeuge fallen allerdings nicht in den Anwendungsbereich der Maschinenrichtlinie.

Inwieweit Brennstoffzellensysteme im Sinn der Maschinenrichtlinie selbst als Maschine bzw. „unvollständige Maschine“ (Antriebssystem) anzusehen sind, ist innerhalb der FFZ- und Brennstoffzellensystemhersteller seit Jahren eine umstrittene Frage. Die Klärung dieser Frage ist nicht Bestandteil dieser Studie. Als rechtlich sicherste Variante in der EU gilt daher, das Brennstoffzellensystem im eingebauten Zustand und damit als Komponente des Flurförderzeugs in Verkehr zu bringen („Gesamt-CE“).

C.1.2. Übertragung auf Intralogistikanwendung

Für Intralogistikfahrzeuge bzw. Flurförderzeuge bildet die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG den grundlegenden rechtlichen Rahmen.

Wesentlich für die Betrachtung in dieser Studie sind die im Anhang I beschriebenen „grundlegenden Sicherheits- und die Gesundheitsschutzanforderungen“, die u.a. Integration der Sicherheit, Schutz gegen elektrische und thermische Gefahren für Maschinen grundlegend regelt. Weiterhin sind im Anhang I Bestimmungen zur Risikobeurteilung sowie zur Abfassung der Betriebsanleitung und Kennzeichnung enthalten.

Die Hersteller haben dafür Sorge zu tragen, dass eine Risikobeurteilung vorgenommen wird und geeignete Maßnahmen am Fahrzeug und den Brennstoffzellensystem zur Risikominde- rung für die Betankung vorgenommen werden. Dabei ist nicht nur der bestimmungsgemäße Gebrauch des Intralogistikfahrzeuge zu bewerten, sondern auch "vernünftigerweise vorher- sehbare Fehlanwendung".

Im Sinne der Integration der Sicherheit zur Beseitigung von Risiken müssen entsprechende Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden, und zwar in der Reihenfolge:

1. Bauliche oder konstruktive Maßnahmen zur Beseitigung oder Minimierung der Risiken so weit wie möglich
2. Ergreifen von notwendigen Schutzmaßnahmen gegen Risiken, die sich nicht (konstruktiv) beseitigen lassen
3. Unterrichtung der Benutzer über die Restrisiken aufgrund der nicht vollständigen Wirksamkeit der getroffenen Schutzmaßnahmen und ggf. Hinweis auf eine eventuell erforderliche spezielle Ausbildung oder persönliche Schutzausrüstung.

Sonstige Gefährdungen, wie beispielsweise durch elektrostatische Aufladung muss konstruktiv vermieden oder begrenzt werden. An dem Fahrzeug sind entsprechende Maßnahmen zum Ableiten statischer Elektrizität vorzusehen.

Das Fahrzeug und Brennstoffzellensystem muss so konstruiert und gebaut sein, dass jedes Brand-, Überhitzungs- und Explosionsrisiko durch die Maschine selbst vermieden wird und auch keine Gefahren von freigesetzten Gasen, wie Wasserstoff ausgehen.

Im üblichen Charakter einer Richtlinie gibt die Maschinenrichtlinie keine konkreten Maßnahmen vor, sondern legt allgemeine Ziele und Prinzipien fest, die umzusetzen sind.

C.2. TRGS 751/TRBS3151¹⁰ - Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Gasfüllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen

C.2.1. Anwendungsbereich der Technischen Regel

Die technische Regel behandelt die Anforderungen an Montage, Installation und Betrieb von ortsveränderlichen und ortsfesten Gasfüllanlagen sowie Tankstellen für Landfahrzeuge, um Beschäftigte und andere Personen vor Druck-, Brand- und Explosionsgefahren zu schützen. Sie behandelt auch die möglichen Gefahren, die aus der Arbeitsumgebung dieser Anlagen und durch Interaktionen mit anderen Arbeitsmitteln entstehen, sowie die notwendigen Maßnahmen, die sich aus der Zusammenarbeit verschiedener Arbeitgeber ergeben. Die technische Regel enthält auch die sicherheitstechnischen und organisatorischen Maßnahmen, um den durch den Betrieb von Tankstellen und Gasfüllanlagen entstehenden Brand-, Explosions- und Druckgefahren wirksam zu begegnen.

C.2.2. Übertragung auf Intralogistikanwendung

Die TRBS 3151 legt Anforderungen an die Sicherheitseinrichtungen und die Verfahren bei der Befüllung von Wasserstofffahrzeugen fest, um Unfälle zu vermeiden. Dazu gehören unter anderem Anforderungen an die Qualität der Wasserstoffversorgung, die Sicherheitsabstände und die Verwendung geeigneter Druckentlastungssysteme.

Die Vorschrift beschreibt auch Anforderungen an die Qualifikation von Personen, die mit der Befüllung von Wasserstofffahrzeugen beauftragt sind.

Außerdem werden Empfehlungen für die Gestaltung von Wasserstofftankstellen gegeben, einschließlich der Anforderungen an die Infrastruktur und die Notfallausrüstung.

Insbesondere hinsichtlich der Befüllung landgebundener Fahrzeuge mit Wasserstoff legt die TRBS 3151 Anforderungen an die Befülltechnologie und -ausrüstung fest. Auch die Anforderungen an die Fahrzeuge selbst werden beschrieben, wie z. B. die technische Eignung, Leckageerkennung und Überwachung von Druck und Temperatur.

Die TRBS 3151 bietet somit einen umfassenden Rahmen für die sichere Befüllung landgebundener Fahrzeuge mit Wasserstoff.

¹⁰ Vgl. (TRBS 3151/ TRGS 751, 2019) (Wikipedia, 2023)

C.3. ISO 19880-1:2020 ¹¹ -Gaseous hydrogen – Fuelling stations

C.3.1. Anwendungsbereich der Norm

Die ISO 19880-1:2020 ist ein internationaler Standard, der sich mit der Sicherheit von Tankstellen für die Abgabe von gasförmigem Wasserstoff befasst. Die ISO 19880 besteht aus mehreren Teilen, die die konkreten Anforderungen an die Tankstellen festlegen.

- **Teil 1: Allgemeine Anforderungen**
erläutert die allgemeinen Anforderungen, die in den folgenden Teilen genauer spezifiziert werden.
- **Teil 2: Abgabeeinrichtungen und Handhabung.**
legt die Anforderungen an das Abgabesysteme fest.
- **Teil 3: Absperrvorrichtungen**
- **Teil 4: compressors (Verdichter)**
- **Teil 5: Schläuche und Schlauchbaugruppen**
gibt Empfehlungen, die einen sicheren und zuverlässigen Umgang mit gasförmigem Wasserstoff sicherstellen.
- **Teil 6: Verbindungsstücke**
- **Teil 7: O-Ringe**
- **Teil 8: Qualitätsüberwachung des Kraftstoffs**
- **Teil 9: Sampling for fuel quality analysis**
beschreibt die Probenahme für Qualitätsprüfung des Kraftstoffs

Ziel der Norm ist es, Mindestanforderungen für die Sicherheit von Tankstellen für die Abgabe von gasförmigem Wasserstoff zu definieren.

Hierfür werden Anforderungen benannt, die für

- die Auslegung und Konstruktion,
- den Aufbau,
- die Inbetriebnahme,
- den Betrieb sowie
- die Inspektion und Wartung

relevant sind.

Verfasst wurde die ISO 19880 für die H₂-Betankung leichter Nutzfahrzeugen (FCEV), sie enthält aber auch Anforderungen und Anleitungen für die Betankung mittelschwerer und schwerer Straßenfahrzeuge (z. B. Busse, Lkw).

¹¹ Vgl. (ISO 19880-1, 2020)

Die ISO kann nur auf die Betankung von gasförmigem Wasserstoff angewendet werden. Ausgeschlossen werden Anwendungen von kryogenen Wasserstoffs und Wasserstoff für Metallhybridanwendungen.

Die in der ISO definierten Mindestanforderungen können durch zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen für Intralogistikanwendungen ergänzt werden, wenn diese durch eine Risikomanagement-Methode bestimmt wurden.

Insbesondere vor dem Hintergrund, dass die H₂-Infrastrukturen für Intralogistikanwendungen auch von H₂-Nutzfahrzeugen und -LKWs genutzt werden soll, gewinnt die Norm an Bedeutung. Auch wenn die Wasserstoff-Zapfsäule (Dispenser) als Endstück der H₂-Infrastruktur für Flurförderzeuge und Nutzfahrzeuge bzw. LKWs unterschiedlich ausgestaltet werden kann.

C.3.2. Übertragung auf Intralogistikanwendungen

Da die in der ISO 19880 beschriebenen allgemeine Anforderungen auch für andere Anwendungen gelten, ist sie auch für Intralogistikanwendungen von Bedeutung. Konkret werden hierzu im Kapitel Anwendungsbereich (“Scope”) dieser ISO-Norm folgende Anwendungen als Beispiele genannt:

- Gegengewichtstapler („fork lift trucks“)
- Indoor-Betankung
- Mobile Betankung
- Nicht öffentliche Demonstrationsfahrzeuge.

H₂-Dispenser

Der Standort des Dispensers sollte so gewählt werden, dass entsprechend der örtlich geltenden Betriebsgenehmigungsvorschriften das Risiko für Benutzer, Betriebspersonal, Grundstücke und die Umwelt auf ein akzeptables Maß reduziert wird. Als potenzielle Risiken werden dabei Brände, Verpuffungen, Detonationen und Druckwellen verstanden.¹²

Generell gilt, dass alle Komponenten, die im regulären Betrieb mit Wasserstoff in Berührung kommen aus entsprechenden Werkstoffen für Wasserstoffverträglichkeit hergestellt sind und für die entsprechend zu erwartenden Drücke ausgelegt sind.¹³

Um entsprechend der unbeabsichtigten Freisetzung von Wasserstoff entgegenzuwirken, müssen Absperrventile zwischen der Betankungsanlage (mit H₂-Bevorratung und -Verdichtung) zum Dispenser eingebaut werden, die die Wasserstoffzufuhr absperren können. Eine Absperrventil vom Dispenser zum H₂-Fahrzeugtank bzw. Brennstoffzellensystem wird nicht explizit gefordert.

Hingegen sind Druckentlastungsventile (Pressure relief devices – PRDs) zwischen dem Dispenser und dem Brennstoffzellensystem vorzusehen, um diese vor Überdruck zu

¹² (ISO 19880-1, 2020, S. 16)

¹³ Vgl. (ISO 19880-1, 2020, S. 33)

schützen. Die Überdrucksicherungen sind auf oder unter den höchstzulässigen Betriebsdruck des Brennstoffzellensystems einzustellen.¹⁴

Eine weitere Maßnahme ist u.a., dass die Benutzer-Maschine-Schnittstelle unkompliziert gestaltet sein muss.¹⁵ Hierzu würde auch die unkomplizierte Bedienung des Dispensers durch die Staplerfahrer gehören, ebenso wie die Vermeidung von Fehlern oder Mängeln in der Software oder der Steuerlogik.¹⁶

Die Wasserstoff-Betankungsanlage sollte möglichst im Freien aufgestellt werden. Dispenser dürfen auch in geschlossenen Räumen (indoor) aufgestellt werden, wenn Abhilfemaßnahmen getroffen werden, die Häufigkeit oder Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung von Wasserstoff zu minimieren. Hierzu zählt:

- Die Anzahl der Verbindungen sollte möglichst minimiert werden.
- der Betriebsdrucks sollte zur Vermeidung von Überdruck kontinuierlich überprüft werden

Um die Wahrscheinlichkeit einer Entzündung zu verringern, müssen u.a. folgende Abhilfemaßnahmen getroffen werden¹⁷:

- Einschränkung der Aktivitäten (z. B. durch Kontrolle der Fahrer-, Fahrzeug- oder Brennstoffzellensystem-ID);
- Konstruktion von Bauteilen oder Geräten;
- elektrische Maßnahmen (z. B. Potenzialausgleich);
- Verfahren. (z. B. antistatische Kleidung oder funkenfreies Werkzeug, begrenzter Zugang).

Dispenser sollten sich nicht in einer direkten Verkehrslinie befinden oder in geeigneter Weise gegen den Aufprall von Intralogistik-Fahrzeugen geschützt sein. Zudem sollte die Notwendigkeit von Fahrzeugmanövern im Bereich des Dispensers auf ein Minimum reduziert sein. Der Aufprallschutz für Flurförderzeuge sollte die voraussichtliche Geschwindigkeit der Fahrzeuge in der Nähe des Dispensers berücksichtigen. Im Anhang G werden Beispiele und Empfehlungen für entsprechende Maßnahmen zum Schutz vor dem Aufprall von Fahrzeugen aufgeführt, wie Betonsockel und Dimensionierung des Anfahrtsschutzes und Sensoren zur Erkennung von Kollisionen mit dem Dispenser.

¹⁴ Vgl. (ISO 19880-1, 2020, S. 18)

¹⁵ Vgl. (ISO 19880-1, 2020, S. 107)

¹⁶ Vgl. (ISO 19880-1, 2020, S. 110)

¹⁷ Vgl. (ISO 19880-1, 2020, S. 109)

Betankungsprotokoll

Der Dispenser muss als Schnittstelle zwischen der H₂-Betankungsanlage und dem H₂-Fahrzeug verhindern, dass die zulässigen Temperatur- und Druckgrenzwerte des Fahrzeugtanks beim Betanken überschritten werden.¹⁸

Um sicherzustellen, dass die Betankung innerhalb der definierten Prozessgrenzen des Betankungsprotokolls für Druckwasserstoffspeichersysteme in Fahrzeugen erfolgt, müssen Wasserstoffzapfsäulen entweder

- ein genehmigtes, veröffentlichtes Betankungsprotokoll, wie z. B. die SAE J2601 verwenden oder
- ein Protokoll verwenden, das vom Fahrzeug-Hersteller für die einzelnen Fahrzeuge für die H₂-Betankung an der Tankstelle freigegeben wurde.¹⁹
Die ISO 19880 setzt hierbei voraus, dass der Fahrzeug-Hersteller mit dem Brennstoffzellensystem-Hersteller gleichzusetzen ist. Wenn ein derartiges Protokoll für Intralogistikfahrzeuge entwickelt wird, sollte dieses entsprechend zwischen Brennstoffzellensystem- und Flurförderzeug-Hersteller dokumentiert werden.

Im Anhang F wird in auf Dispenser für die Betankung von Flurförderzeugen konkret eingegangen („forklift fuelling“).

Dispenser mit einer Kommunikationsschnittstelle (z. B. Kommunikationskabel) sollen

- die Betankung stoppen, wenn das Kommunikationssignal für den Gabelstapler nicht verfügbar ist
- standardmäßig eine konservative Betankung, nach einem von einer Normungsausschuss genehmigten Verfahren voreingestellt haben, wenn ein für den Straßenverkehr zugelassenes Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) an der Zapfsäule vorfährt
- die Betankung von Brennstoffzellenfahrzeug verhindern, wenn diese ein Kommunikationsprotokoll verwenden, das nicht vom Hersteller der Tankstelle genehmigt wurde

Dispenser ohne Kommunikationsschnittstelle sollte über eine physische Sperre verfügen, damit ein für den Straßenverkehr zugelassenes Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) nicht tanken kann, oder es sollte eine konservative Betankung gemäß Normen und Standard-Vorgaben vorgenommen werden.

Da 350bar Brennstoffzellenfahrzeuge die gleiche Betankungskupplung vom Typ H35 verwenden (sollen), wäre die konservative Betankung hier die leichter zu realisierende Variante. Es ist daher sinnhaft, eine auch zu FCEV-Anwendungen interoperable Kommunikationsschnittstelle zu schaffen, die also erkennt, was für ein Fahrzeug zu betanken ist, und zu bewirken, dass die ISO 19880 im Anhang F dieses Szenario entsprechend berücksichtigt.

¹⁸ Vgl. (ISO 19880-1, 2020, S. 45)

¹⁹ Vgl. (ISO 19880-1, 2020, S. 46)

Das Betankungsprotokoll muss direkt oder indirekt sicherstellen, dass die maximale Materialtemperatur des H₂-Fahrzeugtanks während der gesamten Betankung 85 °C nicht überschreitet.

Um einer Überfüllung oder Überhitzung des Fahrzeugtanks entgegenzuwirken, muss das Betankungsprotokoll folgende Parameter berücksichtigen

- möglicher Temperaturbereich des H₂-Fahrzeugtanks (CHSS)
- den vollständigen Temperaturbereich der Umgebung

Das Betankungsprotokoll muss die Füllgeschwindigkeit und den Zieldruck auf der Grundlage der gemessenen Umgebungs- und Prozessbedingungen anpassen und dabei konkrete Kriterien einhalten, die in der Norm Im Detail beschrieben werden.

Wenn einer der Prozessgrenzen nicht eingehalten wird oder das Kommunikationssignal abreißt, muss die Betankung binnen 5 Sekunden beendet werden.

Bei einer Betankung mit vorhandener Kommunikationsschnittstelle muss die Betankung ebenso binnen 5 Sekunden beendet werden, wenn ein Abbruch- oder Haltesignal vom Fahrzeugtank bzw. Brennstoffzellensystem zum Dispenser übermittelt wird.

Im Zuge der Dichtigkeitsprüfung darf vor der Betankung eine Prüfstoß mit maximal 200g Wasserstoff erfolgen.²⁰

Da die aktuell kleinsten Brennstoffzellensystem für Intralogistikfahrzeuge nur über eine maximale Tankkapazität von 260g verfügen, sollte die maximal erlaubte Menge für den Prüfstoß deutlich reduziert werden, da sonst der Fahrzeugtank durch den Prüfstoß überfüllt werden könnte.

Im Abschnitt 8.2.1.4 „Vehicle to station communication“ wird für die öffentlichen Betankung von H70-Fahrzeugen eine Kommunikationshardware und -software vorgeschrieben, um das Einhalten der entsprechenden Prozessgrenzen für die H70-Betankung sicher zu stellen. Für H35-Dispenser wird Entsprechendes empfohlen.

Bei einer vorhandenen Kommunikationsschnittstelle muss der Dispenser in der Lage sein, auf ein Abbruchsignal des Fahrzeugs zu reagieren und den Betankungsvorgang anzuhalten.

Der Benutzer der Zapfsäule sollte die Möglichkeit haben, die automatische Betankung einzuleiten und zu beenden.

²⁰ S. (ISO 19880-1, 2020, S. 47)

C.4. ISO 17268:2020²¹ - Gaseous hydrogen land vehicle refueling connection devices

C.4.1. Anwendungsbereich der Norm

Die ISO 17268 bezieht sich auf die Auslegung, Sicherheit und die betrieblichen Eigenschaften von Betankungskupplungen, wie Füllkupplungen und Tankstutzen, die für die Betankung von Landfahrzeugen mit gasförmigem Wasserstoff (GHLV – gaseous hydrogen land vehicle) verwendet werden.

Die Normen nimmt Bezug auf die SAE 2799 bzw. der dort beschriebenen Kommunikationsschnittstelle mittels Infrarotsensoren. Im Abschnitt „Kommunikationshardware“ geht die ISO 17269 auch in einer eigenen Rubrik näher auf das Thema ein.

In der ISO 17268 werden zunächst die Konstruktions-, Sicherheits- und betrieblichen Eigenschaften von Betankungsanschlüssen für gasförmigen Wasserstoff festgelegt, die anschließend den Umfang des erforderlichen Prüfverfahrens zur Auslegungsverifizierung bestimmen.

Die Norm umfasst folgende Komponenten als Betankungsanschlüsse:

- Füllstutzen und Schutzkappe (am Fahrzeug montiert);
- Zapfpistole;
- Kommunikationshardware.

Hierbei wird im Anhang A – E der ISO 17268 die Bemaßungen der zulässigen Betankungskupplungen durch detaillierte technische Zeichnungen normativ festgelegt. Ferner gibt die ISO 17269 auch die möglichen Druckstufen (Nennbetriebsdruck) für die Betankungsanschlüsse von GHLVs vor:

Druckklasse	Nennbetriebsdruck NWP bei 15°C	Max. Betriebsdruck MOP (1,25 x NWP)
H11	110 bar (11 MPa)	137,5 bar (13,75 MPa)
H25	250 bar (25 MPa)	312,5 bar (31,25 MPa)
H35	350 bar (35 MPa)	437,5 bar (43,75 MPa)
H35HF	350 bar (35 MPa)	437,5 bar (43,75 MPa)
H70	700bar (70 MPa)	875,0 bar (87,50 MPa)

Tabelle 2: Druckklasse ISO 17268

²¹ Vgl. (ISO 17268, 2020)

Der Mindestdruck, für den die Komponenten der Zapfsäule ausgelegt sein soll, ist

$$1,375 \times \text{NWP.}$$

Für eine H35-Füllkupplung also $350 \text{ bar} \times 1,375 = 481,25 \text{ bar}$

In der aktuellen Version der Norm wurde mittlerweile auch die Kommunikationshardware für die Betankung berücksichtigt, was in früheren Fassungen nicht der Fall war. Allerdings beschränkt sich die Kommunikationshardware rein auf die Infrarot-Schnittstelle nach SAE J2799, die an der Füllkupplung und dem Tankstutzen verbaut bzw. integriert ist.

Die Betankungsanschlüsse, die den Anforderungen der ISO 17268 entsprechen, dürfen ausschließlich für die Wasserstoff-Betankung von GHLVs genutzt werden. Die Betankung mit Wasserstoff-Erdgas-Gemischen wird explizit ausgeschlossen.

Kompatibilität der Betankungskupplungen:

Die Zapfpistole des Dispensers muss gemäß dieser Norm verhindern, dass wasserstoffbetriebene Fahrzeuge mit höherem Nennbetriebsdruck oder einer höheren Durchflussrate betankt werden. Somit dürfen 350bar-Brennstoffzellensysteme für Intralogistikanwendungen nicht durch eine H35HF-Füllkupplung (für höheren Durchfluss) betankt werden, die z. B. für H₂-Busse verwendet werden.

Auch muss die Betankungskupplung ein Betanken mit anderen (nicht-Wasserstoff-) Gasen ausschließen. Für Intralogistikanwendungen bedeutet das, dass z. B. die H₂-Füllkupplungen und Tankstutzen nicht kompatibel zur den Betankungskupplungen für Treibgas (LPG) oder Erdgas (CNG) sein dürfen.

Füllkupplung

Die Füllkupplungen müssen sich an Tankstutzen mit gleichem oder höherem Nennbetriebsdruck anschließen lassen. Ein Ankuppeln an Tankstutzen für einen niedrigeren Nennbetriebsdruck darf nicht möglich sein.

Ferner darf die Füllkupplung nur für GHLV-Fahrzeuge kompatibel sein. Der Anschluss an andere gasbetriebene Fahrzeuge muss ausgeschlossen sein.

Es werden drei Typen (A, B und C) von Füllkupplungen in der ISO-Norm unterschieden, die sich im Wesentlichen dadurch unterscheiden, wie das Restgas abgelassen wird, wenn die Zapfsäule abgeschaltet wird

Allen Typen gemein ist, dass sie einen Gasdurchfluss nur dann zulassen, wenn eine formschlüssige Verbindung zwischen Füllkupplung und Tankstutzen (Empfängerstutzen) sicher hergestellt ist.

Tankstutzen

Die Tankstutzen in den Druckstufen von 110 bis 350 bar sind so gestaltet, dass sie abwärtskompatibel sind, d. h. ein 350bar-Brennstoffzellensystem könnte an einem 250bar-Dispenser betankt werden. Dies wird erreicht in dem der vordere Teil der Tankkupplung H11 – H35 zwar identisch ist, die Tankstutzen der höheren Druckstufen aber über ein längeren Wellenabsatz verfügen (s. Abbildung 17: Tankstutzen, oben H35 unten H25).

Das Aufsetzen der Füllkupplung niedrigerer Druckklassen ist somit möglich, wenn auch nicht komfortabel, da der Anschlagring des Tankstutzens bei der kürzeren Füllkupplung nicht wirkt.

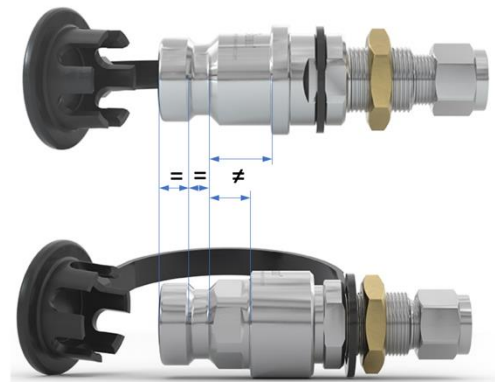


Abbildung 17: Tankstutzen, oben H35 unten

H25²²

Die Füllkupplungen der höheren Druckstufen H35HF (350 bar, high flow) und H70 (700 bar) sind nicht abwärtskompatibel.

Schutzkappen

Die Funktionalität der Tankstutzen darf durch Verunreinigungen mit Feststoffen nicht beeinträchtigt werden. Um das zu gewährleisten, müssen die Tankstutzen so konstruiert sein, dass sie entweder unempfindlich gegenüber Verunreinigungen sind oder der Tankstutzen muss vor entsprechenden Verunreinigungen geschützt sein. Wenn hierfür Schutzkappen vorgesehen sind, müssen diese mit einer Haltevorrichtung zum Tankstutzen versehen sein. Alternativ gilt die Anforderung auch als erfüllt, wenn der Tankstutzen beispielsweise mit einem vorgelagerten Filter von geeigneter Größe ausgestattet ist, durch den die Funktionalität des Rückschlagventils geschützt wird.²³

Kommunikationshardware

Wie schon bereits erwähnt bezieht sich die ISO 17268 nur auf die in der Betankungskupplung integrierte Infrarot-Schnittstelle (IrDA).

Interessanterweise wird durch den Absatz „Nozzle“ die Infrarot-Schnittstelle nach SAE J2799 (Füllkupplung) 5.17 und den später in Abschnitt 7.6 beschriebenen Dropping Test (Fallprüfung) verlangt, dass auch die Kommunikationshardware - also die integrierten Infrarotsensoren - dem harten Prüfungsverfahren unterzogen werden. Dabei muss die Füllkupplung zunächst für 24 Stunden auf -40°C gekühlt werden und dann binnen fünf Minuten zehn Mal aus 2 m Höhe auf den Betonboden fallengelassen werden. Der Kommunikationstest (Abschnitt 7.28 der Norm) schreibt vor, dass der Infrarotsensor nach dem Falltest, wie

²² Vgl. (WEH GmbH, 2023)

²³ S. (ISO 17268, 2020, S. 7)

auch nach weiteren anderen Tests, voll funktionsfähig sein muss. Eine Ausnahme gilt dann, wenn der Infrarotsensor austauschbar ist. In der Praxis erscheint dieses notwendig, da der Infrarotsensor die Fallprüfung sehr wahrscheinlich nicht besteht.

C.4.2. Übertragung auf Intralogistikanwendung

Der Begriff GHLV leitet sich von der Klassifizierung der land vehicle („LV“) ab, der vom United States Patent and Trademark Office (USPTO) konkret definiert wird:

Als „land vehicle“ (LV) gelten dort alle Landfahrzeuge, die zur Fortbewegung auf dem Land geeignet sind und nicht anderweitig klassifiziert sind, wie z. B. Forst- und Landmaschinen. Der Begriff Fahrzeug („vehicle“) schließt als wesentliches Element eine Art Fahrwerk ein, das in der Regel einen Lastenträger trägt, aber auch direkt eine Last tragen kann und das Fahrzeug für die Fortbewegung auf einer Fläche geeignet macht. Der Hauptzweck der gemeinhin als Fahrzeuge bezeichneten Geräte ist die Beförderung einer Last, entweder von Gütern oder Personen, von einem Ort zum anderen. Die Idee des Ziehens einer Last, z. B. durch Lokomotiven, Zugmaschinen oder Traktoren, ist ebenfalls seit langem mit dem Begriff "Fahrzeug" verbunden²⁴.

Ob wasserstoffbetriebene Flurförderzeuge ebenso in den Anwendungsbereich dieser ISO fallen wie Nutzfahrzeuge und Züge ist nicht unstrittig. Im Sinne einer Interoperabilität mit angrenzenden Anwendungen, ist es aber sinnvoll, die ISO 17268 auch als Standard für Intralogistikanwendungen anzusehen.

Für die Integration einer IR-Kommunikationsschnittstelle in die Betankungskupplung ist diese Norm ebenfalls relevant. Wobei eine Kommunikation zwischen Brennstoffzellensystem und Dispenser außerhalb der Betankungskupplung nicht ausgeschlossen wird und somit zulässig ist.

Sowohl die SAE 2600 als auch die ISO 17268 stellen sicher, dass die Kompatibilität der H₂-Betankungskupplungen von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen der gleichen Druckstufe sichergestellt ist.

Für aktuelle Intralogistikanforderungen hat sich die 350bar-Betankung (H35) etabliert und empfiehlt sich die in der ISO 17268 und der SAE 2600 beschriebenen Betankungskupplungen für die H35-Betankung als Standard für Brennstoffzellensysteme festzulegen.

Brennstoffzellensysteme mit geringem Nennbetriebsdruck von z. B. 250 bar sind mittlerweile nicht mehr marktrelevant. Mit den H35-Tankstutzen (receptacle) besteht dennoch die Möglichkeit auch Dispenser für geringe Nennbetriebsdrücke zu nutzen – z. B. für Demo- und Testzwecke.

Größere Betankungskupplungen machen aus heutiger Sicht für Intralogistikanwendungen keinen Sinn, da die aktuell verbauten 350bar-Fahrzeigtanks der gängigen Flurförderzeuge eine Reichweite von etwa einer Schicht haben. Größere H₂-Tanks (z. B. 700bar) könnten zwar eine längere Reichweite ermöglichen, die dafür notwendigen Mehrkosten in eine 700bar-Infrastruktur sind aber für die meisten Intralogistikanwendungen nicht lohnend.

²⁴ Vgl. ((USPTO), 2023)

Da an den Einsatzorten sowohl Intralogistik-Fahrzeuge als auch kommerzielle Fahrzeuge mit größeren Fahrzeugtanks zum Einsatz kommen, sollte deutlich gemacht werden, dass die H35-Betankungskupplung nicht kompatibel zur 35HF (high flow) ist.

Für die Kommunikationshardware, die in der ISO 17268 beschrieben ist, wären nur in den Betankungskupplungen integrierte Infrarotsensoren gem. SAE 2799 zulässig. Es wäre erstrebenswert, wenn die ISO 17268 in der nächsten Version hier technologieoffener wäre und auch z. B. NFC-Sensoren zuließe.

Die Prüfverfahren sollten dann auch für die anderen im den Betankungskupplungen integrierten Kommunikationstechnologien gelten. Hierbei wäre darauf zu achten, dass die in den Betankungskupplungen integrierte Kommunikationshardware auch die harten Prüfanforderungen erfüllt. Die Möglichkeit die Prüfverfahren für die Kommunikationshardware zu umgehen, wenn diese austauschbar ist, sollte nicht betrachtet werden, da dieses zu hohen Folgekosten im Betrieb der H₂-Infrastruktur führen würde.

Kupplungen zur Absaugung des Nebenprodukts Wasser, das in einigen Brennstoffzellensystemen der Intralogistikfahrzeuge gesammelt wird und beim Betanken abgesaugt werden sollte, werden in der ISO17268 nicht behandelt.

C.5. ISO 15118 – 20 – Road vehicles - vehicle to grid communication interface – Part 20: 2nd generation network layers and application layers requirements

C.5.1. Anwendungsbereich der Norm

Die ISO 15118 ist eine Normungsreihe, die sich mit der Kommunikation zwischen Elektrofahrzeugen (EVs) und Ladesäulen befasst. Die H₂-Betankung von Intralogistikfahrzeugen fällt nicht in den Anwendungsbereich der ISO 15118, aufgrund der thematischen Nähe wurde aber aus dem CIN-Netzwerk angeregt, diese Norm mitzubetrachten.

Die ISO 15118-Reihe spielt eine entscheidende Rolle bei der Standardisierung von Kommunikationsabläufen im Bereich des sogenannten "Smart Charging" oder "Intelligent Charging" von Elektrofahrzeugen und beschreibt den Informationsaustausch und die informationstechnische Gestaltung der Kommunikationsschnittstellen zwischen Elektrofahrzeuge und Ladesäulen. Ziel der Norm ist nicht nur den Ladevorgang selbst effizient und optimiert zu gestalten, sondern auch u.a. die herstellerübergreifende Interoperabilität und Sicherheit der Kommunikation sicher zu stellen, da u.a. für die Aktivierung des Ladevorgangs auch sensible Kundendaten, wie die Gültigkeit der Bankverbindungen ausgetauscht werden.

Als Grundlage verwendet die ISO 15118 das OSI-Schichtmodell, um die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeugen und Ladesäulen zu strukturieren und zu standardisieren

Exkurs: OSI-Schichtmodell

Das ISO- oder auch OSI-Referenzmodell (Open Systems Interconnection) ist ein Referenzmodell für Netzwerkprotokolle, das die Kommunikation in Computernetzwerken in sieben Schichten einteilt und eine klare Struktur für die Kommunikation zwischen verschiedenen Systemen und Geräten bietet. Zweck des OSI-Modells ist es, Kommunikation über unterschiedlichste technische Systeme hinweg zu beschreiben und die Weiterentwicklung zu begünstigen. Der Ursprung der Schichtenarchitektur des OSI-Modells entstand bereits Ende der 1970er Jahre und wird seit 1984 von der ISO als Standard beschrieben.

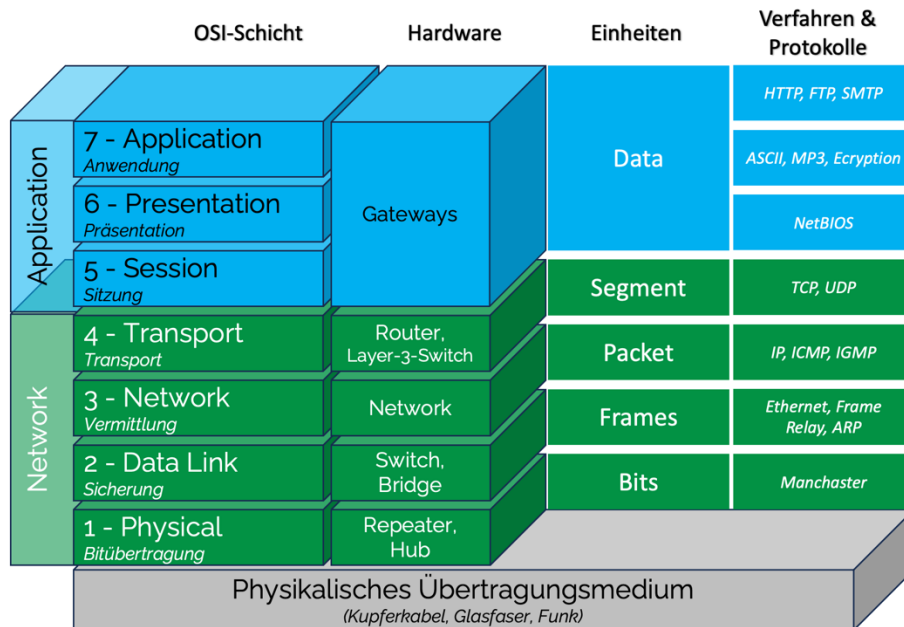


Abbildung 18: OSI-Schichtenmodell, Datenübertragung

Die im OSI-Modell definierten sieben aufeinanderfolgende Schichten (engl. layers) haben jeweils eng begrenzten Aufgaben. Wobei die in einer gleichen Schicht mit klaren Schnittstellen definierte Netzwerkprotokolle einfach untereinander austauschbar sind.²⁵

Jede Schicht erfüllt spezifische Funktionen und baut auf den darunterliegenden Schichten auf. Die Schichten sind:

1. Physikalische Schicht:

Die physikalische Schicht beschreibt die Verwendung von verschiedenen physischen Übertragungsmedien wie z. B. WLAN, Ethernet oder PLC (Powerline Communication) für die die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Geräten wie z. B. Brennstoffzellensystem und H₂-Dispenser.

2. Sicherungsschicht:

In der Sicherungsschicht wird die Authentifizierung und die Datensicherheit behandelt, um beispielsweise sicherzustellen, dass nur autorisierte Brennstoffzellensysteme mit dem Dispenser kommunizieren können und dass die Daten während der Übertragung geschützt sind.

3. Vermittlungsschicht:

Die Vermittlungsschicht definiert die Adressierung und Routing-Funktionen, um sicher-

²⁵ (Wikipedia, 2023)

zustellen, dass die Nachrichten zwischen den Brennstoffzellensysteme und Dispenser richtig zugestellt werden.

4. Transportschicht:

Hier werden die Mechanismen für den zuverlässigen Transport der Daten zwischen den beiden Systemen behandelt, einschließlich der Handhabung von Datenverlusten und -wiederholungen.

5. Sitzungsschicht:

Die Sitzungsschicht bestimmt den Aufbau und die Beendigung der Kommunikationssitzungen zwischen den Kommunikationspartnern.

6. Präsentationsschicht:

Die Präsentationsschicht legt das Datenformat und die Codierung fest, die für die Datenübertragung zwischen den Systemen verwendet werden.

7. Anwendungsschicht:

Die Anwendungsschicht beschreibt die spezifischen Anwendungsprotokolle und -nachrichten, die für die Interaktion zwischen Brennstoffzellensysteme und Dispenser verwendet werden.

Das OSI-Schichtmodell ermöglicht eine klare Trennung der Funktionen und eine einfachere Implementierung, da jede Schicht unabhängig von den anderen entwickelt werden kann. Es erleichtert auch die Interoperabilität zwischen verschiedenen Herstellern und würde eine einheitliche Kommunikation für die H₂-Betankung von Fahrzeugen ermöglichen.

Die Norm umfasst unter anderem:

1. Authentifizierung:

Die ISO 15118 definiert Methoden zur Identifizierung des Elektrofahrzeugs, des Fahrzeughalters oder Ladekunden, um sicherzustellen, dass nur autorisierte Nutzer Zugriff auf die Ladeinfrastruktur haben.

2. Laden von Strom:

Die Norm beschreibt ferner, wie die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladesäule gestaltet sein soll, um die geeignete Ladeleistung und den Ladezustand zu bestimmen.

3. Abrechnung:

ISO 15118 enthält Bestimmungen für die Abrechnung des Ladevorgangs, sodass die Kosten für die erbrachte Ladeleistung auf angemessene und transparente Weise erfasst und berechnet werden können.

4. Sicherheit:

Die Norm beinhaltet Sicherheitsrichtlinien, um sicherzustellen, dass die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation geschützt ist und potenzielle Sicherheitsrisiken minimiert werden.

Durch die Festlegung eines einheitlichen Standards für die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeugen und Ladesäulen erleichtert die ISO 15118 die Interoperabilität verschiedener Hersteller und erhöht die Benutzerfreundlichkeit für Elektrofahrzeugbesitzer. Darüber hinaus ermöglicht sie fortschrittliche Funktionen wie die bidirektionale Ladefähigkeit, bei der das Elektrofahrzeug nicht nur Strom aus der Ladesäule beziehen, sondern auch Strom zurück ins Netz einspeisen kann (Vehicle-to-Grid, V2G), was für das Stromnetz und das Energiemanagement von Vorteil sein kann.

Der Teil 20 der ISO15118-Normungsreihe legt den Fokus auf die technischen Spezifikationen der physikalischen und datenlinkschichtigen Kommunikation und beinhaltet unter anderem folgende Punkte:

Definition der physischen Schnittstelle:

Die Norm spezifiziert die physische Verbindung zwischen dem Elektrofahrzeug und der Ladesäule, die für die Kommunikation verwendet wird. Dies kann beispielsweise WLAN, Ethernet oder Powerline Communication (PLC) umfassen.

Datenkodierung und Modulation:

Der Teil beschreibt die Art und Weise, wie die Daten codiert und moduliert werden sollen, um eine zuverlässige und effiziente Übertragung zu gewährleisten.

Synchronisation und Timing:

Die Norm legt die Anforderungen an die Synchronisation und das Timing der Datenübertragung fest, um sicherzustellen, dass die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation ordnungsgemäß abläuft.

Fehlererkennung und Fehlerkorrektur:

Teil 20 behandelt auch Mechanismen zur Erkennung und Korrektur von Fehlern während der Datenübertragung, um die Zuverlässigkeit der Kommunikation zu verbessern.

Unterstützung von bidirektionalem Laden (Vehicle-to-Grid, V2G):

Der Teil kann auch Aspekte der bidirektionalen Kommunikation behandeln, die es dem Elektrofahrzeug ermöglicht, nicht nur Strom aus der Ladestation zu beziehen, sondern auch Strom ins Netz zurückzuspeisen.

C.5.2. Übertragung auf Intralogistikanwendung

Die ISO 15118 geht deutlich weiter als, die in der SAE J2799 beschriebene unidirektionale Kommunikation und definiert ein Protokoll für die bidirektionale Kommunikation und den Datenaustausch zwischen Elektrofahrzeugen und Ladestationen.

Für die informationstechnische Ausgestaltung der Kommunikationsschnittstelle für die H₂-Betankung von Intralogistikfahrzeugen kann der Teil ISO 15118-20 „Physical layer and data link layer requirements“ als Orientierung interessant sein. In diesem Teil werden die Anforderungen an die physikalische Schicht (Physical Layer) und die Datenverbindingsschicht (Data Link Layer) für die Kommunikationsschnittstelle zwischen

Elektrofahrzeugen und dem Stromnetz bzw. der Ladeinfrastruktur behandelt. Dieser Teil konzentriert sich insbesondere auf die technischen Aspekte der Übertragung und den Austausch von Daten zwischen dem Elektrofahrzeug und der Ladestation, was entsprechend für die Kommunikation von H₂-Fahrzeugen mit der H₂-Infrastruktur gestaltet werden kann. Dabei ist vorteilhaft, dass sich sowohl die SAE J2799 als auch die ISO 15118 deutlich an dem OSI-Schichtmodell orientieren. Einen direkten Bezug zu Wasserstoff-Betankung hat die ISO 15119 nicht.

C.6. SAE J2600 - Compressed H₂ surface vehicle fueling connection devices

C.6.1. Anwendungsbereich der Norm

Die SAE J2600 bezieht sich als amerikanisches Pendant zur ISO 17268 ebenfalls auf die Konstruktion und Prüfung von Betankungskupplungen, wie Füllkupplungen und Tankstutzen, die für die Betankung von Bodenfahrzeugen mit komprimiertem Wasserstoff (CHSV – compressed hydrogen surface vehicle) verwendet werden. Die Bezeichnung „CHSV“ bezeichnet im Allgemeinen Fahrzeuge, die hochverdichteten Wasserstoff als Energiequelle nutzen und für den Betrieb auf Oberflächen wie Straßen oder anderen festen Untergründen ausgelegt sind. Zu diesen zählen u.a. auch Intralogistikfahrzeuge wie Gabelstapler.

In vielen Bereichen stimmen die beiden Normen überein, sind aber nicht komplett identisch. Wesentliche Unterschiede sind z. B., dass die SAE 2600 die Druckstufe H50 (500 bar) definiert, die in der jüngeren ISO 17268 nicht (mehr) erfasst wird. Womöglich, da die Druckstufe in der Praxis keine entscheidende Rolle mehr spielt. Dafür wird in der ISO 17268 die Druckstufe H35HF (350 bar) mit hoher Durchflussrate erfasst), die insbesondere für die H₂-Betankung von Bussen relevant ist. Die H35HF-Betankungskupplungen sind in der SAE 2600 nicht erfasst.

Die SAE J2600 gilt für Geräte mit den Druckklassen:

Druckklasse	Nennbetriebsdruck NWP bei 15°C
H11	110 bar (11 MPa)
H25	250 bar (25 MPa)
H35	350 bar (35 MPa)
H50	500 bar (50 MPa)
H70	700bar (70 MPa)

Tabelle 3: Druckklassen der SAE J2600

Der Mindestdruck, für den die Komponenten der Zapfsäule ausgelegt sein soll, ist

$$\mathbf{1,5 \times NWP.}$$

Für eine H35-Füllkupplung also $350 \text{ bar} \times 1,5 = 525 \text{ bar}$

Ziel der SAE J2600 ist es zu verhindern, dass Fahrzeuge mit Betankungskupplungen betankt werden, die größer sind als die freigegebene Druckklasse des Fahrzeugs, beispielsweise darf kein Gabelstapler mit 350 bar Nennbetriebsdruck von einem 700 bar H70-Dispenser betankt werden. Es soll aber möglich sein, Fahrzeuge mit einer Druckklasse zu betanken die gleich oder kleiner ist. So dürfte ein 700 bar-PKW von einem 350bar-Dispenser betankt werden.

Natürlich wäre der Fahrzeugtank dann zum Abschluss der Betankung nicht voll. Auch soll verhindert werden, dass Fahrzeuge, die mit meinem anderen Gas als Wasserstoff fahren von einem H₂-Dispenser betankt werden.

In der SAE J2600 werden drei Typen von Füllkupplungen unterschieden. Generell dürfen die beschriebenen Füllkupplung gasförmigen Wasserstoff nur dann durchleiten, wenn eine formschlüssige Verbindung zwischen Füllkupplung und Tankstutzen besteht.

Die drei Typen unterscheiden sich jedoch in ihrer Funktionsweise, wenn

- der Dispenser abgeschaltet wird oder
- der Betankungsvorgang beendet wird, bevor die Füllkupplung abgekoppelt wird

Die folgende Tabelle soll den Unterschied veranschaulichen:

Ereignis	Funktionsweise		
	Typ A	Typ B	Typ C
Start der Betankung: (Beginn Durchleitung von GH ₂)	Nur bei formschlüssiger Verbindung zwischen Füllkupplung und Tankstutzen		
Abschaltung Dispenser	Füllkupplung darf beim Abschalten des Dispensers unter vollem Druck bleiben		Füllkupplung, die beim Abschalten des Dispensers drucklos ist (<50 bar)
Ende der Betankung: (GH ₂ -Entlüftung vor Abkupplung)	Integrierte Ventile. Ein Betätigungsmechanismus muss zunächst die Gaszufuhr unterbrechen und das eingeschlossene Gas muss sicher abgeleitet werden, Bevor der Auslösemechanismus betätigt werden kann, muss der Entlüftungsanschluss geöffnet sein.	separates Dreiwegeventil Auf dem externen Dreiwegeventile müssen die Positionen "offen", "geschlossen" und "entlüftet" deutlich erkennbar sein und das eingeschlossene Gas muss sicher vor dem Abkuppeln abgelassen werden.	

Tabelle 4: Füllkupplungs-Typen der SAE 2600

C.6.2. Übertragung auf Intralogistikanwendung

Die Norm SAE J2600 hat sich zusammen mit der ISO 17268 als etablierter Standard für die Betankung von Landfahrzeugen mit Wasserstoff herausgestellt. Die in dieser Norm festgelegten Randbedingungen für Befüllkupplungen erfreuen sich weltweiter Anerkennung und werden in entsprechender Weise implementiert. Daher ist diese Norm auch ein wesentliches Element bei der Konfiguration der Betankungsinfrastruktur im Bereich der Intralogistik. Weder in der SAE J2600 noch in der ISO 17268 werden Kupplungen für die Absaugung des Nebenprodukts Wasser beschrieben, was jedoch in einigen Brennstoffzellensystemen der Intralogistikfahrzeuge gesammelt wird und beim Betrieb abgesaugt werden muss. Auch bezüglich der Kommunikationsschnittstellen für die Betankung stellt weder die SAE 2600 noch die bereits beschriebene ISO 17268:2020 verpflichtende Anforderungen, sondern verweisen hierzu lediglich auf die SAE 2799. Beide Normen nehmen Bezug auf die SAE 2799 bzw. die Kommunikationsschnittstelle der Infrarotsensoren. Die ISO 17268 schenkt der „Kommunikationshardware“ auch eine eigene Rubrik, während die SAE 2600 darauf aber nicht näher eingeht.

C.7. SAE J2601-1 – Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles

Die SAE J2601 legt standardisierte Betankungsprotokolle mit fester Druckerhöhungsrampe fest, die entweder auf einem tabellenbasierten Ansatz oder auf einem formelbasierten Ansatz, die sogenannte MC-Formel („Molar Concentration Formula“) beruhen.

Die kommunizierten Daten haben keinen Einfluss auf die Druckerhöhungsrategie, die das Zapfsystem verwendet – die Druckerhöhungsrategie ist für Kommunikationsbetankung und für Nichtkommunikationsbetankung für ein bestimmtes CHSS-Volumen gleich.

Beide Protokolle ermöglichen eine Betankung mit oder ohne Kommunikation.

Das tabellenbasierte Protokoll gibt einen festen Zielwert für den Druck am Ende der Befüllung vor, während das formelbasierte Protokoll den Zielwert für den Druck am Ende der Befüllung kontinuierlich berechnet. Für die Betankung mit Kommunikation ist diese Norm in Verbindung mit SAE J2799 zu verwenden.

Erklärtes Ziel der SAE J2601 ist es, so schnell wie möglich eine hochdichte Betankung zu ermöglichen und dabei die Prozessgrenzen einzuhalten. Der Benchmark der Norm liegt bei einer Betankung von unter 3 Minuten unter folgenden Voraussetzungen:

- Betankungstabellen für die Kommunikation
- Zapfsäulenkategorie = H70-T40 (700 bar, gekühlter Wasserstoff -40°C)
- Umgebungstemperatur = 20 °C
- CHSS-Anfangsdruck = 10 MPa
- End-SOC = 95%

C.7.1. Anwendungsbereich der Norm

Die SAE J2601 legt sowohl das Betankungsprotokoll als auch die Verfahrensgrenzwerte für die Wasserstoffbetankung von Fahrzeugen für H35 (=350bar) und H70 (=700 bar) fest. Allerdings gilt die Norm nur für H₂-Tanks mit einem Gesamtfassungsvermögen von 49,7 l oder mehr, was bei einem für die Intralogistik genutzten maximalen Fülldruck von 350bar einer Mindest-Speicherkapazität von 1,19kg H₂ oder mehr entspricht.

Damit wäre der Teil 1 der SAE J2601 nur für größere Intralogistikanwendungen von z. B. Gegengewichts- oder Schubmaststapler relevant.

Eine weitere Einschränkung ist, dass die bisher hinterlegten Tabellen nur für gekühlten Wasserstoff gelten. Hierbei wird aktuell eine Höchsttemperatur von Wasserstoff von -20°C (T20) festgelegt.

Da der Wasserstoff für europäische Intralogistikanwendungen in der Praxis gasförmig angeliefert und gespeichert wird und ungekühlt betankt wird, liefern die Tabellen der SAE J2601-1 keine relevanten Vorgaben für diese Betankung.

Abgrenzung der amerikanischen und europäischen H₂-Versorgung und -betankung

Anders als in Europa wird bei den meisten nordamerikanischen Anwendungen verflüssigter Wasserstoff (LH₂) angeliefert und auch vor Ort in Speichern für Flüssigwasserstoff bevorratet. Dadurch wird bei den amerikanischen H₂-Infrastrukturen vor der H₂-Betankung der Aggregatzustand von flüssigem in gasförmigen Wasserstoff mittels „Verdampfung“ überführt. Bei diesem zusätzlichen Prozessschritt kühlt sich der Wasserstoff auf deutlich unter -20°C ab, so dass die Tabellen für diese Anwendungen durchaus relevant sein können.

Im Rahmen dieser Studie ist dieser Gedankengang nicht weiter untersucht worden, da er für das Ziel der Studie nicht relevant ist. Es ist aber ein möglicher Ansatzpunkt, wenn es zu klären gilt, warum zum heutigen Stand keine relevante Norm für die H₂-Betankung (in Europa) existiert. Hierzu ist zu ergänzen, dass in Nordamerika ca. 60.000 Brennstoffzellen bei Flurförderzeugen genutzt werden, während sich in Europa bisher nur knapp 1.000 FFZ mit Brennstoffzellen im Einsatz befinden. Der Weg zu mehr grünem Wasserstoff und der Eigenherstellung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen mittels Elektrolyse führt auch in Nordamerika dazu, dass der Anteil von H₂-Infrastrukturen für gasförmig gespeicherten Infrastrukturen zunimmt. Allerdings ist dies ein Trend der letzten Jahre.

C.7.2. Übertragung auf Intralogistikanwendungen

Die für die SAE J2601 vorliegenden Betankungsprotokolle wurden auf der Grundlage einer Reihe von Schlüsselannahmen entwickelt.

Bei der Entwicklung des tabellenbasierten Betankungsprotokolls wurde auf Grundlage theoretischer Annahmen auf thermodynamische Simulationen zurückgegriffen. Dabei wurden mehrere Annahmen getroffen und zum Teil Rückmeldungen der Tankstellen- und Fahrzeug-Hersteller berücksichtigt.²⁶

Die Norm definiert folgende Parameter als relevant für die Steuerung des Betankungsvorgangs:

- Umgebungstemperatur
- Zapfsäule (Dispenser)
 - Druckklasse der
 - Temperatur der Wasserstoffzufuhr
- H₂-Tank (CHSS)
 - Größe, Form, Materialeigenschaften,
 - Initialtemperatur und -druck für die Betankung
- Druckabfall zwischen Zapfsäule und Fahrzeug und Wärmeübertragung, die in Abschnitt 7 und Anhang A beschrieben sind.

²⁶ Vgl. (SAE J2601-1, 2020, S. 24)

Was ist anzuwenden

Im Abschnitt 6 der SAE J2601 werden die Anforderungen an die Sensorik definiert. Folgende Sensoren werden für notwendig gehalten.

1. Stationsdruck
2. Temperatur der Wasserstoffzufuhr
3. Sensor für die Umgebungstemperatur

Weitere Sensoren dürfen verwendet werden.

Für die Sensoren für Stationsdruck und Temperatur der Wasserstoffzufuhr gilt, dass diese stromaufwärts und so nahe wie möglich an der Abrisskupplung der Zapfsäule angebracht sein sollen. Die Durchflusslänge zwischen Sensor und Abrisskupplung darf nicht größer als 1 m sein.

Der Stationsdruck muss in einer Häufigkeit aufgezeichnet werden, die sicherstellt, dass die im Abschnitt 6 der Norm definierten allgemeinen Prozessanforderungen nicht überschritten werden und die Leistung der Station überprüft werden kann.

Sensor für die Umgebungstemperatur

Der Sensor für den Umgebungsdruck soll gegen Umwelteinflüsse geschützt sein, die das Messergebnis verfälschen können.

Anforderungen an die Sensorik

Die Norm fokussiert sich auf die Anforderungen an das Betankungsprotokoll. Konkrete Anforderungen an die Messgenauigkeit und -häufigkeit der Sensoren werden in der SAE J2601 nicht spezifiziert. Es wird jedoch gefordert, dass die Sensorik, wie z. B. der Stationsdruck mit einer Häufigkeit aufzeichnet, die sicherstellt, dass die allgemeinen Prozessanforderungen nicht überschritten werden und die Leistung der Station überprüft werden kann. Dabei sollten die Hersteller der Zapfsäule („Station“) sicherstellen, dass die schlechteste Genauigkeit aller Sensoren berücksichtigt wird.²⁷

Prozessanforderungen

H₂-Eingangstemperatur

Die unmittelbare Eingangstemperatur für Wasserstoff ($T_{\text{fuel-inst}}$) muss mindestens -40 °C betragen.

Sollte die Temperatur $T_{\text{fuel-inst}}$ unter -40 °C fallen, muss die Betankung des Fahrzeugs nach spätestens 5 Sekunden gestoppt werden.

Obwohl eine Obergrenze für die Temperatur der momentanen Kraftstoffabgabe nicht als Prozessanforderung vorgesehen ist, wurden die Standardprotokolle in diesem Dokument unter der Annahme erstellt, dass die Komponenten der Station bei Umgebungstemperatur

²⁷ Vgl, (SAE J2601-1, 2020, S. 23)

eingesetzt werden (siehe A.3.3). Die Station sollte einen Ansatz verfolgen, der sicherstellt, dass die Temperatur der Stationskomponenten die Umgebungstemperatur nicht übersteigt (z. B. durch Schutz vor Strahlungswärme aufgrund von Sonneneinstrahlung).

Temperatur des Fahrzeug H₂-Tanks

Bei einer Betankung mit Kommunikationsschnittstelle sollte die Betankung nicht gestartet bzw. binnen 5 Sekunden unterbrochen werden, wenn das Gastemperatursignal mehr als 85 °C beträgt.

Anforderungen an den Druckprozess

- Anfangsdruck
Der Anfangsdruck ist bei Anwendung des tabellenbasierten Protokolls als P_0 und bei Anwendung des auf der MC-Formel basierenden Protokolls als $P_{initial}$ zu verwenden. Ist der Anfangsdruck kleiner als 0,5 MPa oder größer als der Nennbetriebsdruck der Druckklasse (35 MPa oder 70 MPa), muss die Station den Betankungsvorgang so schnell wie möglich, jedoch innerhalb von 5 Sekunden, beenden.
- Betriebsdruck
Bei Kommunikationsbetankungen sollte die Station nicht tanken oder die Betankung so schnell wie möglich, jedoch innerhalb von 5 Sekunden, beenden, wenn der CHSS-Druck größer oder gleich 125 % NWP ist.
- Ladezustand
Bei der Kommunikationsbetankung sollte die Station die Betankung so schnell wie möglich, jedoch innerhalb von 5 Sekunden beenden, wenn der SOC größer oder gleich 100% ist. Die Station kann $SOC_{vehicle}$ oder $SOC_{station}$ (konservativerer Wert) auf der Grundlage der Betankungsmethodik der Tankstelle verwenden. Gleichung 1 in Abschnitt 3.12 oder gleichwertige Methoden können verwendet werden, um diese Anforderung zu erfüllen.
- Durchflussmenge
Die Betankungsprotokolle müssen so ausgelegt sein, dass sie eine maximale Durchflussrate von 60 g/s nicht überschreiten. Nach der ersten Anschlusssequenz muss die Station die Betankung so schnell wie möglich, jedoch innerhalb von 5 Sekunden beenden, wenn der gemessene maximale Durchfluss des Wasserstoffgases 60 g/s überschreitet.
Zu beachten ist, dass dieses eine allgemeine Obergrenze für die H₂-Betankung von Fahrzeugen ist. Für Intralogistikanwendungen sollte die Durchflussrate auf 10 g/s gedrosselt sein – s. hierzu auch die „Übertragung auf Intralogistikanwendung“ der SAE J2601-3 im Abschnitt C.8.2.
- Toleranzen
Die Zapfsäulenbetreiber müssen bei der Umsetzung des Protokolls angemessene Toleranzen berücksichtigen, um sicherzustellen, dass die Betankung sicher und genau durchgeführt wird. Fahrzeuge, die mit der Tankstelle kommunizieren, sollten angemessene Toleranzen für ihre Signale berücksichtigen.

C.8. SAE J2601-3²⁸: - Fueling protocol for gaseous hydrogen powered industrial trucks

C.8.1. Anwendungsbereich der Norm

Die SAE J2601-3 legt die Sicherheitsgrenzen und Leistungsanforderungen für gasförmige Wasserstoff-Zapfanlagen fest, die zur Betankung wasserstoffbetriebener Industriefahrzeugen verwendet werden. Sie kann eine breite Palette von Brennstoffzellenfahrzeugen unterstützen, einschließlich Gabelstaplern, Traktoren, Palettenhubwagen, Nutzfahrzeugen auf und abseits der Straße und Spezialfahrzeugen aller Art.

Die Norm ist geeignet für alle Fahrzeugtank-Betankungssysteme über 18 l Wasservolumen und kann für alle Arten von wasserstoffbetriebener Industriefahrzeuge verwendet werden. Darüber hinaus beschreibt sie mehrere mögliche Betankungsmethoden und gibt Instruktionen für Hersteller von Betankungssystemen sowie Anbieter wasserstoffbetriebener Industriefahrzeuge und Betreiber wasserstoffbetriebener Fahrzeugflotten.

Die Anforderungen beinhalten unter anderem, dass das Betankungssystem/Zapfsäule die Kontrolle über den Betankungsprozess hat und einen mechanischen Überdruckschutz bietet, wenn der maximale Wasserstoffversorgungsdruck an der Zapfsäule größer ist als das 1,38-fache des Nennarbeitsdrucks.

Es werden ebenfalls spezielle Anforderungen für Flottenbetrieb und Betankung leichter Nutzfahrzeugen mit H₂-Betankungsanlagen für Industriefahrzeuge beschrieben. Wenn z. B. eine Betankungsanlage nur zur Befüllung von Industriefahrzeugen vorgesehen ist und sich in einem Bereich befindet, in dem ein potenzielles Risiko besteht, dass leichte Nutzfahrzeuge an dieser Zapfanlage betankt werden, muss der Betreiber der Zapfanlage sicherstellen, dass das Betanken dieser Fahrzeuge nicht möglich ist.

C.8.2. Übertragung auf Intralogistikanwendung

Die SAE J2601 Teil 3 wurde explizit für die Betankungssysteme von Industriefahrzeugen erstellt.

Ein wesentlicher Bestandteil der J2601-3 sind die beschriebenen Kontrollmethoden für die Wasserstoff-Betankungsanlagen für Industriefahrzeuge.

Bei der Methode "Fill to Service Pressure" sollte die Zapfanlage mindestens folgende Komponenten besitzen: einen Druckregler, ein Überdruckschutzsystem, eine Durchfluss-Begrenzungsvorrichtung, ein automatisches Absperrventil, einen Drucksensor, ein Steuerungssystem für den Dispenser. Und wenn eine Flotte von Fahrzeugen gleichzeitig aus einem gemeinsamen Ausgabesystem befüllt wird, sollte der Kraftstofffluss zu jedem Fahrzeug individuell gesteuert werden

Die Methode "Fill to Target Pressure with fixed orifice" setzt ähnliche Komponenten voraus, ergänzt um Sensoren zur Messung der Umgebungstemperatur und der Wasserstofftemperatur.

Bei beiden vorangegangenen Methoden werden Durchflussbegrenzer eingesetzt, um die Befüllung auf eine durchschnittliche Durchflussrate von höchstens 10 Gramm pro Sekunde zu limitieren.

²⁸ Vgl (SAE J2601-3, 2022)

Komponente	Betankung bis zum Nennbetriebsdruck <i>Fill to service pressure</i>	Zieldruck-Betankung mit festem Durchfluss <i>Fill to target pressure with fixed orifice</i>	Zieldruck-Betankung mit variablem Durchfluss <i>Fill to target pressure with variable flow rate</i>
Druckregler <i>PR – pressure regulator</i>	● max. 350 bar Nennbetriebsdruck	● max. 437,5 bar (1,25 x NWP)	
Überdrucksicherung <i>PSV – pressure safety valve</i>	● max. Auslösewert: 483 bar (1,38 x NWP)	● max. Auslösewert: 483 bar (1,38 x NWP)	● max. Auslösewert: 483 bar (1,38 x NWP)
Drossel mit unveränderlichem Querschnitt <i>FLD – fixed area flow limiting device</i>	● max. 10 g/s	● max. 10 g/s	
Regelventil mit veränderbarem Querschnitt <i>VACD - Variable area control device</i>			● Der Durchfluss darf 10 g/s übersteigen, wenn der Zugang zum Dispenser für autorisierte Personen und vorher qualifizierte BZS beschränkt wird
automatisches Ab-sperrventil <i>ASOV – automatic shut-off valve</i>	●	●	●
DCS – dispenser control system	●	●	●
Drucksensor in der Kraftstoffleitung <i>PS – pressure sensor</i>	●	●	●
Umgebungs-Temperatursensor <i>ATS - ambient temperature sensor</i>		●	●
H₂-Temperatursensor (Kraftstoffleitung) <i>HTS – hydrogen fuel temperature sensor</i>		●	●

Tabelle 5: Betankungsmethoden und erforderliche Komponenten nach SAE J2601-3

Im Gegensatz hierzu verwendet die Methode "Fill to Target Pressure with variable Flow Rate" eine variable Regelvorrichtung, die die Funktionen des Druckreglers und des Durchflussbegrenzers integriert. Diese Regelung wird zentral von der Zapfanlagensteuerung übernommen. Analog zu den vorherigen Methoden beinhaltet diese Variante einen Drucksensor, eine Umgebungstemperaturmessung und einen Wasserstofftemperatursensor. Darüber hinaus übernimmt ein Kombiregler (Druckregelung und Durchflussbegrenzer), der die Befüllung auf einen durchschnittlichen Durchfluss von nicht mehr als 10 Gramm pro Sekunde begrenzt.

Zusätzlich zur Definition der Methoden werden für die H₂-Betankung von Industriefahrzeugen die relevanten Komponenten und Philosophien festgelegt. Neben der Integritätsprüfung (Dichtigkeitsprüfung) vor und während der Betankung werden Betankungsgrenzwerte, Nutzung der H₂-Tanktemperatur sowie die Prozessgüte und -validierung beschrieben.

Zusammengefasst legt die SAE J2601-3 eine Reihe von Kriterien und Methoden fest, die für die Betankung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen von Bedeutung sind. Sie definiert klar die Grenzwerte für den Betankungsprozess, insbesondere die maximale Tanktemperatur und den maximalen Durchfluss, um Sicherheit und Effizienz zu gewährleisten. Die Norm beschreibt auch verschiedene Betankungsmethoden, allerdings ohne eine kontinuierliche Kommunikation zwischen der BZS und der Zapfsäule vorzuschreiben. Während die SAE J2601-3 wesentliche Aspekte des Betankungsprozesses abdeckt, liefert sie im Gegensatz zur SAE J2601-1 keine tiefgreifende Analyse mittels detaillierter Tabellenblätter und Formelansätzen. Es ist also klar, dass die SAE J2601-3 einen essenziellen Rahmen für die Praxis der Wasserstoffbetankung bietet, jedoch weniger auf die theoretischen und analytischen Aspekte dieses Prozesses eingeht.

C.9. SAE J2799 - Hydrogen surface vehicle to station communications hardware and software

Die SAE J2799 spezifiziert die Kommunikationshardware- und Softwareanforderungen für die Betankung von Wasserstoff-Oberflächenfahrzeugen (HSV) über eine Infrarot-Schnittstelle und erfüllt die in ISO 19880 8.2.1.4 definierte Funktionalität. Die SAE J2799 ist in Verbindung mit SAE J2601 und mit SAE J2600 zu verwenden.

Die SAE J2799 verwendet nur eine Einwegkommunikation und definiert eine Fehlerprüfung, die Fehler bei der Datenübertragung identifizieren kann. Wenn ein ausreichender Kommunikationsfehler erkannt wird oder die Kommunikation unterbrochen wird, schaltet die Steuerung des Zapfsystems entweder auf das Non-Com-Betankungsprotokoll um oder stoppt die Betankung.

C.9.1. Anwendungsbereich der Norm

Die SAE 2799 ist aktuell die einzige Norm, die Anforderungen an die Kommunikationshardware und -software für die Betankung wasserstoffbetriebener Fahrzeuge definiert. Die Anwendbarkeit der Norm auf Flurförderzeuge (z. B. Gabelstapler) mit Druckwasserstoffspeicher wird explizit genannt.²⁹

Die SAE 2799 benennt speziell die wasserstoffbetriebene Bodenfahrzeuge (HSV – hydrogen surface vehicle) als Anwendungsbereich. Die Bezeichnung „HSV“ bezieht sich im Allgemeinen auf Fahrzeuge, die Wasserstoff als Energiequelle nutzen und für den Betrieb auf Oberflächen wie Straßen oder anderen festen Untergründen ausgelegt sind.

Die ISO 17268 hingegen bezieht sich auf den Anwendungsbereich gasförmigen Wasserstoffs für Landfahrzeuge (GHLV). Die Begriffe "Hydrogen Surface Vehicle" (HSV) und "Gaseous Hydrogen Land Vehicle" (GHLV) können unterschiedliche Aspekte von Wasserstofffahrzeugen beschreiben, umfassen jedoch beide die Intralogistikfahrzeuge (insbesondere Gabelstapler – forklift trucks) und sind für diese Betrachtung relevant

Die SAE J2799 bezieht sich auf die SAE J2600 und die Wasserstoff-Betankungsprotokolle der SAE J2601. Sie enthält ergänzend zu diesen Normen eine Beschreibung der Kommunikationshardware - konkret der Infrarot-Schnittstelle und des Kommunikationsprotokolls, die für die Betankung des HSV verwendet werden können. Der Zweck dieser Norm ist es, eine harmonisierte Entwicklung und Implementierung der Schnittstellen für die Wasserstoffbetankung zu ermöglichen.

Die Infrared Data Association (IrDA) ist eine Organisation, die Standards für die Infrarotkommunikation entwickelt hat, auf die auch die SAE J2799 zurückgreift. Dabei verwendet die Infrarot-Datenverbindung eine optische 38400-Baud-Schnittstelle.

²⁹ Vgl. (SAE J2799, 2019, S. 3)

Das IrDA-Protokoll:

Bei der Betankung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen kann das von der Infrared Data Association (IrDA) geregelte Protokoll verwendet werden, um eine drahtlose Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und der Tankstelle herzustellen. Das IrDA-Protokoll ermöglicht die Übertragung von Daten über Infrarotlicht. Durch die Verwendung von Infrarotkommunikation können wichtige Informationen wie Tankstellen-IDs, Druckeinstellungen, Füllstände und andere relevante Daten zwischen dem Fahrzeug und der Tankstelle ausgetauscht werden, um den Betankungsprozess zu steuern und zu überwachen.

Das IrDA-Protokoll ist eine Methode, die für die Nahbereichskommunikation eingesetzt werden kann. Die SAE J2799 macht aber deutlich, dass die Verwendung des IrDA-Protokolls für die Be-tankung wasserstoffbetriebener Fahrzeuge nicht die einzige Kommunikationsmethode ist, die in der Branche eingesetzt wird. Es gibt auch andere drahtlose Kommunikationsstandards wie Bluetooth und WLAN, die in ähnlichen Anwendungen verwendet werden können. Diese Alternativen werden in der Norm allerdings nicht näher beschrieben.

Im Abschnitt 4 der SAE J2799 werden konkrete Vorgaben für die Positionierung der IR-Sensoren an der Füllkupplung und dem Tankstutzen genannt, die allerdings für andere Kommunikationshardware nicht relevant ist.

C.9.2. Übertragung auf Intralogistikanwendung

Was ist Pflicht anzuwenden

Die SAE J2799 ist nicht bindend im Sinne, dass sie für einer Kommunikationsschnittstelle zwischen Dispenser und Intralogistikfahrzeugen anzuwenden ist. Sie definiert allerdings den Standard für Infrarot-Schnittstellen, die in den Betankungskupplungen für Brennstoffzellenfahrzeuge verbaut sind.

Es wird dabei nur eine unidirektionale Kommunikation vom Infrarot (IR)-Sender am Fahrzeug an den IR-Empfänger der Zapfsäule übertragen.

Was kann genutzt werden

In der SAE J2799 werden Beispiele gegeben, wie eine Kommunikation aufgebaut werden kann. Dabei werden die folgenden Daten im Sinne der SAE 2600 und SAE J2601 verwendet. Die Systemarchitektur und beschriebene Testverfahren sind eine sinnvolle Grundlage für andere kabellose Kommunikationen.

Im Abschnitt 4 werden eine Reihe von Daten genannt, die über die IR-Schnittstelle übertragen werden. Dazu zählen:

- Identifikation des Protokolls, z. B. SAE J2799
- Data Communication Software Version number
- Tank volume - Fahrzeug-Tankvolumen in Liter
- Receptacle Type - Typ des Tankstutzens (H25, H35, H70)
- Fuel Command - Betankungs-Kommando (Dyna, Stat, Halt, Abort)
- Measured pressure (Tankdruck) in MPa
- Measured temperature (Tanktemperatur) in Kelvin
- Optionale Daten

Es ist empfehlenswert diese Daten und Syntax auch bei anderen Datenkommunikationswegen zu verwenden – ggf. sollten diese durch zusätzliche Daten angepasst werden.

C.10. EN 1175 – Sicherheit von Flurförderzeugen

Die EN 1175 - Sicherheit von Flurförderzeugen - Elektrische/elektronische Anforderungen wurde in der deutschen Fassung der Schweizer Norm SN EN 1175:2020 betrachtet. Die Schweizer Norm ist im Wortlaut identisch mit der EN 1175, die am 1. Juni 2020 vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) angenommen wurde.³⁰

C.10.1. Anwendungsbereich der Norm

Die EN 1175 legt die elektrischen Anforderungen für die Auslegung und die Herstellung der elektrischen Ausrüstung motorkraftbetriebener Flurförderzeuge fest. Die Norm ist sowohl für batteriebetriebene als verbrennungsmotorische Flurförderzeuge relevant, wobei allerdings einige spezielle Flurförderzeugtypen hiervon ausgenommen sind, u.a.

- Reach Stacker („Flurförderzeuge mit veränderlicher Reichweite“)
- Portal- und Portalhubwagen
- Spezifische Funktionen und System von fahrerlosen Transportsystemen,

Die Sicherheitsanforderungen an die elektrischen und elektronischen Bauteile, die in der EN 1175 behandelt werden, dienen dem Zweck, Gefährdungspotenziale durch Flurförderzeuge zu verhindern oder zumindest so gering wie möglich zu halten. Zu der sehr umfangreichen Auflistung von Gefährdungspotenzialen im Anhang I der Norm zählen u.a.

- Mechanische Gefährdungen, z. B. durch bewegende Teile
- Elektrische Gefährdungen, z. B. durch das Berühren spannungsführender Teile
- Thermische Gefährdungen, z. B. durch Brand ausgelöst durch Funkenbildung
- Gefährdung durch die Steuerung, z. B durch Ausfall der Steuerung

In der EN 1175 werden entsprechende Mindest- Performance Level für Sicherheitsfunktionen festgelegt, die von sicherheitsbezogenen Teilen von Steuerungen realisiert werden.

C.10.2. Übertragung auf Intralogistikanwendung

Im Sinne der aktuellen Fassung der EN 1175 werden für die Energieversorgung von Einrichtungen des Flurförderzeugs als mögliche Energiequellen in Betracht gezogen³¹:

- Batterien verschiedener Technologien, somit Bleisäure als auch Li-Ionen-Batterien;
- Flüssiger oder gasförmiger Kraftstoff in Kombination mit einem Verbrennungsmotor oder einer Brennstoffzelle;
- Wechselstromquellen.

³⁰ (SN EN 1175, 2020, S. 1)

³¹ (SN EN 1175, 2020, S. 5 und 12)

Somit fallen explizit auch Brennstoffzellensysteme in den Anwendungsbereich dieser Norm, wobei diese allerdings nur explizit erwähnt sind und im Weiteren nicht weiter betrachtet werden. Insbesondere im Anhang C, in dem auf die Energiequellen normativ behandelt werden, wird auf Bleibatterien (C.1) und Lithium-Ionen-Batterien (C.2) auch hinsichtlich der Anforderungen eingegangen. Auf Brennstoffzellen bzw. Brennstoffzellensysteme wird hier allerdings nicht eingegangen.

Was ist anzuwenden (Pflicht)

An dieser Stelle sei noch einmal besonders darauf hingewiesen, dass die Betrachtung in dieser Ausarbeitung sich auf den Betankungsvorgang und die Schnittstelle zur H₂-Infrastruktur beschränken. Die EN 1175 legt eine Reihe von Sicherheitsanforderungen fest, die auch für Brennstoffzellensysteme in anderen Betriebszuständen relevant sein können, die hier nicht bewertet bzw. aufgeführt werden.

Masseschluss

Im Sinne der Norm wird ein Masseschluss als unbeabsichtigte Verbindung eines spannungsführenden Teils mit dem Rahmen oder freiliegenden leitfähigen Teilen des Flurförderzeugs definiert. Die elektrischen Stromkreise der Flurförderzeuge inklusive der eingebauten Brennstoffzellensysteme müssen also so ausgelegt sein, dass ein Masseschluss, z. B. beim Ankuppeln der Füllkupplung keine unbeabsichtigten gefahrbringenden Bewegungen verursacht.³² Als geeignete Gegenmaßnahme wird bei Hochspannungs-Flurförderzeugen (> 120V) eine Überwachungseinrichtung angesehen, die direkt mit der Energiequelle – also dem Brennstoffzellensystem - verbunden ist und bei Hochspannungs-Flurförderzeuge mit Wechselbatterien gem. der europäischen Norm EN 1175 sogar gefordert wird³³. Dieses wird allerdings für Flurförderzeuge geringere Spannungsklassen nicht gefordert und ist somit für aktuelle wasserstoffbetriebene Flurförderzeuge nicht relevant.

Potenzialausgleich

Um die Gefahr eines elektrischen Schlages durch Masseschluss zu vermeiden, muss ein Potenzialausgleich zwischen dem Fahrzeugrahmen der Flurförderzeuge und den metallischen elektrischen Gehäusen, wie z. B. Motorgehäuse aber folglich auch Brennstoffzellensysteme, vorgesehen sein.

Dabei muss für alle Zustände, die das elektrische System des Flurförderzeugs verursachen kann – also auch beim Ankuppeln einer externen H₂-Füllkupplung - das gleiche elektrische Potenzial zwischen den Komponenten sichergestellt werden.³⁴

³² Vgl. (SN EN 1175, 2020, S. 13)

³³ Vgl. (SN EN 1175, 2020, S. 37)

³⁴ Vgl. (SN EN 1175, 2020, S. 36)

Wegfahrsperr

In den Abschnitten 4.4.2.1 („Laden der Batterie“) und 4.4.2.2 („Onboard-Ladegeräte und/oder Zusatzkomponenten“) wird der Zustand des Stromladens betrachtet. Die EN 1175 fordert hierzu, dass Bewegungen des Flurförderzeuges zu verhindern sind, wenn es direkt oder indirekt mit dem Stromnetz verbunden ist.³⁵

Auf die Betankung von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen wird hier nicht direkt eingegangen, allerdings lässt sich im Kontext mit der Maschinenrichtlinie daraus ableiten, dass Flurförderzeuge auch beim Betanken mit Wasserstoff über eine Wegfahrsperr verfügen müssen, da die Maschinenrichtlinie fordert, dass Sicherheitsrisiken, die sich auch durch „vorhersehbare Fehlanwendungen“ wie z.B. das Wegfahren mit angekuppeltem Betankungsschlauch möglichst konstruktiv auszuschließen sind.

Fehlermeldung im Klartext

Die EN 1175 fordert im Abschnitt 4.8.2. zum Thema „Software-Design“, dass wenn ein Benutzer-Interface-Text verwendet wird – wie beispielsweise eine Fehlermeldung im Klartext –, diese „in einer oder mehreren Sprachen zur Verfügung gestellt werden muss“, die vom Bediener verstanden wird.³⁶

³⁵ Vgl. (SN EN 1175, 2020, S. 16)

³⁶ Vgl. (SN EN 1175, 2020, S. 31)

C.11. DIN EN 17127-2019-09-Wasserstofftankstellen im Außenbereich

C.11.1. Anwendungsbereich der Norm

Die DIN EN 17127-2019-09 ist die deutsche Fassung der EN 17127:2018 „Outdoor hydrogen refuelling dispensing gaseous hydrogen and incorporating filling protocols“.

In dem Dokument werden die Mindestanforderungen für die Gewährleistung der Interoperabilität von öffentlichen Wasserstofftankstellen festgelegt, die für die Betankung von Straßenfahrzeugen mit gasförmigem Wasserstoff gilt.

Dabei wird auch Bezug auf die Interoperabilität der Betankungsprotokolle genommen. Dieser Norm entsprechend, dürfen Außentankstellen für gasförmigen Wasserstoff nur eine 350bar oder 700bar-Betankung anbieten.

Für die Überwachung des Betankungsvorgangs werden die allgemeinen Anforderungen an das Betankungsprotokoll derart festgelegt, dass diese entweder

- Ein zugelassenes, veröffentlichtes Betankungsprotokoll einer anerkannten Normenarbeitsorganisation (SDO) verwenden, wie z. B. der SAE J2601 oder
- Protokolle anwenden, die z.B. vom Hersteller eines jeden Fahrzeugs zur Betankung an der Tankstelle zugelassen worden sind. Der Tankstellenbetreiber muss Maßnahmen treffen, um die Betankung von Fahrzeugen an der Abgabereinrichtung zu verhindern, wenn Protokolle nicht von dem(n) Hersteller(n) der Fahrzeuge, die die Abgabereinrichtung nutzen, anerkannt sind.

C.11.2. Übertragung auf Intralogistikanwendungen

Die EN 17127 erscheint zunächst nicht direkt relevant für Intralogistikfahrzeuge, da sich der Anwendungsbereich der Norm auf die Betankung von Straßenfahrzeugen an öffentlichen Tankstellen beschränkt und somit nicht auf innerbetriebliche Lösungen zur Betankung von Intralogistikfahrzeugen eingeht. Unmittelbar relevant ist diese Norm allerdings unter dem Aspekt, dass Flurförderzeuge mit einer Straßenverkehrszulassung durchaus an einer öffentlichen Tankstelle betankt werden könnten, dieses wäre aus aktueller Sicht eine Sonderanwendungsfall.

Allerdings sind die in der EN 17127 genannten Betankungsprotokolle, wie die SAE J2601 für Intralogistikanwendungen nur sehr eingeschränkt anwendbar und erlauben aufgrund eines entsprechend fehlenden Protokolls für die Intralogistik allenfalls eine konservative und damit keine schnelle Betankung an H₂-Tankstellen für Straßenfahrzeuge.

Kritisch für kleinere Intralogistikfahrzeuge ist, dass die Norm einen Prüfstoss mit 200g Wasserstoff zulässt, da dieses ca. 77% des maximalen H₂-Fassungsvermögens der kleinsten Brennstoffzellensystemtanks entspricht (0,26 kg).

Äußere Interoperabilität:

Im Anhang B.2 nimmt die Norm direkten Bezug zur Betankung von Nutzfahrzeugen (FCEV) an Wasserstofftankstellen für „Gabelstapler“ im innerbetrieblichen Bereich („Privat- und Dienstleistungssektor“):

Im Sinne eines Sperrsystems als Schutzmaßnahme sollen Wasserstoff-Betankungsanlage für Flurförderzeuge bei der Betankung von Nutzfahrzeugen wie folgt wirken:

1. Bei einer kommunikationsgestützten Wasserstoff-Betankungsanlage für Flurförderzeuge soll die Betankung
 - a. auf eine konservative Betankung durch eine akkreditierte SDO umschalten
 - b. oder den Betankungsvorgang stoppen, wenn das Kommunikationssignal des FFZ nicht verfügbar ist

2. Bei einer nicht-kommunikationsgestützten Wasserstoff-Betankungsanlage für Flurförderzeuge soll
 - a. es eine physikalische Störabschaltung geben, um sicherzustellen, dass das FCEV nicht betankt werden kann
 - b. oder es soll eine konservative Betankung durch eine akkreditierte SDO umschalten

C.12.EN IEC 62282-4-101 - Brennstoffzellen-Energiesysteme für elektrisch betriebene Flurförderzeuge

Die hier betrachtete DIN EN IEC 62282-4-101 ist die deutsche Fassung der internationalen Norm IEC 62282-4-101. Die Norm wurde umfangreich überarbeitet und ist zum Abschluss der Bestandsaufnahme dieser Studie im Juni 2023 veröffentlicht worden, wobei einige Neuerungen ergänzt wurden, die auch für Betankung von Intralogistikfahrzeugen relevant sind.

Hinweis:

Um die Begrifflichkeit in der dieser Studie beizubehalten, wird in diesem Kapitel weiterhin die Bezeichnung „Brennstoffzellensystem“ verwendet. Dieser Begriff ist synonym zu der in der DIN EN IEC 62282-4-101 verwendeten Bezeichnung „Brennstoffzellen-Energiesystemen“.

C.12.1. Anwendungsbereich der Norm

Die DIN EN IEC 62282-4-101 befasst sich mit der Standardisierung der Brennstoffzellensysteme für Intralogistikfahrzeugen und definiert die Sicherheitsanforderungen an Brennstoffzellensysteme, die für den Einsatz in elektrisch betriebenen Flurförderzeugen bestimmt sind und mit gasförmigem Wasserstoff oder Direktmethanol betrieben werden. Dabei wird vor allem die Ausführung der konstruktiven Gestaltung der Brennstoffzellensysteme behandelt und die entsprechenden Leistungsanforderungen für Sicherheits- und Typprüfverfahren definiert.

Ausgenommen von der Norm sind³⁷

- geländegängige Stapler
- Portalwagen
- Portalhubwagen
- geländegängige Stapler mit veränderlicher Reichweite
- geländegängige schwenkbare Stapler mit veränderlicher Reichweite
- Containerstapler mit veränderlicher Reichweite;
- Mitgängerwagen

Der Anwendungsbereich wird weiter auf Ausgangsspannungen der Brennstoffzellensysteme von bis zu 150 V (DC) beschrieben und gilt sowohl für den Innen- als auch Außeneinsatz.

Die Brennstoffzellensysteme im Sinne der DIN EN IEC 62282-4-101 können sowohl austauschbare Module – im Sinne von „battery replacement module“ der SAE-Normen - sein oder auch im Flurförderzeug voll integriert sein.

Der H₂-Fahrzeugtank (VSS) - in der Norm als „Brennstoffvorratsbehälter“ bezeichnet – darf entweder mit dem Flurförderzeug oder mit dem Brennstoffzellensystem dauerhaft verbunden sein.

³⁷ vgl. (VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. , 2023)

Weiter ausgeschlossen vom Anwendungsbereich dieser Norm werden:

- abnehmbare Brennstoffbehälter bzw. Wechselflaschen
- Hybridantriebe mit interner Verbrennungsmaschine
- Brennstoffzellensysteme mit Reformer
- Verwendung von flüssigem Wasserstoff
- Einsatz unter explosionsfähigen Atmosphären

C.12.2. Übertragung auf Intralogistikanwendungen

Die Norm standardisiert die Konstruktion der Brennstoffzellensysteme geht aber nur bedingt auf die Betankungsschnittstellen und den Prozess der Betankung ein. Auch eine Standardisierung im Sinne der Interoperabilität von Betankungsinfrastrukturen für unterschiedliche Intralogistikfahrzeuge sowie angrenzende Anwendungsbereiche wie z. B. Nutzfahrzeuge wird in der Norm nicht bzw. nicht nennenswert betrachtet.

Dennoch sind die folgenden Aspekte dieser Norm im Rahmen dieser Studie relevant:

Potenzialausgleich

Unter Potenzialausgleich werden in dieser Norm permanente Verbindungen von leitenden Teilen verstanden und betrifft somit ausschließlich die leitenden Verbindungen innerhalb des Brennstoffzellensystems und zwischen Brennstoffzellensystem und dem Fahrzeug. Ein Potenzialausgleich während des Betankungsvorgangs mit der Wasserstoff-Infrastruktur sowie Vorrichtungen zur Erdung des Fahrzeugs über Massebänder oder leitfähige Bereifung wird nicht betrachtet.³⁸

Die Norm beschreibt zunächst die Sicherheitsanforderung an die Konstruktion und geht dabei u. a. auf die Anforderungen an wasserstoffführende Bauteile wie Rohr-, Schlauchleitungen und Armaturen aber auch Dichtungen und Drucktanks für Wasserstoff ein.

Verdünnungsbereich

Als Verdünnungsbereich wird in der Norm der Bereich definiert in dem sich entflamm- oder brennbares Gas - beispielsweise Wasserstoff – ausdehnen kann und durch Lüftung oder andere wirksame Vorrichtungen kontrolliert werden kann. Die Systemgrenzen werden dabei innerhalb des Brennstoffzellensystems oder innerhalb des Fahrzeuges definiert und gilt somit auch für den Bereich, in dem üblicherweise die H₂-Betankungskupplungen am Fahrzeug bzw. Brennstoffzellensystem angebracht sind.

Es muss eine ausreichende Belüftung auch während der Betankung vorgesehen werden, um zu vermeiden, dass sowohl im normalen als auch bei unsachgemäßem Betrieb eine Wasserstoffkonzentration von über 25% der unteren Zündgrenze (LFL) entstehen kann; ggf. müssen mechanische Lüfter vorgesehen werden.

³⁸ vgl. (DIN EN IEC 62282-4-101, 2023, S. 27)

Überdruck- und Übertemperaturschutz

Wasserstoffdrucktanks müssen durch eine nicht wiederschließende, thermisch aktivierte Druckentlastungseinrichtung (TPRD) nach ISO 19882 ausgelegt, gefertigt und geprüft sein.³⁹

Betanken

In der neuen Fassung der Norm ist ein Absatz „Betanken“ eingefügt worden, der bezüglich der Betankungsschnittstellen allerdings lediglich auf die bereits genannte ISO 17268 verweist.

Ableiten des Wassers („Abfall“)

Die in der Norm bezeichneten „Abfälle“ des Brennstoffzellensystems einschließlich des Wassers als Nebenprodukt dürfen nur so abgeleitet werden, dass es dadurch zu keiner unsicheren Situation kommt. Dieses ist örtlich zu bewerten.

Regelkreise und Sicherheitsregelung

Software-Lösungen, die für Sicherheitsaufgaben des Brennstoffzellensystems relevant sind, müssen als sicherheitskritische Komponente nach ISO 13849-1, Level C, bewertet werden. Die entsprechende Hardware des Software-Sicherheitssystems muss gemäß IEC 60730-1:2013, IEC 60730-1:2013/AMD1:2015 und IEC 60730-1:2013/AMD2:2020, Anhang H, bewertet werden.⁴⁰

Diese Anforderungen wären für eine Kommunikationsschnittstelle bzw. -übertragung zwischen Brennstoffzellensystem und H₂-Infrastruktur relevant.

Wegfahren

In der neuen Fassung der Norm wurde der Absatz „Wegfahren“ eingefügt, in dem gefordert wird, dass das Brennstoffzellensystem Mittel umfassen muss, die die Wahrscheinlichkeit des Wegfahrens oder auch einer anderen Bewegung mit angekuppeltem Tankschlauch verringert wird.

Als Beispiele werden konstruktive Maßnahmen genannt aber prinzipiell auch andere Mittel zugelassen.

Wenn die Wegfahrsperrung über Schalter, Stromkreise oder ähnlichem aktiviert wird, müssen diese im Verdünnungsbereich entsprechend klassifiziert sein z. B. gem. IEC 60079-0.

³⁹ Vgl. (DIN EN IEC 62282-4-101, 2023, S. 33)

⁴⁰ S. (DIN EN IEC 62282-4-101, 2023, S. 44)

D. Technische Randbedingungen

D.1. Drahtlose Datenübertragung

Im Rahmen dieser Studie wurde festgestellt, dass viele Schnittstellen bei der Betankung von Intralogistikfahrzeugen mit Wasserstoff (z. B. Wasserabsaugung, Volumenunterschiede der H₂-Behälter auf Grund unterschiedlicher Flottenfahrzeuge, Betankungsprotokoll etc.) durch eine bidirektionale Kommunikation gelöst oder zumindest zu einer Verringerung der Komplexität führen kann. Eine kabelgebundene Kommunikationsschnittstelle wird vom Großteil der CIN-Partner auf Grund der erfahrungsgemäßen Verschleißerscheinungen und des zusätzlichen Aufwands für den Fahrer während des Betankungsprozesses als nachteilig bewertet. Dementsprechend wurde in dieser Studie ein besonderer Fokus auf drahtlose Datenübertragungstechnologien gesetzt.

Die kontinuierliche Entwicklung der Kommunikationstechnologien hat in den letzten Jahrzehnten einen bemerkenswerten Fortschritt erlebt. Insbesondere die drahtlose Kommunikationstechnologie hat sich zu einer unverzichtbaren Grundlage für die moderne Gesellschaft entwickelt. Beginnend mit der drahtlosen Übertragung von Daten und Informationen bis hin zur drahtlosen Vernetzung von Geräten hat die kabellose Kommunikation eine Fülle von Anwendungen ermöglicht, die unser tägliches Leben revolutioniert haben.

Die Erforschung und Entwicklung dieser Technologien erfordert ein tiefes Verständnis von Funksignalen, Frequenzen, Bandbreiten, Modulation und Übertragungsstandards. Darüber hinaus spielen Aspekte wie Sicherheit, Interferenzen, Reichweite und Energieeffizienz eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung und Verwendung kabelloser Kommunikationssysteme.

Zu den wichtigsten technischen Randbedingungen gehört die Übertragungsgeschwindigkeit. Je höher die Übertragungsgeschwindigkeit, desto schneller können Daten über die drahtlose Verbindung gesendet und empfangen werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Reichweite, welche angibt, wie weit das drahtlose Signal reicht, bevor es an Stärke verliert oder vollständig abbricht. Eine größere Reichweite ermöglicht eine bessere Abdeckung und Flexibilität bei der Standortwahl von Geräten.

Berücksichtigt werden muss zudem, dass Betriebe gemäß der TRBS 1115 ab 2024 auch entsprechende Cybersicherheitsmaßnahmen ergreifen müssen, um Ihre Mess-, Steuer- und Regleinrichtungen entsprechend gegen Cyberbedrohungen zu schützen, z. B. in dem die Vernetzung und die Zugriffsmöglichkeiten auf ein notwendiges Maß zu reduzieren.⁴¹

Die Störanfälligkeit ist ein weiterer wichtiger Faktor. Drahtlose Kommunikationstechnologien arbeiten in einem Frequenzspektrum, das auch von anderen Geräten und Signalen genutzt wird. Um Interferenzen zu minimieren, müssen kabellose Technologien Störungen erkennen und darauf reagieren können, um eine stabile und zuverlässige Verbindung aufrechtzuerhalten.

Darüber hinaus ist, insbesondere bei der Betankung mit Wasserstoff im Industriebereich, die Sicherheit ein entscheidendes Anliegen bei kabelloser Kommunikation. Es ist wichtig, dass drahtlose Netzwerke vor unbefugtem Zugriff geschützt sind und die Übertragung von Daten

⁴¹ Vgl. (Ausschuss für Betriebssicherheit, 2023)

verschlüsselt wird, um sicherzustellen, dass sensible Informationen nicht kompromittiert werden.

Die Implementierung einer sicheren, drahtlosen Kommunikationstechnologie besitzt eine hohe Priorität bei der angestrebten Standardisierung der H₂-Betankung für Intralogistik-Anwendungen, um die physikalischen Eigenschaften der Komponenten des Brennstoffzellensystems während der Betankung durch die Zapfanlage kontinuierlich zu überwachen und weiterführend den Betankungsprozess effizient zu regeln.

Die nachfolgenden Unterkapitel umreißen die derzeit gängigsten Technologien des drahtlosen Datenaustausches.

D.1.1. Infrarot

Eine Datenübertragung mittels Infrarotschnittstelle erfolgt durch die Verwendung von Infrarotlicht (850 – 900 nm) als Medium zur Übertragung von Informationen. Die Informationen werden auf das Infrarotlicht aufmoduliert, indem die Intensität oder die Frequenz des Lichts entsprechend den zu übertragenden Daten verändert wird. Der Infrarot-Sender sendet hierbei das modulierte Infrarotlicht aus, das die übertragenen Informationen trägt. Das Infrarotlicht breitet sich in Form von Lichtimpulsen aus und breitet sich geradlinig in der Umgebung aus. Der Infrarot-Empfänger erfasst das ausgesendete Infrarotlicht und wandelt es wieder in elektrische Signale um. Diese Signale werden anschließend demoduliert, um die ursprünglichen Daten wiederherzustellen.⁴²

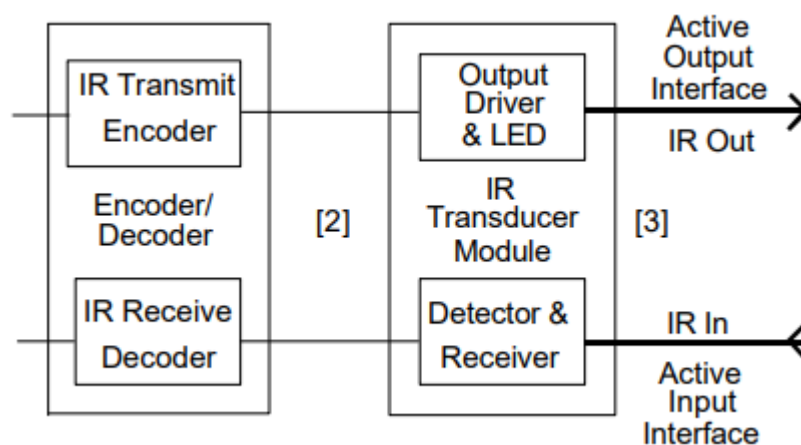


Abbildung 19: Infrarot-Wandlermodul, gem. IrDA⁴³

Bei einer drahtlosen Kommunikation mittels Infrarot-Technologie hängt die Reichweite von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich der Leistung des Infrarot-Senders, der Empfindlichkeit des Infrarot-Empfängers, der Umgebung, in der die Kommunikation stattfindet, sowie möglicher Hindernisse zwischen Sender und Empfänger.

Die Reichweite von Infrarot-Kommunikation ist im Allgemeinen sehr begrenzt. In den meisten Fällen beträgt diese nur ca. 1 Meter. Innerhalb dieses Bereichs können Infrarot-Systeme

⁴² Vgl. (Infrared Data Association (IrDA), 2023)

⁴³ S. (Infrared Data Association (IrDA), 2023, S. 6)

jedoch zuverlässig funktionieren. Sie werden häufig für kurze Distanzen in Verbraucherelektronik wie Fernbedienungen, Infrarot-Headsets oder Datenübertragung zwischen Laptops verwendet. Es ist von Bedeutung anzumerken, dass Infrarotverbindungen prinzipiell eine direkte Sichtlinie zwischen den kommunizierenden Geräten erfordern.

Die genauen maximalen Übertragungsraten hängen von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich der eingesetzten Technologie und den Protokollen. In der Regel sind die Übertragungsraten bei Infrarot-Technologie im Vergleich zu anderen drahtlosen Kommunikationstechnologien wie WLAN oder Bluetooth niedriger. Typische Übertragungsraten bei Infrarot-Systemen können im Bereich von einigen Kilobit pro Sekunde (z. B. 115,2 kbit/s für Serial Infrared SIR) bis hin zu einigen Megabit pro Sekunde (z. B. 4 Mbit für Fast Infrared FIR) liegen.⁴⁴

Bei der drahtlosen Kommunikation mittels Infrarot-Technologie wird Licht im Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums verwendet.

Die genaue Frequenz des Infrarotlichts kann je nach Anwendung variieren. Es gibt verschiedene Infrarotbereiche im elektromagnetischen Spektrum, darunter Nahinfrarot, Kurzwelle-Infrarot, Mittelwelle-Infrarot und Ferninfrarot. Typischerweise werden für die Infrarot-Kommunikation im Nahinfrarotbereich Frequenzen zwischen 300 GHz und 430 THz verwendet.⁴⁵

Bestimmte Materialien können die Übertragung von Infrarotlicht blockieren oder abschwächen, was zu einer Beeinträchtigung oder einem Verlust der Datenübermittlung führen kann. Einen Einfluss auf die Störanfälligkeit der Datenübermittlung haben insbesondere folgende Materialien:

- Undurchsichtige Materialien: Wenn sich Materialien wie Metalle oder undurchsichtige Kunststoffe zwischen den kommunizierenden Geräten befinden, kann die Datenübermittlung gestört oder unterbrochen werden.
- Schmutz, Staubpartikel oder andere Verunreinigungen auf den Oberflächen der Geräte oder zwischen ihnen können die Infrarotstrahlen streuen oder absorbieren und somit die Signalqualität beeinträchtigen.
- Oberflächen, die das Infrarotlicht stark reflektieren oder streuen, können zu Störungen führen. Beispielsweise können glänzende oder spiegelnde Oberflächen das Licht reflektieren und dadurch zu einer unerwünschten Signalverstärkung oder -abschwächung führen.

Da Infrarot-Verbindungen auf einer anderen Frequenz arbeiten als andere kabellose Kommunikationstechnologien, gibt es grundsätzlich kaum Interferenzen oder Störungen durch andere Geräte oder Signale in der Nähe.⁴⁶

Die serielle Infrarot-Technologie allein bietet normalerweise keine eingebaute Verschlüsselung oder spezifische Sicherheitsmaßnahmen für die Datenübertragung. Infrarot-Kommunikation wird oft für lokale, kurzdistanzierte Anwendungen eingesetzt, bei denen die Gefahr von externen Angriffen geringer ist. Es ist jedoch möglich, zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen zu implementieren, um die Sicherheit der Infrarot-Kommunikation zu verbessern.⁴⁷

⁴⁴ (Infrared Data Association (IrDA), 2023)

⁴⁵ Vgl. (InfraTec GmbH, 2023)

⁴⁶ Vgl. (Bundesamt für Strahlenschutz, 2023)

⁴⁷ (Joe Tajnai of HP, 2001)

D.1.2. WLAN

WLAN steht für Wireless Local Area Network und ermöglicht die drahtlose Kommunikation zwischen Geräten über Funkwellen. Es ist die am häufigsten verwendete drahtlose Kommunikationstechnologie, die als Hauptmedium für den globalen Internetverkehr dient. Sie treibt einen geschätzten wirtschaftlichen Wert von 3,5 Billionen US-Dollar voran. Das Wachstum von WLAN ist beeindruckend, mit mehr als 3,8 Milliarden Geräten, die jährlich ausgeliefert werden, und 19,5 Milliarden Geräten, die weltweit im Einsatz sind.

Im Laufe von zwei Jahrzehnten hat WLAN die Art und Weise, wie die Welt funktioniert und kommuniziert, revolutioniert. Die WLAN-Technologie, basierend auf dem IEEE-Standard für drahtlose Kommunikation 802.11, hat sich kontinuierlich weiterentwickelt. Jede Generation bringt schnellere Geschwindigkeiten, geringere Latenzzeiten und bessere Benutzererfahrungen in einer Vielzahl von Umgebungen und mit verschiedenen Gerätetypen.⁴⁸

Typischerweise wird die Reichweite eines WLAN-Signals durch die Sendeleistung des Access Points (Router) sowie durch Hindernisse wie Wände, Möbel oder elektronische Geräte beeinflusst. Im Allgemeinen kann eine typische WLAN-Verbindung in Innenräumen eine Reichweite von etwa 30 bis 50 Metern erreichen. Diese Reichweite kann jedoch stark variieren. In einigen Fällen, insbesondere bei Verwendung leistungsstarker Router oder WLAN-Repeater, kann die Reichweite auf bis zu 100 Meter oder mehr erhöht werden.

Bei der drahtlosen Kommunikation im Freien kann die Reichweite von WLAN-Signalen größer sein. Unter optimalen Bedingungen kann eine WLAN-Verbindung im Freien eine Reichweite von mehreren hundert Metern erreichen. Dies hängt jedoch von Faktoren wie der Umgebung, der Sichtlinie zwischen den Geräten und eventuellen Störungen ab.^{49 50 51}

Die maximalen Übertragungsraten, die bei der WLAN-Technologie erreicht werden können, variieren je nach dem verwendeten WLAN-Standard. Die gängigsten WLAN-Standards sind 802.11n, 802.11ac und 802.11ax (auch bekannt als Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 und Wi-Fi 6).

Der 802.11n-Standard unterstützt theoretische Übertragungsraten von bis zu 300 Mbit/s oder 600 Mbit/s, je nachdem, ob die Geräte eine einzelne oder mehrere Antennen verwenden.

Der 802.11ac-Standard ermöglicht höhere Übertragungsraten und kann theoretisch Geschwindigkeiten von bis zu mehreren Gigabit pro Sekunde ca. 6,9 (Gbit/s) erreichen. In der Praxis können typische Übertragungsraten von 400 Mbit/s bis 1,3 Gbit/s erwartet werden, abhängig von der Anzahl der verwendeten Antennen und der Bandbreite des verwendeten Funkkanals. Der 802.11ax-Standard, der auch als Wi-Fi 6 bezeichnet wird, bietet eine noch höhere Leistungsfähigkeit. Theoretisch können Übertragungsraten von bis zu 10 Gbit/s erreicht werden, aber in der Praxis werden typischerweise Geschwindigkeiten von 1 Gbit/s oder mehr erzielt.⁵²⁵³

⁴⁸ (Wi-Fi Alliance, 2023)

⁴⁹ (Sysadmin, 2023)

⁵⁰ (LTE-Anbieter.info, 2023)

⁵¹ (Elektronik-Kompendium.de, 2023)

⁵² (LTE-Anbieter.info, 2023)

⁵³ (Wi-Fi Alliance, 2023)

Die WLAN-Technologie arbeitet in verschiedenen Frequenzbändern, abhängig vom verwendeten WLAN-Standard und den länderspezifischen Vorschriften. Die gängigsten Frequenzbänder für WLAN sind 2,4 GHz und 5 GHz. Das 2,4-GHz-Band ist das ältere und häufiger genutzte Frequenzband. Es bietet eine gute Reichweite und Durchdringung von Hindernissen, hat jedoch eine begrenzte Bandbreite. Die meisten WLAN-Geräte unterstützen das 2,4-GHz-Band, da es eine weite Verbreitung hat. Allerdings kann dieses Band anfällig für Interferenzen von anderen Geräten wie Mikrowellen, Bluetooth-Geräten oder schnurlosen Telefonen sein. Das 5-GHz-Band bietet eine höhere Bandbreite und weniger Interferenzen im Vergleich zum 2,4-GHz-Band. Es ermöglicht schnellere Übertragungsraten und eine bessere Leistung in Bereichen mit hoher Netzwerkdichte. Das 5-GHz-Band hat jedoch eine etwas geringere Reichweite und kann durch Wände und andere Hindernisse stärker beeinträchtigt werden.

Neuere WLAN-Standards wie 802.11ac (Wi-Fi 5) und 802.11ax (Wi-Fi 6) unterstützen sowohl das 2,4-GHz- als auch das 5-GHz-Band, während ältere Standards wie 802.11n (Wi-Fi 4) in der Regel nur das 2,4-GHz-Band verwenden.^{54 55}

Die meisten Baumaterialien wie Beton, Stein oder Metall können das WLAN-Signal stark abschwächen. Je dicker und dichter das Material ist, desto größer ist die Dämpfung des Signals. Betonwände sind oft besonders problematisch, da sie das Signal stark blockieren können.

Auch Flüssigkeiten, insbesondere Wasser, können WLAN-Signale stark dämpfen. Metallische Oberflächen wie Metalltüren, Metallregale oder Metallmöbel können das WLAN-Signal reflektieren oder absorbieren. Dies kann zu Interferenzen führen und die Signalstärke verringern. Spiegelnde Oberflächen können das WLAN-Signal reflektieren und seine Richtung ändern. Dies kann zu Signalabschwächungen und Interferenzen führen.⁵⁶

Bei WLAN-Netzwerken werden zusätzlich zu Authentifizierungs- und Autorisierungsmethoden grundsätzlich Verschlüsselungsprotokolle verwendet, um die übertragenen Daten zu schützen. Das am weitesten verbreitete Verschlüsselungsprotokoll für WLAN ist WPA2 (Wi-Fi Protected Access 2), das den Advanced Encryption Standard (AES) verwendet. WPA3 ist eine neuere Version, die zusätzliche Sicherheitsfunktionen bietet, aber noch nicht so weit verbreitet ist.⁵⁷

⁵⁴ Vgl. (Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH (RTR-GmbH), 2023)

⁵⁵ Vgl. (Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH (RTR-GmbH), 2023)

⁵⁶ Vgl. (energis GmbH, 2023)

⁵⁷ (Avast Deutschland GmbH, 2023)

D.1.3. NFC-Technologie (Unterschied zu RFID)

RFID (Radio-Frequency Identification) und NFC (Near-Field-Communication) sind zwei weit verbreitete und fortschrittliche drahtlose Kommunikationstechnologien, die in der heutigen Zeit zunehmend an Bedeutung gewinnen.

RFID ermöglicht die Kommunikation zwischen einem stromlosen Transponder (Tag) und einem elektrisch betriebenen Lesegerät (Reader).

RFID-Tags werden in aktive und passive Transponder unterteilt. Aktive Tags verfügen über eine eigene Stromquelle und können über größere Entfernungen ausgelesen werden, während passive Tags keine eigene Stromquelle besitzen und über das elektromagnetische Feld des Lesegeräts mit Energie versorgt werden.

Passive Transponder arbeiten in unterschiedlichen RFID-Frequenzbereichen wie Niederfrequenz (LF), Hochfrequenz (HF) und Ultrahochfrequenz (UHF). Der Lesebereich variiert je nach Frequenz, wobei UHF-Tags die größte Reichweite bieten.

RFID-Technologie findet breite Anwendung in Bereichen wie Asset Tracking, Logistik und Lagerhaltung aufgrund ihrer Fähigkeit, Gegenstände und Waren effizient nachzuverfolgen und zu verwalten.^{58 59}

NFC basiert auf RFID-Protokollen und ermöglicht eine drahtlose Kommunikation über kurze Distanzen. Im Gegensatz zu dem standardmäßigen RFID kann ein NFC-Gerät sowohl als Lesegerät, als auch als Tag fungieren. NFC-Technologie funktioniert insbesondere in drei Betriebsmodi: Reader/Writer, Peer-to-Peer und Card Emulation.

- Im Reader/Writer-Modus kann ein NFC-fähiges Gerät Informationen von einem NFC-Tag oder einer NFC-Karte lesen.
- Im Peer-to-Peer-Modus können zwei NFC-fähige Geräte kontinuierlich Daten untereinander austauschen.
- Im Card Emulation Modus kann ein NFC-fähiges Gerät eine NFC-Karte, beispielsweise eine Kreditkarte oder eine Zugangskarte, emulieren.

⁵⁸ Vgl. (XTremeGN UG, 2023)

⁵⁹ Vgl. (XTremeGN UG, 2023)

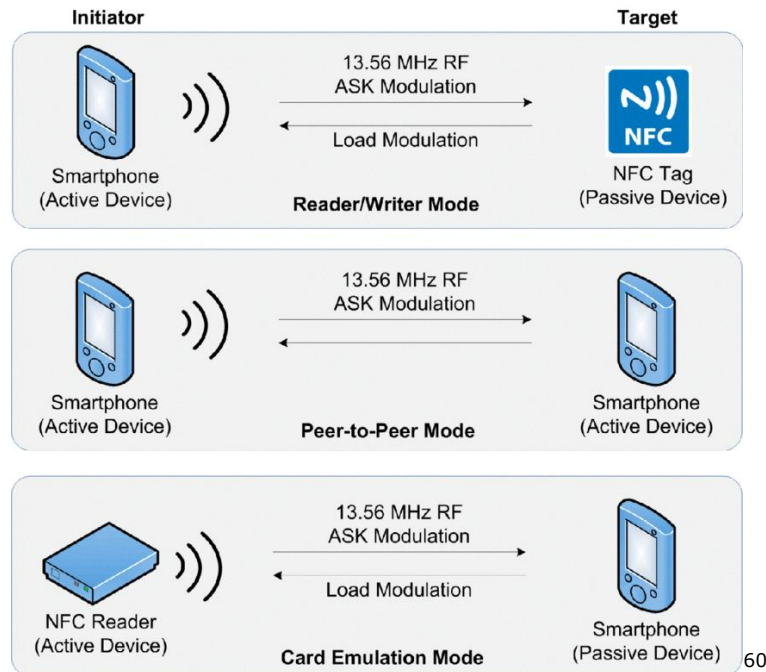


Abbildung 20: NFC-Interaktionsarten und -Betriebsmodi

NFC arbeitet auf der gleichen Frequenz wie HF-RFID (13,56 MHz), was zu einer begrenzten Reichweite führt. Die Übertragungsdistanz beträgt in der Regel nur wenige Zentimeter, wodurch eine sichere und nahbereichsbasierte Datenübertragung gewährleistet wird. Diese begrenzte Reichweite ist eine bewusste Designentscheidung, um die Sicherheit und Privatsphäre bei NFC-Transaktionen zu gewährleisten.

NFC wird häufig in sicherheitskritischen Anwendungen, wie Zugangskontrollen und kontaktloser Bezahlung eingesetzt, wenn eine enge räumliche Nähe zwischen Geräten für den Datenaustausch erforderlich ist.⁶¹

Die Übertragungsraten bei NFC (Near Field Communication) sind im Vergleich zu anderen drahtlosen Technologien eher niedrig. NFC arbeitet im Allgemeinen mit Übertragungsraten von 106 kbit/s, 212 kbit/s oder 424 kbit/s, je nachdem, welcher Übertragungsmodus verwendet wird.

Diese Übertragungsraten sind ausreichend für Anwendungen wie kontaktloses Bezahlen, Datenaustausch zwischen Smartphones oder das Auslesen von NFC-Tags. Sie sind jedoch nicht für datenintensive Anwendungen, wie das Streamen von Videos oder das Herunterladen großer Dateien, geeignet.⁶²

⁶⁰ S. (Coskun, 2023)

⁶¹ Vgl. (ECOM Instruments GmbH, 2023)

⁶² Vgl. (NFC Forum, 2023)

D.1.4. Bluetooth

Die klassische Bluetooth-Kommunikation wird vor allem zur drahtlosen Audioübertragung in Geräten wie Lautsprechern, Kopfhörern und Auto-Entertainment-Systemen verwendet. Der Frequenzbereich von 2,4 GHz entspricht den gängigen WLAN-Technologien. Im Gegensatz zur klassischen Bluetooth-Verbindung ist Bluetooth Low Energy (BLE) eine extrem energieeffiziente, drahtlose Datenübertragungsvariante, welche verschiedene Kommunikationstopologien, einschließlich Punkt-zu-Punkt, Broadcast und Mesh-Netzwerke unterstützt. Ursprünglich für die Gerätekommunikation konzipiert, wird Bluetooth LE heute zur Bestimmung der Anwesenheit, Entfernung und Richtung eines anderen Geräts verwendet.⁶³

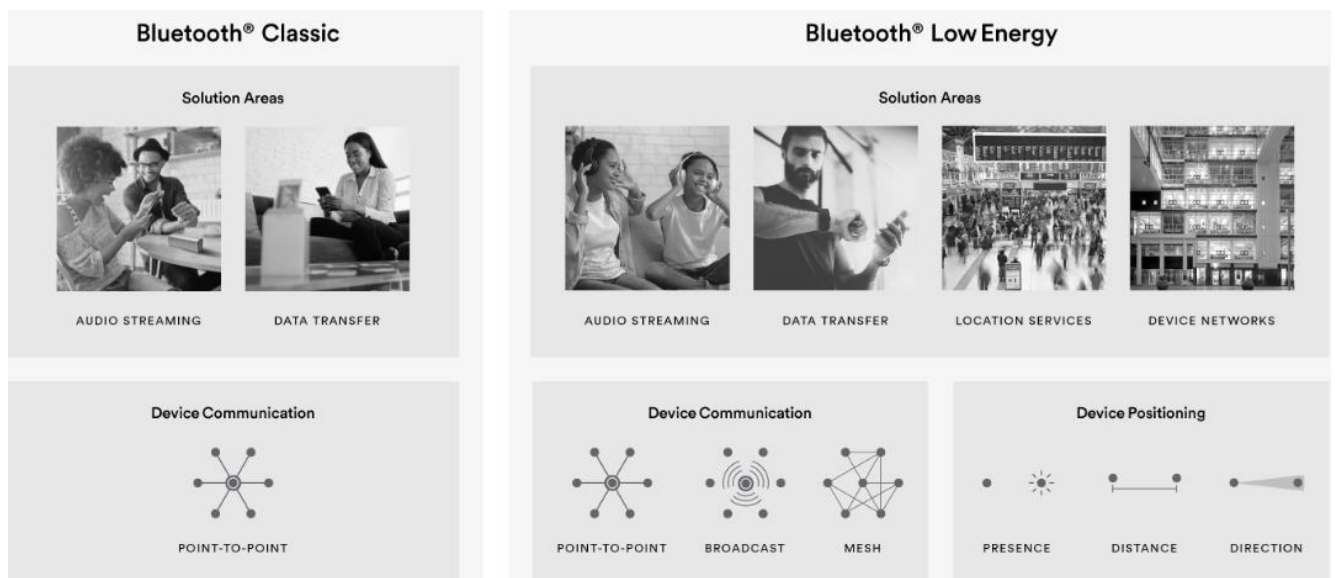


Abbildung 21: Der globale Standard für die Kommunikation und Positionierung von Bluetooth-Geräten, gem. [bluetooth.com](https://www.bluetooth.com)⁶⁴

Die Reichweite einer drahtlosen Kommunikation mittels Bluetooth Low Energy (BLE) kann je nach Umgebung und den verwendeten Geräten variieren. Die typische Reichweite von BLE erreicht etwa 10-30 Meter (ca. 100 m für klassisches BT). Die tatsächliche Reichweite hängt von vielen Faktoren ab, wie beispielsweise der Signalstärke, der Hindernisse, der Anzahl der Geräte in der Umgebung und der Qualität der Implementierung.⁶⁵

Die maximalen Übertragungsraten bei Bluetooth Low Energy (BLE) können sich je nach Implementierung und Version unterscheiden. Normalerweise werden Übertragungsraten von max. 1 Mbps (Megabit pro Sekunde) erreicht. Im Gegensatz hierzu sind

⁶³ Vgl. (NFC Forum, 2023)

⁶⁴ S. (Bluetooth SIG, 2023)

⁶⁵ Vg. (Bluetooth SIG, 2023)

Übertragungsgeschwindigkeiten bis zu 3 Mbps bei einer klassischen Bluetooth-Verbindung möglich.⁶⁶

Bluetooth Low Energy (BLE) arbeitet auf dem 2,4 GHz-Frequenzband. Wie bereits beschrieben, wird das 2,4 GHz-Band auch von anderen drahtlosen Geräten und Technologien genutzt. Dies kann zu Interferenzen führen, insbesondere in Bereichen mit hoher Konzentration von WLAN-Routern, Mikrowellenöfen oder anderen 2,4 GHz-Geräten. BLE verwendet jedoch spezielle Verfahren (z. B. Frequenzhopping), um Interferenzen zu minimieren und eine zuverlässige Kommunikation zu gewährleisten.^{67 68}

BLE verwendet darüber hinaus verschiedene Mechanismen zur Verschlüsselung der Daten, Authentifizierung und Autorisierung von Geräten. Der Pairing-Prozess stellt sicher, dass zwei Geräte miteinander vertrauenswürdig verbunden sind. Es gibt verschiedene Pairing-Methoden (z. B. "Just Works", "Passkey Entry"). Beim Bonding werden die Sicherheitsschlüssel zwischen den Geräten gespeichert, um die zukünftige Authentifizierung zu erleichtern und sicherzustellen, dass die Geräte erneut vertrauenswürdig miteinander verbunden werden. BLE ermöglicht es den Geräten darüber hinaus, verschiedene Berechtigungsstufen zu definieren, um den Zugriff auf bestimmte Dienste oder Eigenschaften zu kontrollieren.⁶⁹

⁶⁶ Vgl. (Bluetooth SIG, 2023)

⁶⁷ Vgl. (Bluetooth SIG, 2023)

⁶⁸ Vgl. (Bluetooth SIG, 2023)

⁶⁹ Vgl. (Teledyne LeCroy, 2023)

D.1.5. UWB-Technologie

Ultra-Wideband (UWB) ist eine drahtlose Kommunikationstechnologie, die eine breite Bandbreite von unterschiedlichen Funkfrequenzen nutzt. Im Gegensatz zu herkömmlichen drahtlosen Technologien, die auf bestimmten Frequenzbändern arbeiten, verwendet UWB unterschiedliche Frequenzen über einen großen Bereich.

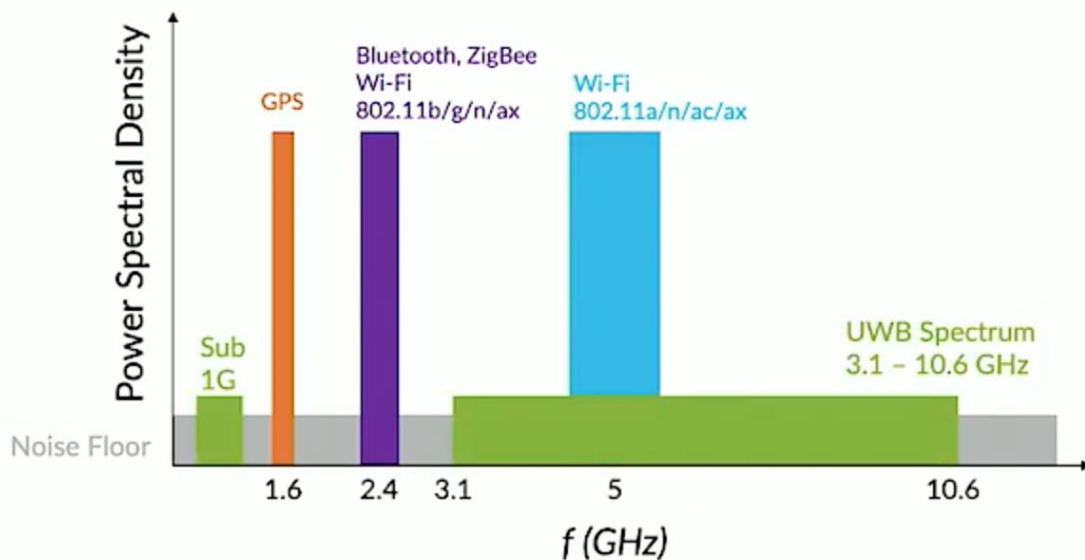


Abbildung 22: Ultra-Wideband Spektrum, gem. Bleesk⁷⁰

Unter optimalen Sichtverbindungsbedingungen können UWB-basierte Produkte eine Reichweite von bis zu 100 Metern erzielen. Die tatsächliche Reichweite von UWB hängt jedoch von mehreren Faktoren ab, wie es bei allen Funktechnologien der Fall ist. Dazu zählen die gewählte Kanalfrequenz, das Design der Antenne, die Sendeleistung und die Beschaffenheit der Umgebung, die durch Störungen im Frequenzbereich und das Vorhandensein von Materialien und Objekten beeinflusst werden kann.

Wenn es um präzise Positionsbestimmung geht, zeichnet sich UWB durch die Fähigkeit aus, Geräte und Objekte bis auf weniger als 10 cm genau zu lokalisieren, sei es mit oder ohne direkten Sichtkontakt. Mit einer Aktualisierungsrate von 200–1000-mal pro Sekunde erfolgt die Ortung in Echtzeit. UWB-Impulse widerstehen auch einem häufig auftretenden Problem, das als Multipath-Effekt bekannt ist. Dabei erreichen Radiosignale den Empfänger auf mehreren Wegen, bedingt durch Reflexion oder Brechung durch Objekte in der Nähe des Haupt-Signalwegs.

Bei der Ortung wird nicht die Signalstärke (wie bei anderen Technologien) verwendet, sondern die Laufzeit des Signals berücksichtigt. Das Verfahren berechnet die Position der Empfangsgeräte anhand der unterschiedlichen Signalverzögerungen.

⁷⁰ S. (Bleesk Benelux Sprl, 2023)

UWB weist darüber hinaus eine geringere Anfälligkeit für Störungen in industriellen Umgebungen auf. Durch das Aussenden einer Milliarde Impulsen pro Sekunde, was einem Impuls pro Nanosekunde entspricht, erreicht UWB eine hohe Echtzeitgenauigkeit.

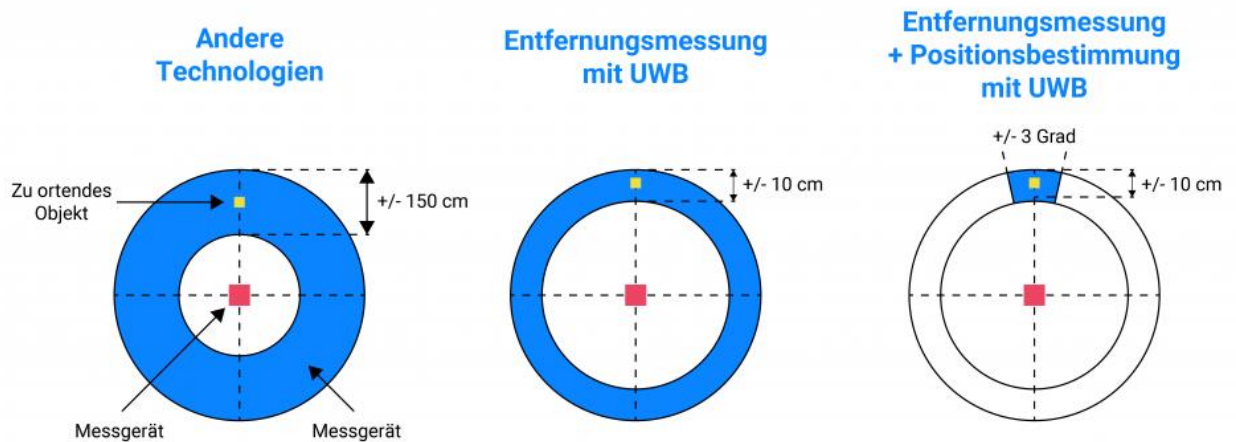


Abbildung 23: Einsatz der UWB-Technologie, gem. Cosmach⁷¹

UWB arbeitet abseits des stark frequentierten 2,4 GHz-Bereichs. Die für die Ortung und Entfernungsmessung verwendeten UWB-Impulse operieren im Frequenzbereich zwischen 6,5 und 9 GHz und stören drahtlose Übertragungen in anderen Teilen des Spektrums nicht. Das bedeutet, dass UWB neben den heutzutage beliebtesten drahtlosen Formaten wie Satellitennavigation, Wi-Fi, Bluetooth und sogar Near Field Communication (NFC) koexistieren kann. Aufgrund des breiten Frequenzbereichs besitzt die UWB-Technologie einen geringen Energieverbrauch, wodurch hohe Übertragungsraten ermöglicht werden.⁷²

⁷¹ (Comarch Software und Beratung AG, 2023)

⁷² Vgl. (FiRa Consortium, Inc, 2023)

D.1.6. Anwendung für die H₂-Betankung von Intralogistikfahrzeugen

Die technischen Randbedingungen für kabellose Kommunikationstechnologien sind dynamisch und entwickeln sich ständig weiter, um den steigenden Anforderungen der drahtlosen Konnektivität gerecht zu werden und innovative Lösungen für viele Anwendungen anzubieten – von Mobilfunknetzen über WLAN bis hin zu Bluetooth und anderen drahtlosen Technologien.

Die in dieser Studie betrachteten drahtlosen Kommunikationstechnologien sind derzeit am Weltmarkt fest etabliert. Lediglich die UWB-Technologie ist aktuell noch im Entwicklungsstadium. Da sich dieser Kommunikationstyp erst noch in der Industrie beweisen muss, hat er noch nicht den gleichen Produktions- oder Einsatzumfang wie z. B. BT/Bluetooth LE erreicht und ist daher derzeit teurer als die Vergleichstechnologien. Wie bei ähnlichen Funktechnologien ist jedoch davon auszugehen, dass Skaleneffekte die Kosten für UWB-Komponenten im Laufe der Zeit reduzieren werden.

Im Bereich der Wasserstoffbetankung von PKWs gehört die Integration einer Infrarotschnittstelle zur Datenkommunikation an der Zapfpistole bzw. dem Fahrzeug zum Stand der Technik und ist bereits normativ in der SAE J2799 erfasst (s. Absatz C.9). Wie bereits im Absatz B.5.1 dargestellt, erfordert die Zapfpistole aufgrund der hohen Anzahl an Betankungen pro Tag eine sehr hohe Beständigkeit gegenüber Stößen bzw. Fallenlassen. Es kann davon ausgegangen werden, dass im Vergleich zur PKW-Betankung die Anzahl der Betankungen von Intralogistikfahrzeugen mit Wasserstoff in Zukunft deutlich höher sein wird. Dies wiederum erfordert eine äquivalente Belastbarkeit für die gewählte drahtlose Kommunikationstechnologie, sofern diese ebenfalls an der Zapfpistole im Rahmen der Befragung der CIN-Partner, als auch der Umfragen bei Marktteilnehmern von H₂-Betankungsanlagen für PKW, ist erfahrungsgemäß die Belastbarkeit der Infrarotschnittstelle aufgrund der optischen Bauteile nicht ausreichend gegeben. Darüber hinaus ist die im allgemeinen notwendige Sichtverbindung zwischen Empfänger- und Transmittermodul nachteilig zu bewerten, da die Verschmutzungsgefahr in den Prozessen der Industrie deutlich höher ist. In Bezug auf die Standardisierung der Betankungen von Intralogistikfahrzeugen mit Wasserstoff wird deshalb die Verwendung der Infrarot-Schnittstelle als drahtlose Datenübertragungsmethode als ungeeignet eingestuft.

Die WLAN-Technologie bietet an sich eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit und ist am Weltmarkt stark etabliert. Aufgrund der hohen Skalierungseffekte sind die Bauteilkosten des Weiteren sehr gering, sodass eine wirtschaftliche Implementierung in Zapfsäule und Brennstoffzellensystem grundsätzlich möglich ist. In der Industrie wird WLAN aus Sicherheitsgründen häufig nicht eingesetzt. Dies liegt unter anderem an den potenziellen Risiken, die mit drahtlosen Netzwerken verbunden sind.

Ein grundlegendes Sicherheitsproblem bei WLAN-Netzwerken ist die Gefahr von Man-in-the-Middle-Angriffen. Aufgrund der drahtlosen Übertragung können Angreifer den Datenverkehr abfangen und manipulieren, ohne dass die Beteiligten es bemerken. Diese Angriffsart wird durch die große Reichweite von WLAN noch begünstigt, da Angreifer aus der Ferne Zugang zum Netzwerk erlangen können. Dies stellt ein erhebliches Risiko für sensible industrielle Daten und Betriebsabläufe dar.

Darüber hinaus besteht bei WLAN aufgrund seiner großen Reichweite auch ein erhöhtes Risiko für Brute-Force-Attacken. Angreifer können mit speziellen Geräten oder Antennen versuchen, das WLAN-Signal über weite Strecken abzufangen und zu analysieren. Durch wiederholte Versuche, verschiedene Kombinationen der Benutzernamen und Passwörter auszuprobieren, können sie versuchen, sich unbefugten Zugang zum Netzwerk zu verschaffen. Um Angriffe auf-

grund der hohen Reichweite zu vermeiden, kann über die gewählte Antennentechnik eine Reichweitenreduzierung erfolgen. Diese wäre jedoch eine individuelle Lösung und stünde demnach im Konflikt mit einer Standardisierung der H₂-Betankungen.

Ein weiteres Problem in industriellen Umgebungen sind Interferenzen im gleichen Frequenzband. WLANs arbeiten üblicherweise im 2,4-GHz- oder 5-GHz-Frequenzband, das auch von vielen anderen Geräten genutzt wird, wie zum Beispiel drahtlosen Telefonen, Mikrowellen oder Bluetooth-Geräten. Diese Geräte können zu Störungen und Interferenzen führen, was die Leistung und Zuverlässigkeit des WLAN-Netzwerks beeinträchtigen können. In industriellen Umgebungen, in denen eine zuverlässige und stabile drahtlose Kommunikation entscheidend ist, können diese Interferenzen zu erheblichen Problemen führen und die Einsatzmöglichkeiten des WLANs einschränken.

Aufgrund dieser Sicherheitsbedenken, der potenziellen Herausforderungen bei der Nutzung des WLAN in industriellen Umgebungen und unter Berücksichtigung der Anregungen aus dem CIN-Netzwerk wird für die Standardisierung der H₂-Betankung von Intralogistikfahrzeugen eine WLAN-Kommunikation derzeit ausgeschlossen.

Die NFC-Kommunikation wird bei der Betankung von Fahrzeugen mit Wasserstoff als eine vielversprechende Lösung betrachtet. Im Vergleich zur derzeit üblichen Infrarotschnittstelle bietet die Integration von NFC in die Zapfpistole einige Vorteile. Zum einen erfordert sie keine optischen Bauteile wie bei der Infrarotschnittstelle, zum anderen besteht sie aus vergleichsweise robusten Induktionsschleifen, wodurch eine höhere Belastbarkeit vorauszusetzen ist. Dadurch kann die NFC-Technologie auch in anspruchsvollen Umgebungen eingesetzt werden. Des Weiteren ist auch eine ATEX-zertifizierte Ausführung möglich, welche für die Integration der Technologie in der Zapfpistole aufgrund möglicher Wasserstofffreisetzung beim Entkoppeln notwendig ist.⁷³

Ein weiterer entscheidender Vorteil von NFC ist die hohe Sicherheit, die durch den sehr geringen Abstand zwischen den Kommunikationspartnern gewährleistet wird. Ähnlich wie beim kontaktlosen Bezahlen sind Man-in-the-Middle-Angriffe und andere Sicherheitsbedrohungen kaum möglich. Dadurch wird eine sichere und zuverlässige Kommunikation zwischen der Zapfpistole und dem Brennstoffzellensystem ermöglicht.

NFC ist eine weit verbreitete Technologie mit geringen Bauteilkosten. Dies erleichtert die Integration in bestehende Infrastrukturen und senkt die Gesamtkosten für die Einführung der NFC-basierten Betankung von Brennstoffzellensystemen.

Die Nutzung von NFC-Kommunikation ist ein wesentlicher Baustein für die eindeutige Identifizierung des betankten Brennstoffzellensystems an der Zapfsäule. Durch NFC können Fahrzeuge/BZS und deren spezifische Eigenschaften schnell und zuverlässig erfasst werden, um eine sichere und effiziente Betankung zu gewährleisten.

Obwohl die Übertragungsrate von NFC im Vergleich zu anderen drahtlosen Kommunikationstechnologien gering ist, reicht sie dennoch aus, um die initiale Identifikation des Fahrzeugs und die Übertragung der erforderlichen Parameter während der Betankung zu ermöglichen. NFC eignet sich somit für die grundlegende Kommunikation zwischen der Zapfpistole und dem BZS während des Betankungsvorgangs.

Die Integration von Bluetooth Low Energy (BLE) in Zapfsäulen und Brennstoffzellensystemen zur Betankung von Fahrzeugen mit Wasserstoff ist problemlos umsetzbar. Im Gegensatz zu

⁷³ Vgl. (arfidex GmbH, 2023)

NFC können die notwendigen Bauteile außerhalb potenzieller ATEX-Zonen integriert werden, wodurch eine entsprechende ATEX-Zertifizierung im Allgemeinen nicht erforderlich ist. Ein bedeutender Vorteil von BLE im Hinblick auf die Automatisierung der Betankung ist die Fähigkeit zur Lokalisierung der Geräte. Es ermöglicht eine präzise Identifizierung und Kommunikation zwischen der Zapfsäule und dem Fahrzeug. Über die Näherung des Fahrzeugs zur Zapfanlage könnten bereits frühzeitig betankungsrelevante Informationen (z. B. H₂-Behältervolumen, Druckstufe, aktuelle H₂-Temperatur im H₂-Behälter) ausgetauscht werden, wodurch der Betankungsprozess optimiert werden könnte.

Ein Sicherheitsaspekt von BLE ist die geringe Reichweite im Vergleich zu WLAN. Dadurch wird das Risiko von Man-in-the-Middle-Angriffen und anderen Sicherheitsbedrohungen erheblich verringert, da potenzielle Angreifer sich in unmittelbarer Nähe befinden müssten, um eine Kommunikation zu stören.

Im Vergleich zu NFC bietet BLE höhere Datenübertragungsraten, was insbesondere bei der Übertragung von detaillierten Informationen über das Fahrzeug oder die Betankung von Vorteil ist. Diese höheren Übertragungsraten machen BLE zu einer vielversprechenden Technologie für die zukünftige H₂-Betankung.

Analog zu Bluetooth ist die Integration von UWB (Ultra-Wideband) in Zapfsäulen und Brennstoffzellensystemen zur Betankung von Fahrzeugen mit Wasserstoff ebenfalls problemlos möglich. Eine ATEX-Zertifizierung ist in der Regel nicht erforderlich, da die entsprechenden Bauteile außerhalb potenzieller ATEX-Zonen implementiert werden können. Ein wesentlicher Vorteil von UWB ist die zentimetergenaue Lokalisierung des BZS im Hinblick auf eine vollautomatisierte Betankung von fahrerlosen Transportsystemen, aber auch bei personengeführten Flurförderfahrzeugen (s. Abschnitt D.5 Automatisierung). Darüber hinaus ermöglicht UWB sehr hohe Datenübertragungsraten. Aufgrund der großen Bandbreite von UWB sind darüber hinaus Interferenzen unwahrscheinlich. UWB nutzt ein breites Frequenzspektrum, was zu einer erhöhten Unempfindlichkeit gegenüber Störungen und Interferenzen führt. Dadurch wird eine zuverlässige und stabile Kommunikation zwischen der Zapfsäule und dem Fahrzeug gewährleistet.

Kriterium	Infrarot	WLAN	NFC	BLE	UWB
Reichweite	wenige Meter	bis zu 100 m	4-10 cm	10-30 m	<< 100 m
Kommunikationswege	uni-direktional	bi-direktional	bi-direktional	bi-direktional	bi-direktional
Frequenz	300 GHz-430 THz	2,4 GHz / 5 GHz	13,56 MHz	2,4 GHz	6,1 (3,1 GHz) - 10,6 GHz
Übertragungsrate	einige kbit/s bis zu 4 Mbit/s	300 Mbit/s bis zu 10 Gbit/s	0,100 - 0,424 Mbit/s	max. 1 Mbit/s	7-27 Mbit/s
Sicherheit	optische (unverschlüsselte) Übertragung, geringe Reichweite	Sicherheitsprotokolle (WPA3), dennoch anfällig für MITM/Brute-Force- Angriffe	hoch auf Grund kurzer Reichweiten, Datenverschlüsselung dennoch möglich	Pairing der Geräte mit Datenverschlüsselung	Datenverschlüsselung
Vorteile	Integration in Zapfpistole bereits etabliert	hohe Übertragungsrate	hohe Sicherheit, Integration Zapfpistole analog IR-Schnittstelle möglich	Lokalisierung von Geräten, geringe Produktionskosten → FTS-Einsatz/autom. Betankung	sehr genaue Lokalisierung von Geräten (wenige cm) → FTS-Einsatz/autom. Betankung
Nachteile	geringe Belastbarkeit, Sichtverbindung notwendig	Störanfälligkeit durch Interferenzen oder belegte Kanäle	Übertragungsrate	Frequenzbereich WLAN	noch auf Wachstumskurve

Abbildung 24: Vergleich drahtloser Datenkommunikationen

D.1.7. Schrittweise Erweiterung der Datenkommunikation

Das abgestimmte Ziel mit den CIN-Partnern für die drahtlose Kommunikation bei der Betankung von Fahrzeugen mit Wasserstoff ist es, durch die kontinuierliche Übermittlung der physikalischen Zustände im H₂-Behälter die Betankungsgeschwindigkeit zu erhöhen.

Allerdings besteht bei der drahtlosen Kommunikation während des Betankungsprozesses das Problem der fehlenden funktionalen Sicherheit der Kommunikationsmodule und somit die potenzielle Unzuverlässigkeit der übermittelten Daten. Es besteht die Gefahr, dass fehlerhafte oder manipulierte Daten übermittelt werden, die im Ernstfall dazu führen können, dass die Grenzparameter des Brennstoffzellensystems überschritten werden und letztendlich der H₂-Behälter bersten kann. Dies würde ein Risiko für Verletzungen oder sogar Todesfällen bedeuten.

Eine mögliche Lösung für dieses Problem könnte die Anwendung der Black-Channel-Methode sein (siehe Kapitel D.1.7.4). Hierfür ist jedoch eine Implementierung von Hardware und Software an beiden Enden, sowohl an der Zapfsäule als auch am Brennstoffzellensystem, erforderlich.

Es wird deshalb empfohlen, die Datenkommunikation zwischen BZS und Zapfsäule schrittweise zu erweitern, um die Verlässlichkeit der Daten und der Datenmenge zu optimieren. Dabei werden im Rahmen dieser Studie vier Modelle klassifiziert, um dieses Ziel zu erreichen.

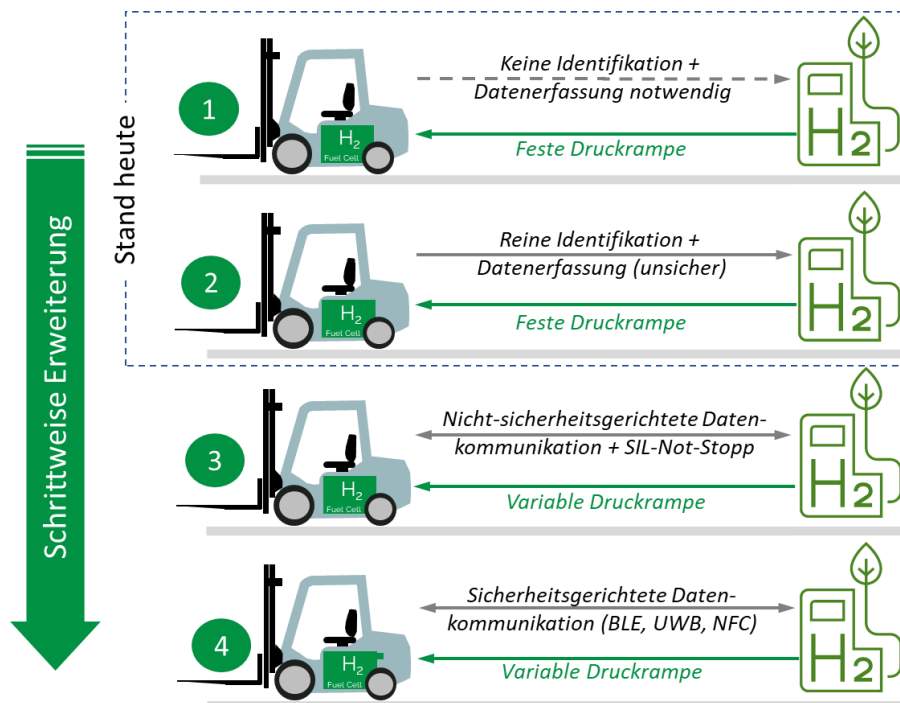


Abbildung 25: Roadmap drahtlose Datenkommunikation

D.1.7.1. Modell 1: Fehlende Kommunikation

Das erste Modell spiegelt grundsätzlich den bereits im Abschnitt B.8 (Aufnahme Ist-Zustand) aufgenommenen Ist-Zustand wider. Hierbei erfolgt keine Identifikation des BZS an der Zapfsäule, sowie keine (drahtlose) Datenerfassung von Betriebsparametern des Brennstoffzellensystems während der Betankung. Die Betankung erfolgt mit einer fest voreingestellten Druckrampe (z. B. 100 bar/min) unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur und der Nutzungsbeschränkung des Dispensers für zuvor qualifizierte Brennstoffzellensysteme (s. auch Tabelle 5: Betankungsmethoden und erforderliche Komponenten nach SAE J2601-3). Nachteilig ist hierbei die Notwendigkeit einer sehr konservativen Betankungsgeschwindigkeit, um unterschiedliche H₂-Behältervolumina innerhalb der Fahrzeugflotte sowie unbekannt Zustände (z. B. hinsichtlich H₂-Temperatur) innerhalb der BZS abzudecken. Als Schlussfolgerung hieraus werden die H₂-Behälter der verschiedenen BZS nicht optimal mit Wasserstoff befüllt und die Betankungszeiten sind weit von der technisch möglichen Befülldauer des jeweiligen Systems entfernt.

D.1.7.2. Modell 2: Identifikation und Datenerfassung

Der zweite Modellansatz wird in eine passive und aktive Variante unterteilt. Im Vordergrund stehen hierbei die Anpassungsmaßnahmen beim BZS als auch bei der Zapfsäule auf ein geringst mögliches Maß zu halten und dennoch wertvolle Erkenntnisse auf dem Weg zur Optimierung der Betankung zu erhalten.

Passive Ausführung (reine Identifikation)

Das Modell 2 verfolgt unter Implementierung einer drahtlosen Datenübertragungstechnologie die Identifikation des BZS mit Hilfe eines am Gehäuse des BZS fest installierten Tags. Bei einer passiven Ausführung, z. B. über einen RFID/NFC-Tag am BZS und eines RFID-Lesegeräts an der Zapfsäule oder respektive NFC-Lesegerät an der Zapfpistole (analog zur bisherigen IR-Schnittstelle für die PKW-Betankung), können BZS-spezifische Daten ausgelesen werden. Bei diesem Ansatz wird der passive Tag herstellerseitig mit den wesentlichen Spezifikationen der BZS dauerhaft und unveränderlich beschrieben. Prozessdaten des H₂-Behälters können bei der passiven Ausführung nicht zur Zapfsäule übermittelt werden.

In Erweiterung zu der im Modell 1 beschriebenen identischen Druckrampe über alle Größen der BZS innerhalb der Flotte, kann im Modell 2 entsprechend der Systemparameter von der Zapfsäule individuelle Druckrampen für die jeweilige Betankung eines BZS-Modells eingestellt werden. Zwar besäße das Betankungsprotokoll aufgrund der fehlenden kontinuierlichen Übertragung der Betankungsparameter noch eine konservative Einstellung hinsichtlich der Druckrampe, jedoch wäre die Betankung für die vormals benachteiligten BZS nun grundsätzlich in Bezug auf die Betankungsgeschwindigkeit angepasst.

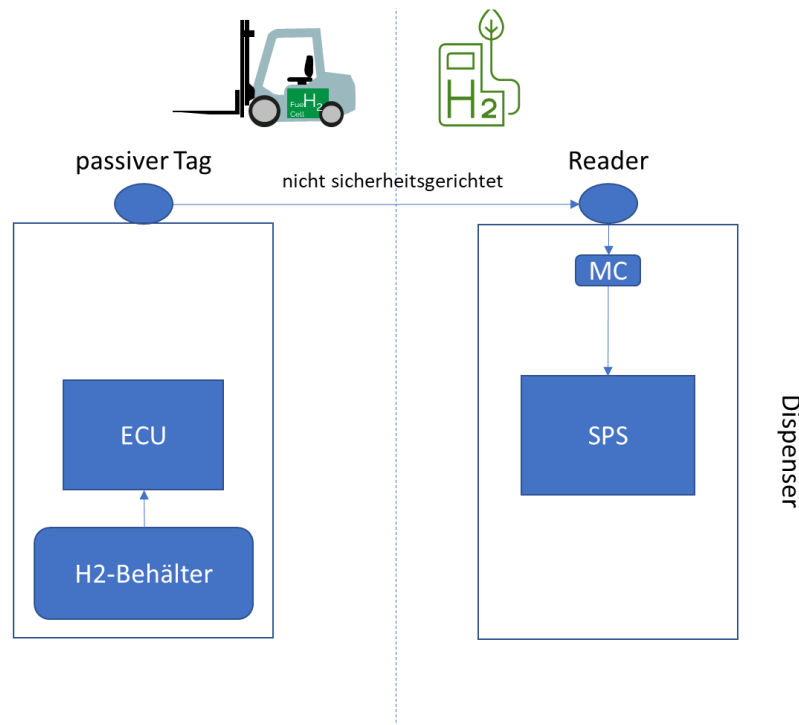


Abbildung 26: Reine Identifikation (Modell 2), ECU-elekt. Steuereinheit; MC-Mikrocontroller des Kommunikationsmoduls; SPS-speicherprogrammierbare Steuerung

Aus diesem Modellansatz sollen insbesondere erste Erkenntnisse über die Störanfälligkeit der gewählten Kommunikationstechnologie bei der H₂-Betankung erlangt werden. Darüber hinaus sind die physische Integration eines NFC-Lesegeräts in ATEX-Ausführung an der Zapfpistole, sowie dessen Belastbarkeit, relevant für eine weitere Betrachtung dieser Technologie. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes ist die relativ einfache Umsetzbarkeit beim BZS und in der Zapfsäule.

Aktive Ausführung (Identifikation und Datenerfassung)

Bei einer aktiven Ausführung auf Seiten des BZS werden, neben den systemspezifischen Randbedingungen (analog zur passiven Ausführung), kontinuierlich Prozessdaten während des Betankungsvorgangs an die Zapfsäule über das Kommunikationsmodul übermittelt. Hierzu werden die Prozessparameter, z. B. die H₂-Temperatur im Behälter des BZS, über die elektronische Steuereinheit des BZS (ECU-electronic control unit) zum Kommunikationsmodul (bestehend aus Mikrocontroller (MC) zur Umwandlung der Signale und Funkmodul bzw. Antenne) gesendet. Die Datenpakete würden anschließend über das Kommunikationsmodul der Zapfsäule eingelesen und in der vorhandenen Steuerung (SPS - Speicherprogrammierbare Steuerung) gespeichert werden. Die in Kapitel D.1.6 (Anwendung für die H₂-Betankung von Intralogistikfahrzeugen) erwähnten Kommunikationstechnologien NFC, BLE und UWB würden sich grundsätzlich für den Datenaustausch eignen. Aufgrund der höheren Sicherheit durch die kurze Reichweite wäre eine Implementierung der NFC-Technologie für diesen Modellansatz die bevorzugte Lösung.

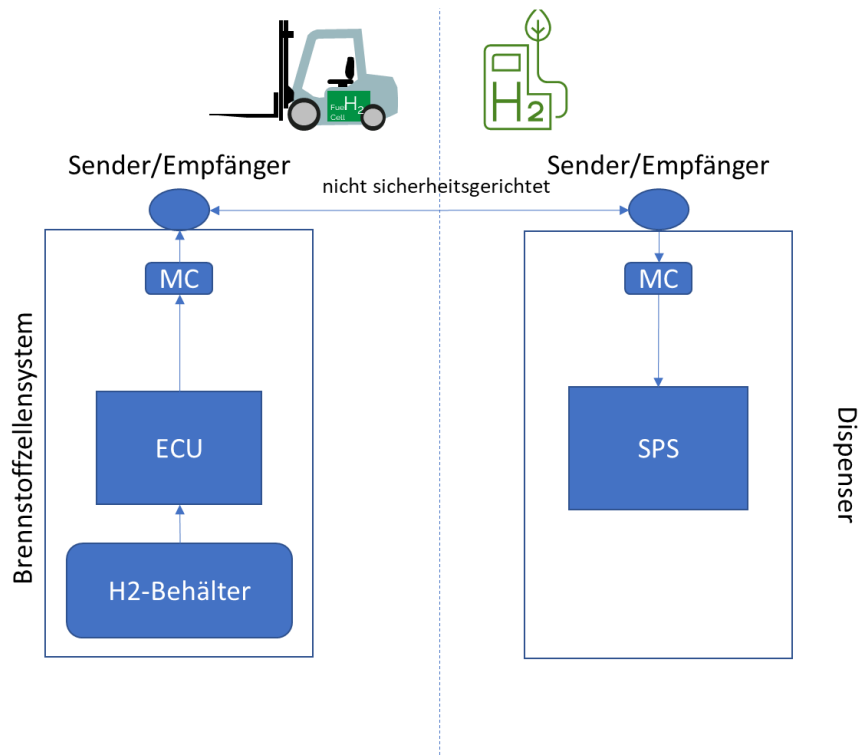


Abbildung 27: Identifikation mit Datenerfassung, ECU-elekt. Steuereinheit; MC-Mikrocontroller des Kommunikationsmoduls; SPS-speicherprogrammierbare Steuerung

Aufgrund des Einsatzes der (derzeit am Markt erhältlichen) Kommunikationsmodule, wäre eine Verwendung der übermittelten Daten zur Steuerung der von der Zapfsäule festgelegten Betankungsparameter (insbesondere der Druckrampe), unter Berücksichtigung der notwendigen funktionalen Sicherheit, nicht erlaubt. Dennoch ließen sich dadurch (zusätzlich zu den Vorteilen der passiven Ausführung) erste Erkenntnisse hinsichtlich des kontinuierlichen Datenaustauschs während der Betankung und der Störanfälligkeit dieser Verbindung erlangen. Darüber hinaus wäre eine detaillierte Untersuchung des Betankungsprozesses, bei unterschiedlichen Randbedingungen, möglich. Zudem könnte die Datenintegrität wiederum über eine physische Kabelverbindung validiert werden.

D.1.7.3. Modell 3: Datenkommunikation und sicherheitsgerichteter Not-Stopp

Als Erweiterung zum Modell 2 ist beim diesem Modellansatz die Implementierung von zusätzlichen Funkmodulen notwendig, welche entsprechende Konformität hinsichtlich funktionaler Sicherheit (z. B. SIL-Klassifizierung) aufweisen. Darüber hinaus ist die Verwendung einer sicherheitsgerichteten SPS (SSPS) in der Zapfsäule notwendig, sofern diese noch nicht Bestandteil der Zapfsäule ist.



Abbildung 28: Funk-Sicherheitssystem von Dold⁷⁴

Im Vordergrund steht bei diesem Ansatz, wie auch bereits bei Modell 2, die notwendigen Anpassungsmaßnahmen gering zu halten. Die einsetzbaren Funkmodule sind bereits am Markt etabliert und können u. a. einfache Notstopp-Signale von einem zu überwachenden Gerät zum Steuergerät übertragen. Die sicherheitsgerichtete Übertragung von Daten zwischen den Geräten würde sich auf ein einfaches Signal und nicht auf größere Datenpakete beschränken.

Im konkreten Anwendungsfall, bei der H₂-Betankung von Intralogistikfahrzeugen, würde durch eine zusätzliche Implementierung eines Temperaturbegrenzers (oder -wächters) am Ventilkopf des H₂-Behälters der Schutz des BZS vor überhöhter Temperatur im H₂-Behälter gewährleistet sein. Die Temperaturerfassung, -verarbeitung und -weiterleitung zum Funkmodul würde unabhängig von der ECU des BZS erfolgen.

Sofern innerhalb der BZS oder des Einschubraumes vom FFZ aus Platzgründen keine Möglichkeit der Integration des Funkmoduls bestünde, könnte dieses z. B. gesondert an die Fahrerkabine des FFZ angebracht und mit dem BZS über ein eigenes Kabel verbunden werden. Die Aktivierung der Funkverbindung würde durch vorherige NFC-Kommunikation bei der Kopplung der Zapfpistole mit dem Anschlussstutzen des BZS hergestellt.

Im Normalbetrieb würden dann beide Module eine kontinuierliche Funkverbindung aufrechterhalten. Sofern eine Überschreitung des spezifischen Temperaturgrenzwerts im H₂-Behälter erfasst wird, würde es zu einer Unterbrechung der Funkverbindung zwischen den beiden Geräten kommen. Auf Seiten der Zapfsäule würde die Registrierung des getrennten Signals am Funkmodul automatisch ein Abschaltsignal an die sicherheitsgerichtete Steuerung (SSPS) weitergeben. Daraufhin würde die Betankung mit Wasserstoff durch die Zapfsäule sofort beendet werden.

⁷⁴ S. (E. Dold & Söhne GmbH & Co. KG, 2023)

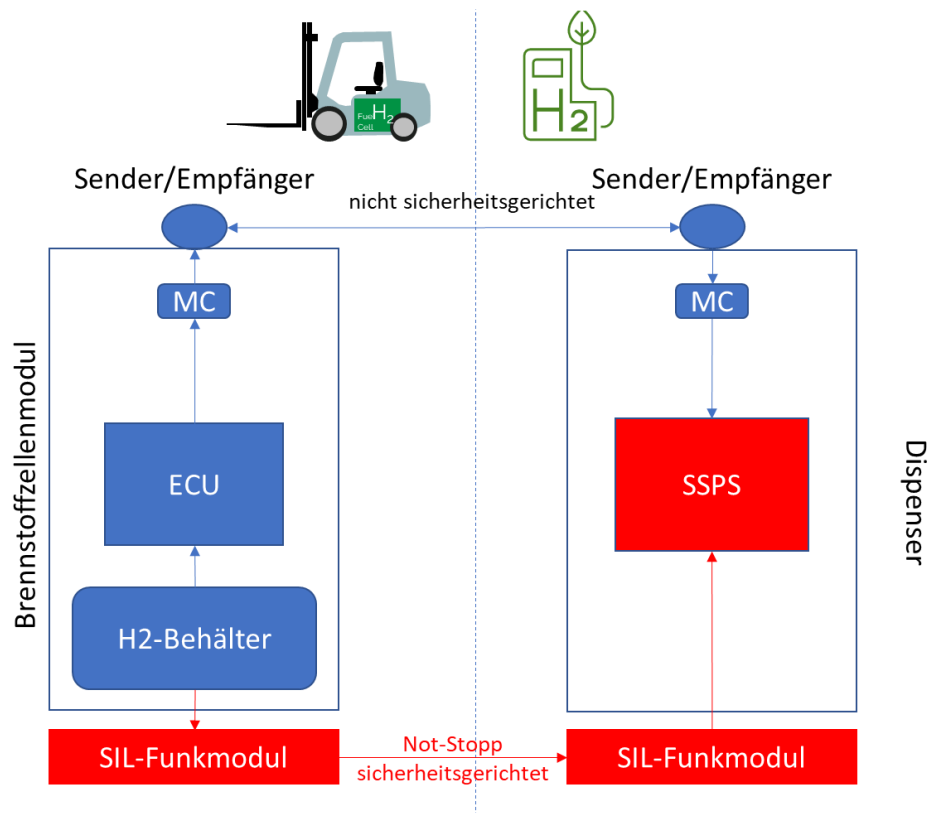


Abbildung 29: Datenverwendung mit Not-Stop, ECU-elekt. Steuereinheit; MC-Mikrocontroller des Kommunikationsmoduls; SSPS-sicherheitsgerichtete speicherprogrammierbare Steuerung

Neben der sicherheitsgerichteten Funkverbindung würde parallel ein kontinuierlicher Datenaustausch zwischen Zapfsäule und BZS über die NFC-Schnittstelle (o. ä.) während des Betankungsvorganges erfolgen. Mit Hilfe dieses Ansatzes wäre es nun über die NFC-Schnittstelle möglich, neben der reinen Erfassung gleichzeitig die übermittelten Daten, als Eingangsgrößen in der Zapfsäulenregelung, zu verwenden. Damit einhergehend würde die Zapfsäule in der Lage sein, eine variable, den momentanen Betriebszuständen angepasste Druckrampe, einzustellen und weiter eine deutliche Verringerung der Betankungszeit zu erreichen.

Die Möglichkeit der kontinuierlichen Regelung des Betankungsprozesses auf Grundlage der drahtlos übermittelten Zustände innerhalb des BZS ist das wesentliche Ziel dieses Modellansatzes. Dadurch können insbesondere tiefgreifende Erkenntnisse über die Änderung der Betankungsgeschwindigkeit sowie der Störungsanfälligkeit des Betankungsprozesses erlangt werden ohne erhebliche Eingriffe in die BZS durchzuführen.

D.1.7.4. Modell 4: Sicherheitsgerichtete Datenkommunikation

Gemäß diesem Modellansatz müssen verschiedene hardware- und softwareseitige Implementierungen vorgenommen werden, um die Kommunikation und Datenübertragung zwischen dem BZS und der Zapfsäule zu optimieren. Um Daten sicher und zuverlässig zu übermitteln (Stichwort funktionale Sicherheit), wird die Black-Channel-Methode eingesetzt.

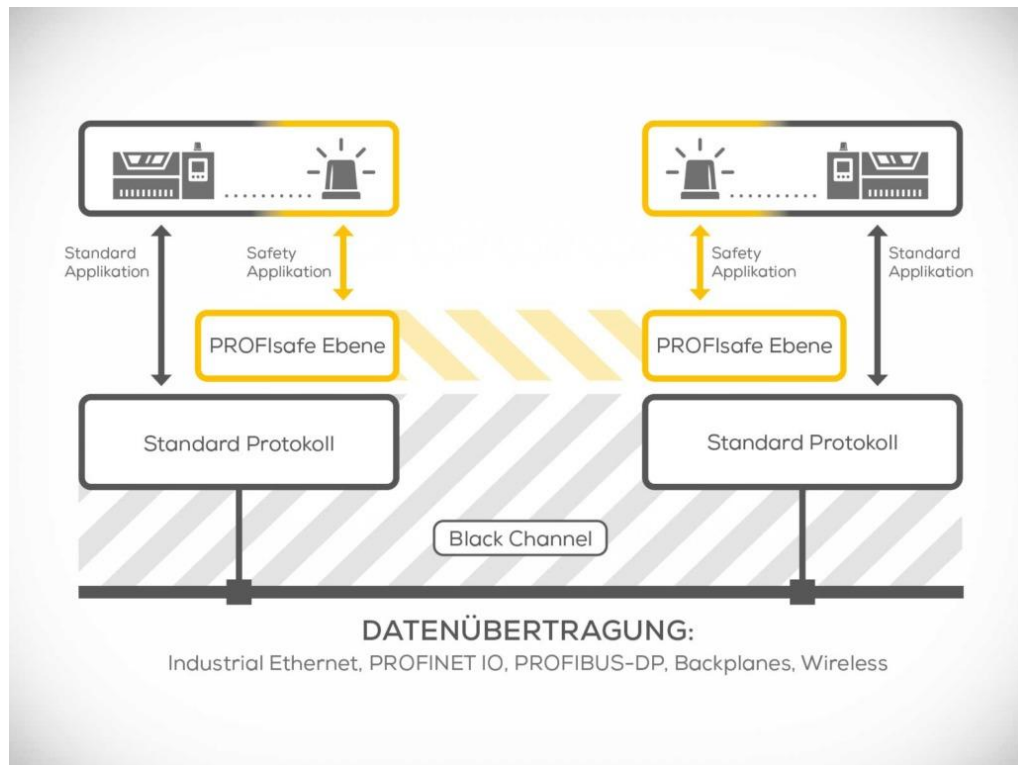


Abbildung 30: Black-Channel - Sichere Datenübertragung per Funk, gem. Schildknecht⁷⁵

Der Begriff „Black Channel“ bezieht sich auf die Übertragung von sicherheitsgerichteten Signalen über standardisierte Kommunikationsmedien wie Bluetooth, WLAN usw. Dabei sollen diese Signale zusammen mit Standardsignalen über ein gemeinsames Netzwerk transportiert werden, um Verdrahtungsaufwand zu vermeiden und Kosten zu minimieren. Jedoch wurden bestehende Netzwerke oft nicht den Anforderungen der funktionalen Sicherheit entsprechend entwickelt, was zu verschiedenen Kommunikationsfehlern führen kann.

Zu den möglichen Kommunikationsfehlern zählen unter anderem das Wiederholen, Verlieren, Einfügen, die falsche Abfolge oder Verfälschung von Datenpaketen, sowie die Verzögerung oder Fehladressierung. Um die Integrität der Datenübertragung zu gewährleisten, muss ein Sicherheitsprotokoll über dem Standardprotokoll implementiert werden. Dieses Protokoll erkennt und beherrscht mögliche Fehlerfälle oder Kombinationen von Fehlern. Durch fehler-

⁷⁵ S. (Schildknecht AG, 2023)

erkennende Maßnahmen und die fehlenden Anforderungen an das Netzwerk kann die Datenübertragungsintegrität überwacht werden.

Diese Funktionalität gilt auch für die Datenübertragung über kabellose Verbindungen wie WLAN oder Bluetooth. Dabei müssen mögliche Einschränkungen wie reduzierte Bandbreite oder längere Übertragungszeiten berücksichtigt werden.⁷⁶

Mit Hilfe der Black-Channel-Methode wird die Kommunikation zwischen dem BZS und dem Kommunikationsmodul an der Zapfsäule über drahtlose Kommunikationstechnologien wie Bluetooth, Ultra-Wideband (UWB) oder NFC (Near Field Communication) ermöglicht. Durch die Integration dieser drahtlosen Technologien können die Daten effizient und kontinuierlich von der BZS zur Zapfsäule übertragen werden.

Sobald die Übertragungsfehler ausgeschlossen werden können und die Daten als authentisch bestätigt wurden, werden sie zur Regelung der Betankung mit Wasserstoff verwendet. Die gesammelten Informationen dienen als Grundlage für eine präzise und effektive Steuerung des Betankungsvorgangs, um eine sichere und optimale Betankung des Fahrzeugs zu gewährleisten.

Dieser Modellansatz kombiniert somit verschiedene Technologien und Sicherheitsmaßnahmen, um eine zuverlässige und effiziente drahtlose Kommunikation sowie eine sichere Betankung von Fahrzeugen mit Wasserstoff zu ermöglichen.

⁷⁶ Vgl. (PHOENIX CONTACT Deutschland GmbH, 2023)

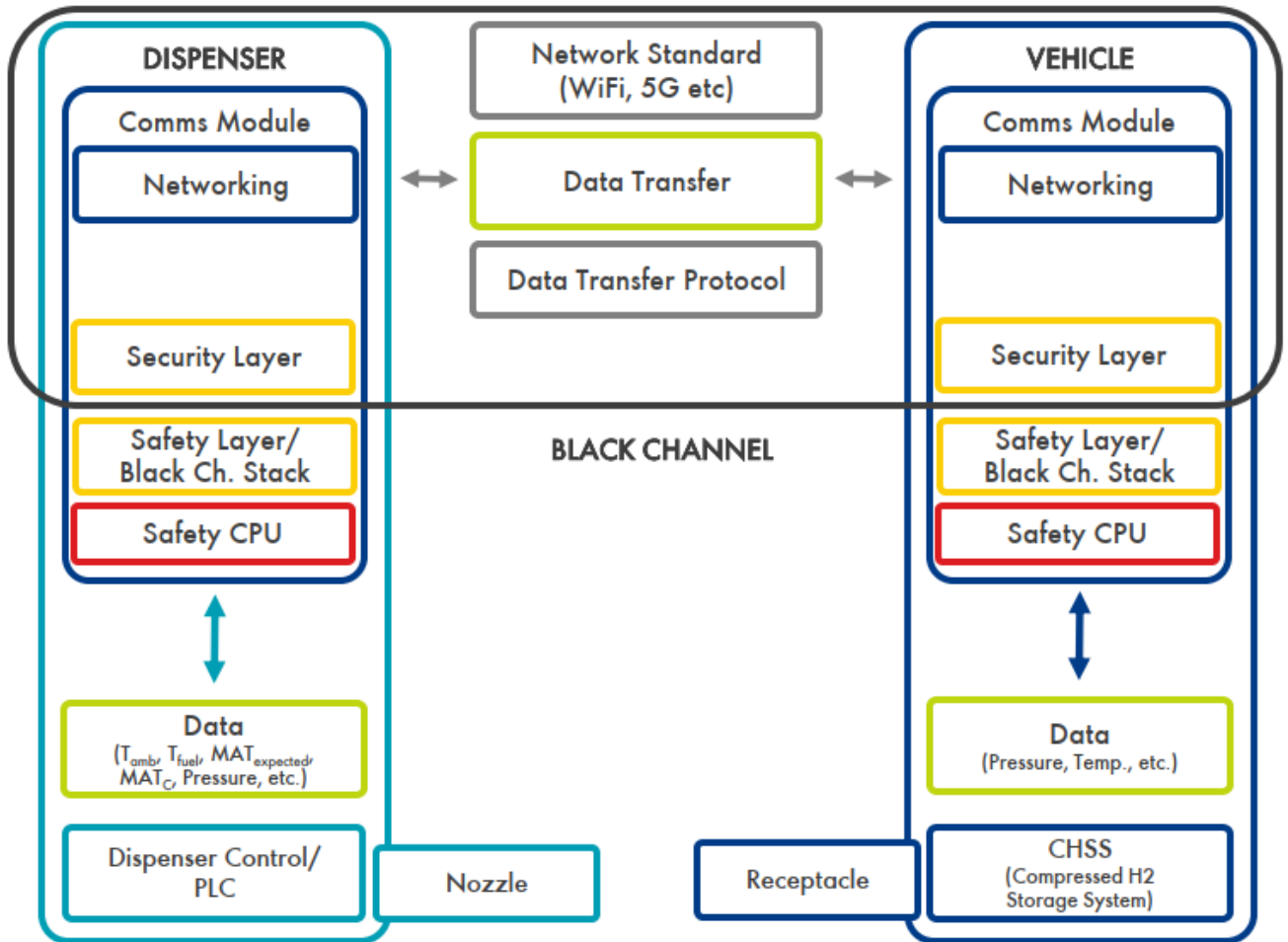


Abbildung 31: Black-Channel-Implementierung - Hardware und Software, gem. CEP⁷⁷

Ein wesentlicher Nachteil dieses Modellansatzes ist die notwendige Implementierung von Hard- und Software. Hier sind insbesondere die BZS- und Zapfsäulen-Hersteller gefragt, um eine vollumfängliche Integration der Technik im Markt zu etablieren.

⁷⁷ S. (CEP Partnership, 2023, S. 30)

D.2. Wasserabsaugung

D.2.1. Technische Randbedingungen

Die Absaugung des Nebenprodukts Wasser aus dem Sammelbehälter des Brennstoffzellensystems, insbesondere für Intralogistikfahrzeuge, stellt eine erhebliche Herausforderung dar. Die Entleerung der Wasserbehälter ist bei den größeren BZS für den Inneneinsatz weitverbreitet, da eine reine Austragung des entstehenden Wassers in Form von Wasserdampf nicht mehr möglich ist. Auch das Ablassen der Flüssigkeit auf die Verkehrsfläche während des Betriebs ist, insbesondere bei innerhalb von Produktionshallen liegenden Fahrwegen, nicht möglich.

Im Hinblick auf die Standardisierung von H₂-Betankungsanlagen muss die Wasserabsaugung für den Innen- als auch Außenbereich geeignet sein. Die Frostgefahr bei der Außenbetankung von Brennstoffzellenfahrzeugen ist ein wesentlicher Aspekt, der sorgfältig berücksichtigt werden muss. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass das im BZS befindliche Wasser unter normalen Betriebsbedingungen eine Temperatur größer 0°C aufweist. Dementsprechend besteht die Gefahr von Eisbildung vorrangig auf Seiten der Zapfsäule. Anhaltend niedrige Umgebungstemperaturen können zur Vereisung insbesondere in der Schlauchleitung führen, die die Wasserabsaugung beeinträchtigen oder verhindern kann. Das im Absaugeschlauch verbleibende Wasser kann bei geringen Umgebungstemperaturen mit der Zeit gefrieren, wodurch ohne weitere Vorkehrungsmaßnahmen der Schlauch beschädigt werden könnte. Es ist daher wichtig, geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um Frostschäden zu vermeiden, beispielsweise durch die Verwendung von beheizten Schlauchleitungen und geeigneter Isolierung der relevanten Komponenten oder durch Schwerkraft-, Vakuum- bzw. Druckluftentleerung. Während des Betriebs großer Fahrzeugflotten mit Brennstoffzellensystemen kann davon ausgegangen werden, dass eine Vereisung aufgrund vieler, kurzer Betankungsintervalle innerhalb der Zapfsäule nicht zu erwarten ist. Allerdings können nicht nur Unterbrechungen wie Werksferien, sondern auch schon längere Pausen am Wochenende dazu führen, dass das Wasser in den Leitungen bei winterlichen Temperaturen gefriert.

Um das Wasser des BZS effektiv abzusaugen, ist es erforderlich, einen ausreichenden Unterdruck in der Verbindungsleitung zu erzeugen. Hierbei ist die Auswahl des geeigneten Pumpentyps von großer Bedeutung:

- **Membranpumpen:** Membranpumpen gehören zu der Gruppe der Verdrängerpumpen und arbeiten mit einer flexiblen Membran, die sich periodisch bewegt, um den Unterdruck zu erzeugen. Die Membran öffnet und schließt sich, um Flüssigkeit aus dem Behälter anzusaugen und in die Verbindungsleitung zu drücken. Diese Art von Pumpe ist bekannt für ihre hohe Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit.

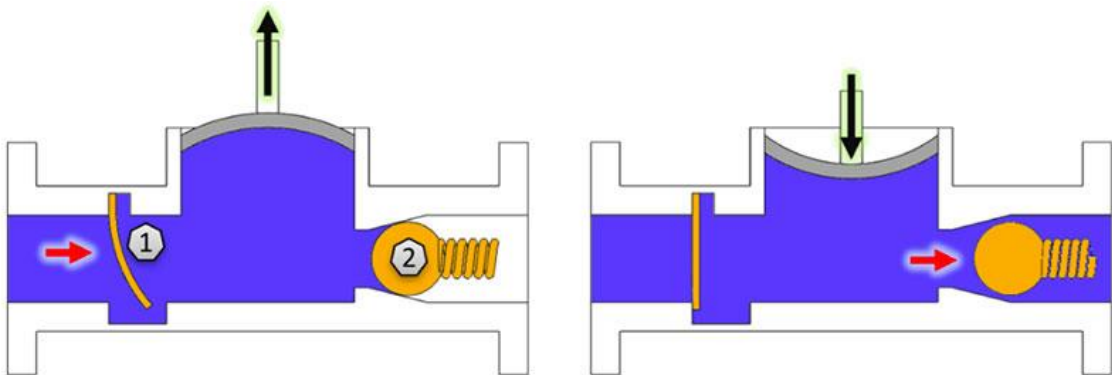


Abbildung 32: Verdrängerpumpe mit Hubkolbenantrieb, gem. Diener⁷⁸

○ **Venturi-Pumpen:**

Venturi-Pumpen nutzen den Venturi-Effekt, um Unterdruck zu erzeugen. Ein enger Querschnitt der Verbindungsleitung erzeugt einen Strömungsgeschwindigkeitsunterschied, der zu einem Druckabfall führt. Dieser Unterdruck zieht die Flüssigkeit aus dem Behälter in die Leitung. Venturi-Pumpen sind einfach aufgebaut und wartungsarm, jedoch können sie bei höheren Flüssigkeitsviskositäten weniger effektiv sein.

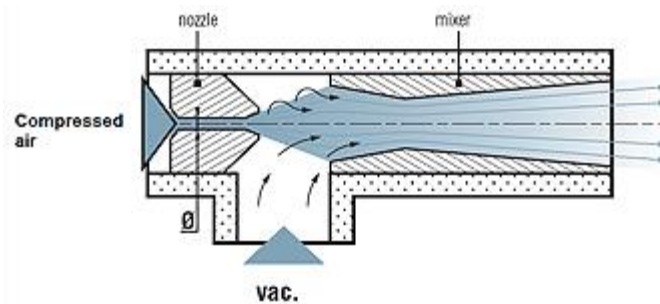


Abbildung 33: Venturiprinzip⁷⁹

○ **Peristaltikpumpen:**

Peristaltikpumpen - auch Schlauchpumpen genannt - arbeiten mit einer rotierenden Welle, die elastische Schläuche oder Rollen zusammendrückt und wieder freigibt. Hierdurch wird ein Unterdruck erzeugt, der die Flüssigkeit aus dem Behälter ansaugt und in die Verbindungsleitung befördert. Peristaltikpumpen sind besonders für ihre schonende Handhabung empfindlicher Flüssigkeiten und ihre Fähigkeit zur präzisen Dosierung bekannt.

⁷⁸ (Diener Precision Pumps AG, 2023)

⁷⁹ S, (www.coval-germany.com, 2023)

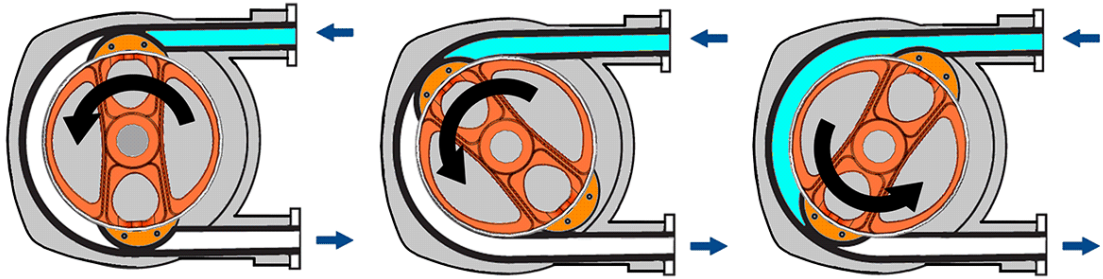


Abbildung 34: Schlauchpumpen-Prinzip nach Abaque⁸⁰

Neben der Pumpentechnologie muss auch die notwendige Förderhöhe der Pumpen berücksichtigt werden. Je nach Anwendung kann es erforderlich sein, das Wasser über größere Höhen zu fördern. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn sich kein Entwässerungspunkt in der Nähe der Zapfsäule befindet oder das abgepumpte Reinstwasser für andere Prozesse (z. B. Lackiererei) verwendet werden soll. Dies erfordert leistungsfähige Pumpen, die in der Lage sind, den erforderlichen Druck aufzubauen, um das Wasser gegen die Schwerkraft zu befördern. Die Auswahl der geeigneten Pumpen mit ausreichender Förderhöhe ist daher von entscheidender Bedeutung, um eine effektive Wasserabsaugung zu gewährleisten.

D.2.2. Fazit für Intralogistikanwendungen

Die Dispenser für Intralogistikfahrzeuge sollten im Standard über eine Wasserabsaugung verfügen. Auch wenn die Wasserabsaugung nur von den leistungsstärkeren Brennstoffzellensystemen benötigt wird, kommen diese in der Regel doch bei jedem Anwender im Flottenmix vor. Es wird empfohlen, die bereits beschriebenen Kupplungstypen für die Wasserabsaugung beizubehalten. Anderer Kupplungen sollten aber zulässig bleiben, um auch Produktinnovationen nicht im Wege zu stehen.

Unter Berücksichtigung der Standardisierung der H₂-Betankung für die Intralogistikanwendung, die überwiegend im Innenbereich stattfindet, wird empfohlen, die Wasserabsaugung standardmäßig für den Einsatz im Innenbereich auszulegen und optional eine Wasserabsaugung im Außenbereich auszulegen. Um für die Anwendung im Außenbereich das Einfrier-Risiko sicher zu vermeiden, sollten die gefährdeten Bauteile durch eine Beheizung geschützt werden. Der Schlauch zur Absaugung des Wassers im BZS könnte z. B. durch ein selbstregulierendes Heizband gegen Einfrieren geschützt werden.

Die Schnittstelle der Wasserabsaugung am BZS sollte sich darüber hinaus im Nahbereich der H₂-Kupplung befinden. Obwohl eine vollständige Integration dieser Schnittstelle in die Zapfpistole in naher Zukunft eher unwahrscheinlich ist, sollte diese dennoch als Ziel angestrebt werden, um den Betankungsprozess zu optimieren.

Um ein Einschnüren des Schlauchs aufgrund des von den Pumpen erzeugten Unterdrucks zu vermeiden, sollte grundsätzlich der Einsatz von Vakuumschläuchen vorgesehen werden. Es

⁸⁰ (PSG a Dover Company, 2023)

wird zudem empfohlen, die Pumpenleistung standardmäßig für eine Förderhöhe von 10m auszulegen. Dieses entspricht der Hallenhöhe in vielen Logistikbereichen. Pumpvorgänge über weitere Strecken oder mit hohen Differenzdrücken zur Abfuhr des abgesaugten Wassers sollten grundsätzlich vermieden werden. Wird das abgesaugte Reinstwasser für andere Industrieprozesse verwendet und größeren Förderhöhen oder -strecken zu überwinden sein, so muss mit dem Zapfsäulen-Hersteller eine individuelle Lösung für die erforderliche Förderhöhe sowie für den geeigneten Pumpentyp, gefunden werden.

Ein direktes Abpumpen durch das BZS gestaltet sich sowohl aufgrund des vorherrschenden Platzmangels als konstruktive Herausforderung, als auch teure Variante, da deutlich mehr Systeme entsprechend ausgestattet sein müssten. Daher wird empfohlen, Anpassungen an der Zapfsäule vorzunehmen, anstatt das BZS zu modifizieren.

Ein wesentlicher anzustrebender Aspekt ist die Kommunikation zwischen BZS und Zapfsäule. Zum Beispiel kann die Übermittlung der Daten des Füllstands an die Zapfsäule über eine drahtlose Verbindung erfolgen (s. Abschnitt D.1 Drahtlose Datenübertragung). Durch die Identifikation des BZS, beispielsweise über einen NFC-Tag, kann die Größe des Wasserbehälters an die Zapfsäule übermittelt werden. Auf dieser Grundlage kann die Zapfsäule eigenständig und individuell die Dauer der Wasserabsaugung für jede Betankung festlegen.

Bei kontinuierlicher Datenübertragung vom BZS an die Zapfsäule wird eine Behälter-Füllstandsüberwachung ermöglicht. Dadurch kann der Fortschritt der Wasserabsaugung überwacht werden, um einen effizienten Betankungsprozess sicherzustellen.

D.3. Wegfahrsperre

D.3.1. Technischen Randbedingungen

Die hier betrachtete „Wegfahrsperre“ soll verhindern, dass das Intralogistikfahrzeug während des Betankungsvorgangs vom Dispenser weggefahren wird und dadurch Schäden am Fahrzeug, am Brennstoffzellensystem oder dem Dispenser entstehen.

Eine Wegfahrsperre ist eine sicherheitsrelevante Funktion, die bereits für batteriebetriebene Flurförderzeuge mit integriertem Onboard-Ladegerät realisiert ist und in der EN 1175:2020 beschrieben wird. Wenn ein Flurförderzeug zum Aufladen der Traktionsbatterie mit einem Netzkabel verbunden ist, darf es nicht möglich sein, eine Bewegung des Flurförderzeugs herbeizuführen.⁸¹ Sowohl gemäß der Maschinenrichtlinie als auch als Ergebnis eine Risikobeurteilung ist zunächst eine technische Lösung (stehendes FFZ) vor einer Sollbruchstelle in der Zuleitung zu erbringen. Letzteres wird durch die Abreißkupplung am Dispenser gewährleistet. Ob eine Wegfahrsperre erforderlich ist sollte herstellerseitig im Rahmen einer Risikobeurteilung entschieden werden.

Für H₂-Dispenser ist es obligatorisch, dass die H₂-führende Schlauchleitung zwischen Dispenser und Füllkupplung mit einer Abreißkupplung ausgestattet ist (s. u.a. ISO 19880-Teil 3). Im Fall, dass ein Flurförderzeug dennoch mit noch angeschlossener Füllkupplung wegfährt, sorgt die die Abreißsicherung dafür, dass die Verbindung zwischen Zapfsäule und Betankungsschlauch zum Flurförderzeug kontrolliert getrennt und durch das Schließen des Rückschlagventils die Wasserstoffabgabe gestoppt wird. Damit wird sichergestellt, dass keine nennenswerten Mengen Wasserstoff beim Abreißen des H₂-Tankschlauchs frei werden, auch wenn eine Wegfahrsperre nicht wirkt. Die Abreißsicherung wirkt auch Schäden an der Füllkupplung oder dem Tankstutzen entgegen, gänzlich ausgeschlossen werden Schäden beim Abreißen dadurch aber nicht.

Die Abreißsicherungen können anschließend nach einer erfolgreich bestandenen Funktionsprüfung zwar wieder verwendet werden,⁸² die Funktionsprüfung, Beschaffung von eventuellen nicht mehr funktionsfähigen Bauteilen und abschließende Instandsetzung nimmt aber Zeit in Anspruch, währenddessen der Dispenser für weitere H₂-Betankungen nicht zur Verfügung stehen kann. Dieses kann insbesondere bei 24/7-Einsätzen bzw. einer hohen Fahrzeug-Auslastung zu Problemen in den Logistikprozessen führen. Zudem werden die durch das Wegfahren entstandenen Schäden von den Herstellern als Gewaltschäden eingestuft, sodass die Instandsetzung zu Lasten des Anwenders geht.

Es wird empfohlen eine Wegfahrsperre adäquat zu den batteriebetriebenen Flurförderzeugen auch für wasserstoffbetriebene Flurförderzeugen vorzusehen, da dieses nicht nur einen sicherheitsrelevante Funktion, sondern auch aus den genannten betrieblichen Aspekten eine sinnvolle Lösung ist.

Für die technische Realisierung einer Wegfahrsperre bei Intralogistikfahrzeugen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Neben anwendungstechnischen Kriterien sollten bei der Auswahl geeigneter Lösungen auch die technischen Anforderungen berücksichtigt werden, die sich aus den sehr unterschiedlichen Bauformen der Flurförderzeuge ergeben. Ziel sollte es sein, dass die Aktivierung der Wegfahrsperre möglichst einheitlich gelöst wird, um eine Interoperabilität aller Intralogistikfahrzeuge mit der H₂-Infrastruktur zu ermöglichen.

⁸¹ vgl. (SN EN 1175, 2020, S. 16)

⁸² Vgl. (WEH GmbH, 2023)

Anwendungstechnische Kriterien:

Eine zunächst naheliegend erscheinende technische Lösung ist es das Brennstoffzellensystem während der Betankung auszuschalten. Der Vorgang des Herunterfahrens und des anschließenden Startens des Brennstoffzellensystems kann jedoch einige wenige Minuten in Anspruch nehmen. Da die schnelle Betankung allerdings eines der zentralen, wirtschaftlichen Vorteile von H₂-betriebenen Flurförderzeugen darstellt, ist die Abschaltung des Brennstoffzellensystems während der Betankung kommerziell nicht sinnvoll.

Eine ähnliche Alternative könnte sein, die Stromzufuhr zwischen Brennstoffzellensystem und Flurförderzeug gänzlich zu unterbrechen. Das Brennstoffzellensystem bleibt so im Betrieb und auch die BZS-internen Überwachungssysteme wären somit voll funktionsfähig. Hier verlagert sich dann aber das Problem auf das Flurförderzeug, das dadurch komplett ausgeschaltet wird und dann nach der Betankung wieder gestartet werden müsste. Ein weiterer Nachteil ist, dass Flurförderzeuge häufig mit zusätzlichen Stromabnehmern, wie z. B. Monitoren, Barcodescannern und Terminals für die Lagerverwaltungssoftware (Warehouse Management Systeme, kurz: WMS) ausgestattet sind. Wenn die Stromversorgung zu diesen wichtigen Kommunikationsschnittstellen unterbrochen wird, dauert es z. T. erheblich lange bis die Systeme wieder hochgefahren sind. Last but not least ist eine Unterbrechung der Stromversorgung zu einem fahrerlosen Transportsystem auch ein undenkbares Szenario.

Aus anwendungstechnischer Sicht ist somit der bevorzugte Lösungsweg, die Strom- bzw. Leistungsbereitstellung zu begrenzen. Das Brennstoffzellensystem liefert dann nur so viel Leistung, dass die internen Überwachungssysteme und die externe Peripherie weiter ausreichend mit Strom versorgt wird, der Fahrmotor sich allerdings nicht in Bewegung setzen kann. Die Aktivierung der Wegfahrsperrung durch eine begrenzte Leistungsbereitstellung lässt sich prinzipiell sowohl über die Brennstoffzellensystemsteuerung als auch über die Fahrzeugsteuerung realisieren. Dafür reicht ein Signaleingang an die entsprechende Steuerung aus.

Technische Anforderung an die Aktivierung der Wegfahrsperrung:

Die Wegfahrsperrung sollte mit dem Beginn des Betankungsvorgangs aktiviert und bei Beendigung der Betankung deaktiviert werden und keine zusätzlichen Aktivitäten des Fahrers benötigen, die nicht mit dem Betankungsvorgang selbst zusammenhängen.

Im Abschnitt B.4 Wegfahrsperrung wurde bereits die heute realisierten Lösungen für die Aktivierung der Wegfahrsperrung eingegangen.

- **Variante „Tankklappe“**

Bei größeren Flurförderzeugen, wie z. B. Gegengewichtsstaplern oder 80V-Schleppern ist das Brennstoffzellensystem oft hinter einer seitlichen Verkleidung bzw. Batterietrogtür eingebaut. Hier muss die Batterietrogtür (s. Abbildung 35) oder eine Tankklappe (s. Abbildung 36) geöffnet werden, um Zugang zum Füllstutzen zu erhalten.



Abbildung 35: Toyota-Stapler mit geöffneter Batterietrogtür für die H₂-Betankung



Abbildung 36: Linde-Stapler mit geöffneter Tankklappe für die H₂-Betankung

In diesen beiden Fällen lässt sich fahrzeugseitig leicht ein Kontaktschalter an der Türöffnung integrieren, der dann ein entsprechendes Signal für die Aktivierung der Wegfahrsperrung an die Fahrzeugsteuerung übermittelt.

Allerdings existieren insbesondere bei den 24V-Lagertechnikgeräten häufig Fahrzeug-Bauformen, die über keine seitliche Verkleidung zum Batterieraum verfügen. Dieses erfordert eine andere Lösungsmöglichkeit, einen Signalgeber für die Wegfahrsperrung zu integrieren.

○ **Variante: „Tankklappe an der Brennstoffzelle:**

In der Abbildung 37 ist eine solche Tankklappe zu erkennen, die bisher allerdings nur von KION realisiert wurde. Die Anforderung dabei ist, dass die Tankklappe nicht aus der Fahrzeug- bzw. Brennstoffzellen-systemkontur herausragt. Gerade die schmalen Flurförderzeuge mit einer Chassisbreite von unter 800 mm (entspricht der Breite einer Europalette) werden für Blocklagerungen oder für die Beladung von LKWs eingesetzt. Hierbei fahren die Fahrzeuge z. T. nahezu bündig an Wänden oder Paletten vorbei. Herausstehende Konturen aus dem Flurförderzeug würden dann hängenbleiben oder abreißen.



Abbildung 37: Still-Niederhubkommissionierer mit offenem Batterietrog

- **Variante: „Kontaktschalter am Tankstutzen“:**
Hierbei befindet sich ein Kontaktschalter am Tankstutzen des Brennstoffzellensystems, der beim Ankuppeln der Füllkupplung aktiviert wird und das entsprechende Signal im Brennstoffzellensystem weitergibt. Dieses ist bisher nur als Sonderlösung realisiert worden.
- **Variante „Kommunikationskabel“:**
Das Kommunikationskabel ist prozessbedingt vor der Betankung anzuschließen. Wenn das Kommunikationskabel nicht angeschlossen ist, kann die Betankung nicht gestartet werden.
Bei Beendigung des Betankungsvorgangs bleibt die Wegfahrsperrung so lange aktiviert, bis das Kommunikationskabel wieder abgenommen wurde.
- **Variante „Kabellose Kommunikation“:**
Dieses ist bei heutigen Einsätzen zwar nicht realisiert, aber aufgrund der mittlerweile etablierten kabellosen Übertragungswege technologisch umsetzbar (vgl. hierzu auch D.1.7.2 - Modell 2: Identifikation und Datenerfassung). So kann z. B. über an Füllkupplung und dem Tankstutzen integrierte NFC-Sender ein entsprechendes Signal an das Brennstoffzellensystem übermittelt werden, dass die Wegfahrsperrung aktiviert. Aber auch andere kabellose Kommunikationswege wie BLE oder Ultra-Wideband sind vorstellbar. Ob das Signal für die Wegfahrsperrung sicherheitsgerichtet übertragen werden muss, sollte herstellerseitig im Rahmen einer Risikobeurteilung entschieden werden. Bei einer fehlerhaften Übertragung würde immer noch die Abreißsicherung an dem Dispenser wirken, sollte das Fahrzeug unbeabsichtigt losfahren,

D.3.2. Fazit für Intralogistikanwendungen

Zunächst sollte im Einklang mit der Maschinenrichtlinie herstellerseitig im Rahmen einer Risikobeurteilung bewertet werden, ob eine Wegfahrsperrung für die H₂-Betankung des Flurförderzeugs erforderlich ist. Aus Anwendersicht bietet eine Wegfahrsperrung (auch als mögliche Erweiterung) dadurch zusätzlichen Mehrwert, dass das Risiko für Gewaltschäden durch unabsichtliches Wegfahren weitestgehend ausgeschlossen werden kann.

Eine Wegfahrsperrung sollte unter Berücksichtigung der Standardisierung der H₂-Betankung für die Intralogistikanwendung möglichst einheitlich und herstellerübergreifend gelöst sein.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Bauformen der Flurförderzeuge wird empfohlen die Aktivierung der Wegfahrsperrung über den Anschluss der Füllkupplung an dem Tankstutzen zu aktivieren und in dem Zuge sollte dann auch die Signalverarbeitung seitens der Brennstoffzellensystemsteuerung erfolgen. Das Brennstoffzellensystem soll dann für die Dauer, in der die H₂-Füllkupplung angeschlossen ist, durch eine begrenzte Leistungsbereitstellung das Fahrzeug am Wegfahren hindern.

Idealerweise wird die Wegfahrsperrung über eine kabellose Kommunikation (z. B. NFC) aktiviert, die ein Signal weitergibt, sobald die H₂-Füllkupplung angeschlossen ist. Alternativ könnte die Wegfahrsperrung ebenso über eine Tankklappe am Brennstoffzellensystem oder einem Kontaktschalter am Tankstutzen aktiviert werden.

Zumindest übergangsweise sollte auch die Aktivierung der Wegfahrsperrung über das Datenkommunikationskabel zulässig sein.

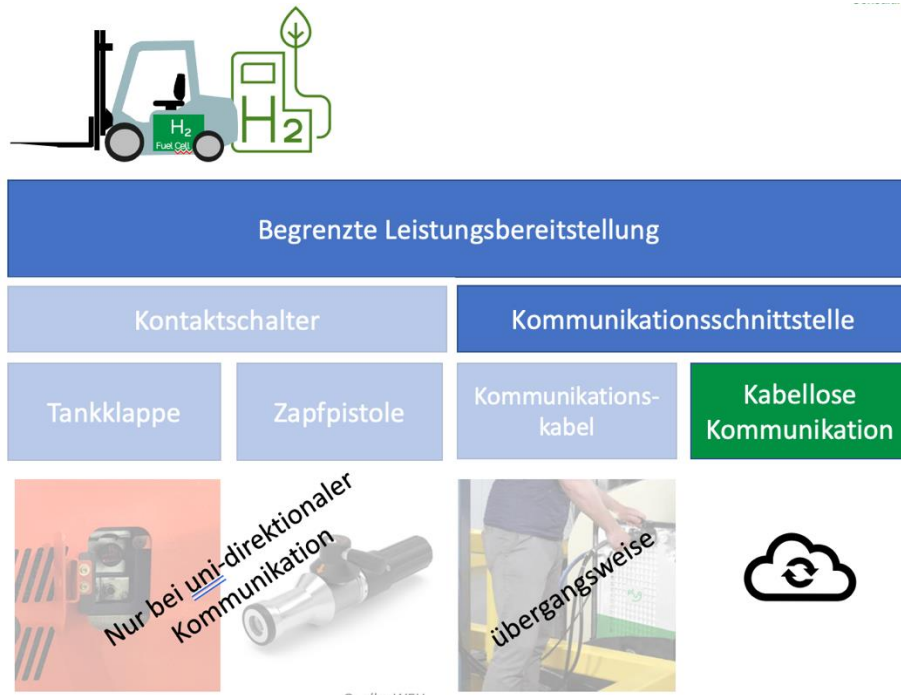


Abbildung 38: Möglichkeiten zur Aktivierung der Wegfahrsperrung

D.4. Betankungsprotokoll

D.4.1. Technische Randbedingungen

Die grundsätzlichen Randbedingungen hinsichtlich der vorhandenen Betankungsprotokolle sind bereits im Abschnitt B.8 Betankungsprotokoll beschrieben. Demnach umfassen die in den SAE-Normen abgebildeten Betankungsprotokolle nur bedingt die für die H₂-Betankung von Intralogistikfahrzeugen geltenden Voraussetzungen (insbesondere H₂-Behältervolumen). Dementsprechend werden die Fahrzeugflotten in der Praxis derzeit lediglich mit einer festen Druckrampe (z. B. 100 bar/min) betankt. Aufgrund der fehlenden Datenkommunikation ist eine Interoperabilität verschiedener BZS-Hersteller mit der Zapfsäule aktuell nicht bzw. nur erschwert möglich.

D.4.2. Fazit für Intralogistikanwendungen

In der Intralogistikanwendung von Wasserstoff-Betankungssystemen gibt es verschiedene Aspekte hinsichtlich der Betankungsprotokolle, die berücksichtigt werden müssen. Ein mögliches Vorgehen ist die Erstellung eigener Protokolle über mehrere Versuchsreihen, ähnlich dem Vorgehen der SAE, um die fehlenden Standards abzudecken. Dies würde eine Anpassung an die spezifischen Anforderungen der Intralogistikanwendung ermöglichen. Die entsprechenden Protokolle würden daraufhin in der Zapfsäule gespeichert und entsprechend den vorliegenden Randbedingungen zum Zeitpunkt der Betankung angewendet.

Alternativ zu den standardisierten Protokollen wird im Rahmen dieser Studie empfohlen, dass das jeweilige BZS die Betankungskurve (basierend auf Herstellererfahrung) an die Zapfsäule kommuniziert. Insbesondere durch unterschiedliche Behältervolumina, Druckstufen und Behältertypen sind die Randbedingungen der Betankung für jedes Brennstoffzellenmodell unterschiedlich. Hierbei kann die drahtlose Datenkommunikation, vorzugsweise Bluetooth, NFC oder Ultra-Wideband (UWB), eine wichtige Rolle spielen. Über eine reine Identifikation des BZS (z. B. mittels NFC-Tag) könnten die grundlegenden Spezifikationen des BZS von der Zapfsäule ausgelesen werden. Die Betankungskurve könnte entsprechend dem zu betankenden BZS individuell festgelegt werden.

Sofern darüber hinaus eine sicherheitsgerichtete drahtlose Datenkommunikation vorhanden ist, können vorherrschende Prozessbedingungen innerhalb der BZS kontinuierlich übermittelt werden. Dies ermöglicht eine standardisierte und konsistente Betankung der Fahrzeuge, wobei die notwendigen Sicherheitsaspekte berücksichtigt werden. Die Datenkommunikation und die Verwendung dieser Daten für die Regelung durch die Zapfsäule sind ein wesentlicher Faktor für die optimierte Betankung und ermöglichen eine präzise Anpassung des Betankungsvorgangs an die individuellen Bedürfnisse des Fahrzeugs bzw. des BZS.

D.5. Automatisierung

D.5.1. Technischen Randbedingungen

Im Kontext von H₂-Betankungsanlagen bezieht sich der Begriff „Automatisierung“ auf den Einsatz von technischen Systemen und Prozessen, um den Betankungsvorgang von Brennstoffzellenfahrzeugen weitgehend selbstständig und ohne menschliches Eingreifen durchzuführen. Die Automatisierung des Betankungsprozesses hat insbesondere für fahrerlose Transportsysteme eine hohe Relevanz, kann aber auch bei der Betankung personengeführter Fahrzeuge die Effizienz, Genauigkeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit der Betankung erhöhen.

Eine automatisierte Betankungsanlage umfasst verschiedene Komponenten und Funktionen, die in integrierten Systemen arbeiten. Zu den Schlüsselementen der Automatisierung gehören:

- Fahrzeugerkennung: Die Betankungsanlage muss in der Lage sein, das ankommende Fahrzeug zu identifizieren und zu verifizieren, ob es sich um ein Brennstoffzellenfahrzeug handelt, das für die Wasserstoffbetankung geeignet ist. Dies kann beispielsweise über RFID-Technologie oder andere Identifikationssysteme erfolgen.
- Automatische Kupplung: Um den Betankungsvorgang zu starten, müssen das Betankungssystem der Anlage und das Fahrzeug automatisch und sicher miteinander gekuppelt werden. Dies kann durch spezielle Kupplungsmechanismen und Sensoren erreicht werden, die eine korrekte Ausrichtung und Verbindung sicherstellen. Eine präzise Ausrichtung des Betankungsanschlusses in x-, y- und z-Richtung und vor allem der Winkelversatz zwischen dem Fahrzeug und dem Zapfpunkt ist entscheidend, um einen sicheren und effizienten Betankungsvorgang zu gewährleisten. Dies kann durch Kamerasysteme oder Sensoren unterstützt werden, die die Positionierung des Fahrzeugs und des Betankungsanschlusses überwachen.
- Kommunikation mit dem Fahrzeug: Die Betankungsanlage muss in der Lage sein, mit dem Fahrzeug/BZS zu kommunizieren, um wichtige Informationen auszutauschen, wie z. B. den aktuellen Füllstand des Wasserstofftanks, den Betriebszustand des Fahrzeugs und andere relevante Parameter. Dies ermöglicht eine individuelle Anpassung des Betankungsvorgangs an die spezifischen Anforderungen des Fahrzeugs.
- Wasserstoffbetankung: Die eigentliche Wasserstoffbetankung erfolgt automatisch, wobei die erforderliche Menge an Wasserstoff gemäß den Fahrzeugdaten und den Sicherheitsstandards dosiert wird. Die Durchflussrate und der Druck werden entsprechend gesteuert, um eine effiziente und sichere Betankung zu gewährleisten.
- Überwachung und Kontrolle: Während des gesamten Betankungsvorgangs werden verschiedene Parameter wie Druck, Temperatur und Füllstand überwacht, um potenzielle Probleme oder Abweichungen frühzeitig zu erkennen. Die automatisierte Betankungsanlage verfügt über ein Überwachungssystem, das die Prozessdaten erfasst und analysiert, um eine effiziente Betankung zu gewährleisten. Um die Sicherheit während des Betankungsvorgangs zu gewährleisten, müssen geeignete Sicherheitssysteme

implementiert werden. Dazu gehören beispielsweise Überwachungssysteme für Gasleckagen, Notabschaltvorrichtungen und Sicherheitsmechanismen, um die Betankung bei Abweichungen oder kritischen Bedingungen zu stoppen. Da insbesondere die Temperatur des Wasserstoffs in dem BZS einen Einfluss auf die Betankungseffizienz und -sicherheit hat, ist es wichtig, die Temperatur während des Betankungsvorgangs zu überwachen und gegebenenfalls den Betankungsmassenstrom anzupassen.

Durch die Automatisierung der Betankungsanlagen wird nicht nur die Geschwindigkeit und Effizienz des Betankungsvorgangs verbessert, sondern es werden auch menschliche Fehler minimiert. Die Einhaltung von Sicherheitsstandards und die Gewährleistung einer zuverlässigen Betankung stehen dabei im Mittelpunkt. Die Automatisierung ermöglicht es, den Betankungsvorgang nahtlos in andere logistische Prozesse zu integrieren, um eine effiziente Flottenbewegung zu gewährleisten.

D.5.2. Fazit für Intralogistikanwendungen

Die Automatisierung von H₂-Betankungsanlagen für fahrerlose oder personengeführte Intralogistikfahrzeuge bietet zahlreiche Vorteile und eröffnet neue Möglichkeiten für effiziente und sichere Betankungsprozesse mit Wasserstoff.

Um dies zu ermöglichen, ist die Reduzierung physischer Anschlüsse auf ein Minimum von großer Bedeutung. Dies kann durch die Integration von Potenzialausgleich, Wasserabsaugung, H₂-Befüllkupplung und NFC-Schnittstelle in einem Bauteil erreicht werden. Dadurch wird nicht nur der Betankungsvorgang vereinfacht, sondern es minimiert auch potenzielle Fehlerquellen und erhöht die Zuverlässigkeit des Systems.

Zusätzlich spielt die drahtlose Kommunikation eine entscheidende Rolle, wobei Technologien wie Bluetooth, NFC oder Ultra-Wideband (UWB) eingesetzt werden können, um eine zuverlässige Übertragung von Daten während des Betankungsvorgangs zu gewährleisten. Besonders die Verwendung von BLE/UWB bietet einen bedeutenden Vorteil bei der Automatisierung der Betankung durch die Fähigkeit zur präzisen Lokalisierung der Geräte. Dadurch können eine genaue Identifizierung und Kommunikation zwischen der Zapfsäule und dem Fahrzeug ermöglicht werden. Bereits vor dem eigentlichen Anschluss des Betankungsschlauchs können relevante Informationen, wie beispielsweise das H₂-Behältervolumen, die Druckstufe und die aktuelle H₂-Temperatur im H₂-Behälter, ausgetauscht werden, um den Betankungsprozess zu optimieren.

Über z. B. kameragestützte Sensorik sollte die Zapfpistole mit Hilfe von mehrachsigen Roboterarmen an das BZS ankoppeln. Nach Anschluss des Betankungsschlauchs ermöglicht eine integrierte NFC-Schnittstelle das Pairing des Brennstoffzellensystems (BZS) und der Zapfanlage. Dadurch können Sicherheitsschlüssel für den Betankungsprozess ausgetauscht werden, wodurch die bereits über BLE/UWB kommunizierenden Geräte verifiziert werden. Durch die begrenzte Reichweite von NFC sind insbesondere die sogenannten MITM-Angriffe praktisch nicht möglich, wodurch die Sicherheit der Betankung erhöht wird. Größere Datenmengen können anschließend über BLE oder UWB übertragen werden.

D.6. Bedieneinheit

Im Rahmen der Ausschreibung zu dieser Studie war zunächst die Bedieneinheit als möglicher Aspekt für die Betrachtung zur H₂-Betankung mitaufgeführt worden. Es stellte sich jedoch bereits am Anfang der Befragung unter den CIN-Teilnehmern heraus, dass der Bedieneinheit selbst keine entscheidende Rolle für den H₂-Betankungsprozess zugeordnet wird. Dennoch werden in diesem Abschnitt die Erkenntnisse zu der Bedieneinheit, die im Rahmen der Studie aufgenommen wurden, hier zusammengetragen.

Der überwiegende Teil der befragten Anwender erachtet es als sinnvolle Option, dass die Bedieneinheit des Brennstoffzellensystems ein vollintegrierter und fester Bestandteil des Flurförderzeugs sein sollte. Ein Drittel der Anwender wertet das sogar als unbedingt erforderlich. Auf Seiten der FFZ- und BZS-Hersteller wird die Integration der Bedieneinheit im Fahrzeug positiv eingestuft, wenn auch eher als eine sinnvolle Option nicht als „zwingend erforderlich“ (0%). Anzumerken ist, dass keiner der Befragten dieses als „nicht erforderlich“ eingestuft hat.

D.6.1. Technischen Randbedingungen

Die als Ersatzmodule entwickelten Brennstoffzellensysteme werden für Service- und Wartungsarbeiten meist aus dem Intralogistikfahrzeug entnommen und für die Dauer der Instandhaltung durch ein Ersatz-Brennstoffzellensystem ersetzt. Die einfache und schnelle Austauschbarkeit ist dabei eine wesentliche Eigenschaft, um die Verfügbarkeit der H₂-Intralogistikfahrzeuge auf einem hohen Niveau zu halten. Dieses impliziert auch die Anforderungen an die Bedieneinheit. Zum einen muss das Brennstoffzellensystem für Servicearbeiten auch dann betriebsfähig sein, wenn es nicht im Fahrzeug eingebaut ist. Zum anderen muss es möglich sein, die kabelgebundene Kommunikationsschnittstelle zwischen Brennstoffzellensystem und Fahrzeug einfach und sicher zu trennen.

Die aktuell am Markt eingesetzten wasserstoffbetriebenen Intralogistikfahrzeuge verfügen meist über getrennte Bedieneinheiten – eine festinstallierte Einheit im Fahrzeug und eine separate Bedieneinheit für das BZS, das entweder in der BZS integriert ist oder über ein Kabel zum Fahrerplatz verlegt wird. Die Bedieneinheiten der Flurförderzeuge sind in der Regel nicht für Meldungen von Brennstoffzellensystemen ausgelegt.

Für die Integration der Bedieneinheit müsste eine CAN-Bus-Schnittstelle bereitgestellt werden.

Auf Seite der Intralogistikfahrzeuge werden je nach Hersteller sehr unterschiedliche Anzeigen verwendet. Teilweise ließen sich vorhandene Anzeigen bei batteriebetriebenen Flurförderzeugen auch für Brennstoffzellensysteme verwenden, z. B. könnte die Anzeige des Batterieladezustands (SOC) auch für Füllstandsanzeige des Wasserstofftanks verwendet werden. Weitere Informationen, wie z. B. der H₂-Alarm müssten in die FFZ-Anzeigen aber noch integriert werden. Eine Herausforderung stellen deichselgeführten Lagertechnikgeräte da, die meist nur über eine eingeschränkte Anzeige (z. B. Ladezustand der Batterie und Betriebsstundenzähler) verfügen.

Die heute übliche, separate Bedieneinheit wird von einem Brennstoffzellensystem-Hersteller als Mindestanforderung angesehen, ansonsten wird sie von allen CIN-Mitgliedern als Lösung

toleriert. In den Gesprächen bestätigte sich klar die Erwartungshaltung, dass die Bedieneinheit zukünftig im Fahrzeug vollintegriert sein sollte.

Sowohl die Bedieneinheit des Brennstoffzellensystems als auch die des Intralogistikfahrzeugs verfügen über eigene Notaus-Schalter. Die Anwender fordern jedoch, dass die Notaus-Funktion des Brennstoffzellensystems ebenfalls durch den Notaus-Schalter des Flurförderzeugs aktiviert wird. Dieses vor dem Hintergrund, dass dem Staplerfahrer nicht zugemutet wird, in einer Gefahrensituation, die schnelles Handeln erfordert, zu entscheiden, welche Notausfunktion auszuführen ist. Daher sollte ein zentrale Notaus für Brennstoffzellensystem und Flurförderzeug existieren.

Zur Beantwortung der Frage, welche Informationen über das Brennstoffzellensystem. auf einer im Fahrzeug integrierten Bedieneinheit. erscheinen sollen, sind die Ergebnisse der Umfrage unter den CIN-Mitgliedern dienlich. In der Abbildung 39: Soll-Informationen auf der Bedieneinheit werden die Ergebnisse dieser Umfrage zusammengefasst.

Bei der Umfrage wurden sowohl gängige Meldungen und Funktionen auf heutigen Bedieneinheiten vorgegeben als auch die Möglichkeit gegeben, weitere Punkte zu ergänzen und zu bewerten. Die Funktionen und Meldungen konnten nach folgenden Kriterien bewertet werden:

- Zwingend erforderlich
- Notwendig
- Optional und
- Unnötig

In der Abbildung 39 sind die als „zwingend erforderlich“ oder „notwendig“ eingestuften Kriterien für die Bedieneinheit zusammengefasst worden. Interessant ist dieses mit den als „unnötig“ eingestuften Kriterien zu bewerten.

Als unnötig wurden folgende Punkte genannt:

- Starten- und Ausschalten des Brennstoffzellensystems (25%)
- Notausfunktion für das Brennstoffzellensystem (17%)
- Fehlermeldungen im Allgemeinen (25%)
- Fehlermeldung: BZS-Batterie SOC niedrig (25%)
- Konkrete Fehlermeldungen als Symbol (17%)
- Fehlermeldungen im Klartext (17%)
- Fehlermeldungen: „H₂-Leckage“, „Wartung“, „Störung“ und „Wasserstand“ (jeweils 17%)

Die Ergebnisse der Umfrage wurden mit den CIN-Mitgliedern anschließend diskutiert und weiter interpretiert. Hierbei wurde klar, dass insbesondere auf der Anwenderseite eine stärkere funktionale Integration des Brennstoffzellensystems mit dem Intralogistikfahrzeug erwünscht ist.

Soll-Informationen auf der Bedieneinheit

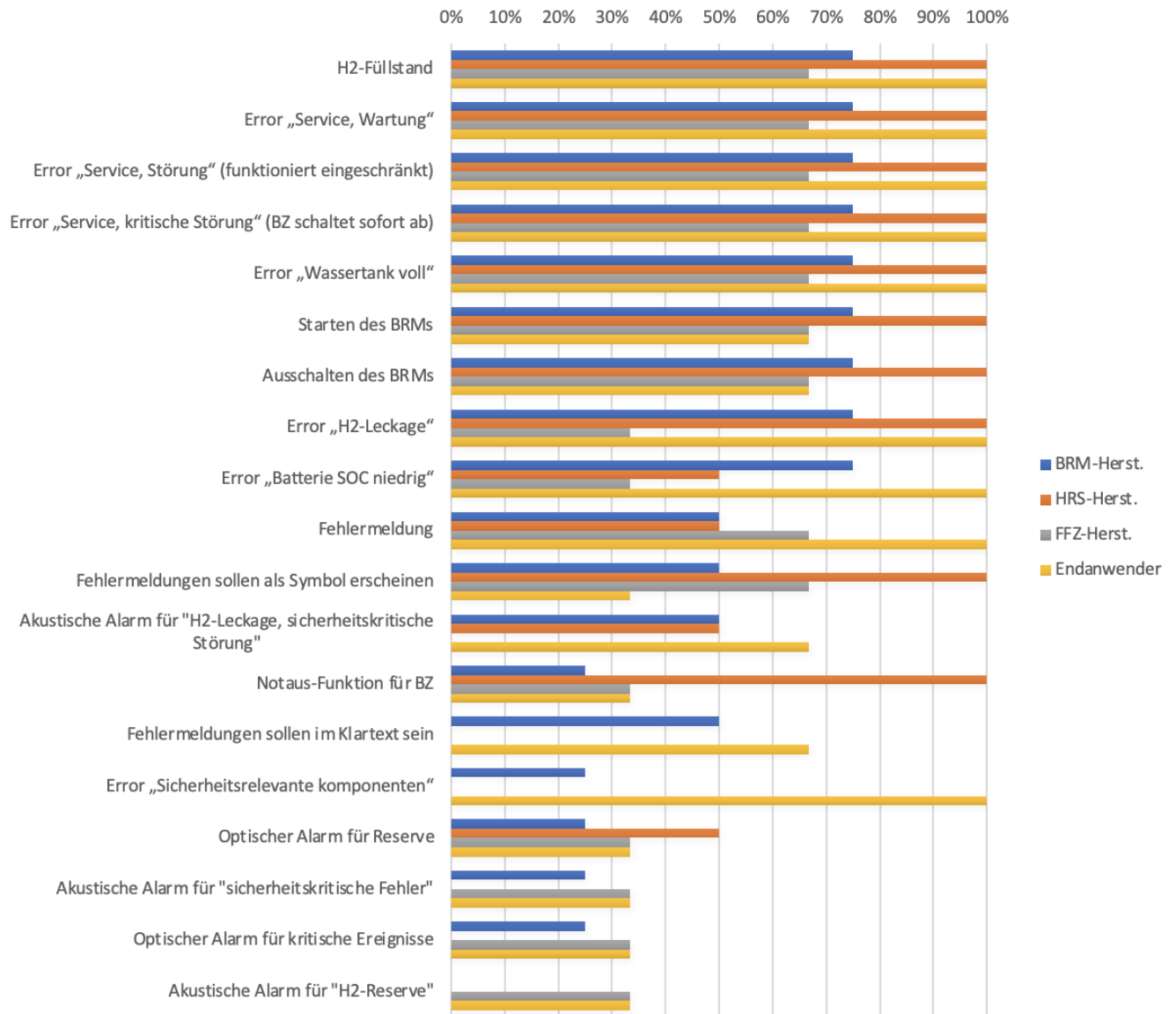


Abbildung 39: Soll-Informationen auf der Bedieneinheit

D.6.2. Fazit für Intralogistikanwendungen

Das Brennstoffzellensystem sollte über den Schlüsselschalter o. ä. des Flurförderzeugs gestartet und abgeschaltet werden. Ebenso sollte der Notaus-Schalter des Flurförderzeugs auch den Notaus des Brennstoffzellensystems aktivieren. Auch die Anzeigen zu den Betriebszuständen des Brennstoffzellensystems sollten Bestandteil des Anzeigenpanels des Fahrzeugs sein.

Zwei Drittel der Anwender legen das Hauptaugenmerk auf die Anzeige der Restreichweite in Betriebsstunde oder alternativ das Aufleuchten einer Reserveanzeige (33%), wenn die Reichweite weniger als eine Betriebsstunde beträgt.

Es wurden auch weitere für den Betankungsprozess relevante Informationen genannt, wie z. B. „Wegfahrsperre aktiv“, „H₂-Alarm“, „Tanktemperatur“ und „Verbindung zur Tankstelle“ genannt, die Anzeigen auf einer Bedieneinheit sind für den Betankungsvorgang selbst aber nicht relevant.

Der Wunsch, dass Fehlermeldungen im Klartext erfolgen sollten, ist nachvollziehbar, allerdings ist zu beachten, dass die Textmeldung dann in der jeweiligen Landessprache, in der das Brennstoffzellensystem im Einsatz ist, zu erfolgen hat (s. hierzu auch Abschnitt C.10.2). Es empfiehlt sich daher, anstelle von Textmeldungen verständliche Symbole zu verwenden.

Insbesondere bei den Fehlermeldungen gab es ein unterschiedliches Meinungsbild über den Umfang und den Detaillierungsgrad der Meldungen. Aus operativer Sicht ist es für den Fahrer entscheidend zu erfahren, ob die Fehlermeldung zu einem kritischen Zustand eine sofortige Reaktion erfordert und sich das Brennstoffzellensystem z. B. unmittelbar selbst abschaltet oder ob der Fehler unkritisch ist, im Sinne, dass das Fahrzeug betriebsbereit bleibt und die Werkstatt zeitnah aufgesucht werden sollte. Die Differenzierung zwischen kritischen und unkritischen Fehlermeldungen ist insbesondere für fahrerlose Transportsystem erforderlich, damit über den Leitstand der FTS entsprechende Maßnahmen koordiniert werden können.

Basierend auf der Umfrage und dem Austausch mit den CIN-Mitgliedern werden folgende Anzeigen für die Bedieneinheit empfohlen:

- a. H₂-Füllstandsanzeige,**
die mindestens in 10%-Schritten über den Füllstand des H₂-Fahrzeugtanks informiert
- b. H₂-Reserveanzeige,**
die mindestens optisch warnt, wenn die Restreichweite unter 1 Betriebsstunde fällt
- c. Service/Wartungsanzeige,**
die darüber informiert, dass die Brennstoffzelle noch zumindest eingeschränkt funktionsfähig ist, aber kurzfristig in die Werkstatt muss. Idealerweise gibt es zwei Leuchten für „Wartungsanzeige“ und „Service, Störung“
- d. Serviceanzeige „kritischer Fehler“,**
die darüber informiert, dass die Brennstoffzelle sofort abschaltet
- e. Serviceanzeige „H₂-Alarm“,**
die darüber informiert, dass das Brennstoffzellensystem das Austreten von Wasserstoff detektiert hat.
- f. Serviceanzeige „Wasser-Abscheidungstank voll“,**
die darüber informiert, dass der Sammelbehälter für Wasser geleert werden muss.
(wenn vorhanden)
- g. Serviceanzeige „Batterie, SOC niedrig“,**
die darüber informiert, dass der Batteriezwischenspeicher nur noch einen niedrigen Ladezustand hat. Dieses kann auch ein Indiz für eine temporäre Überbeanspruchung des Brennstoffzellensystems sein.

Je nach Fehler sollten die Meldungen auf der Anzeige durch optische und ggf. akustische Signale hervorgehoben werden, um auf kritische Zustände aufmerksam zu machen.

Hierfür wird folgendes Schema empfohlen:

Anzeige	Nur Anzeige	Optischer Alarm	Akustischer Alarm
H ₂ -Füllstandsanzeige	●		
H ₂ -Reserveanzeige		●	○
Wartungsanzeige	●	●	
Serviceanzeige	●	●	
Service, kritischer Fehler		●	●
H ₂ -Alarm		●	●
Wassertank voll		●	
Batterie, SOC niedrig		●	

Tabelle 6: Art der Warnmeldung auf der Bedieneinheit

D.7. Potenzialausgleich

D.7.1. Technischen Randbedingungen

Bei der Betankung mit Wasserstoff sind bestimmte Randbedingungen hinsichtlich des Potenzialausgleichs zu beachten, um die Sicherheit des Betankungsvorgangs zu gewährleisten. Der Potenzialausgleich spielt eine entscheidende Rolle bei der Vermeidung von Zündgefahren, die durch elektrostatische Aufladungen entstehen könnten.

Die gesamte Betankungsanlage muss ordnungsgemäß geerdet sein, um eine elektrostatische Aufladung zu verhindern. Dies umfasst nicht nur die Zapfsäule, sondern auch die Komponenten wie Schläuche, Kupplungen und Behälter, die mit dem Wasserstoff in Berührung kommen.

Des Weiteren ist es wichtig, dass der Betankungsprozess in einer Umgebung stattfindet, die elektrostatische Aufladungen minimiert. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz von ableitfähigen Materialien (oder auch die Kontrolle der Luftfeuchtigkeit) erreicht werden. So wird vermieden, dass sich elektrostatische Ladungen aufbauen, die potenziell zu Zündfunken führen könnten.

Ein weiterer Aspekt ist die Berücksichtigung des Fahrzeugs selbst. Es sollte über geeignete leitfähige Verbindungen verfügen, um eine sichere Ableitung von Ladungen zu gewährleisten. Dies kann durch spezielle Anschlüsse oder Kontakte realisiert werden, die einen Potenzialausgleich zwischen dem Fahrzeug und der Zapfanlage ermöglichen.

Zusätzlich ist es wichtig, dass das Personal, das mit der Betankung befasst ist, über entsprechende Schulungen und Kenntnisse verfügt, um die richtigen Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Dazu gehören beispielsweise das Tragen ableitfähiger Schutzkleidung und die Vermeidung von Reibungseffekten, die elektrostatische Aufladungen verursachen könnten.

Die Beachtung dieser Randbedingungen hinsichtlich des Potenzialausgleichs ist von großer Bedeutung, um die Sicherheit bei der Betankung mit Wasserstoff zu gewährleisten und potenzielle Gefahren zu minimieren. Durch eine sorgfältige Planung, die Einhaltung der Sicherheitsrichtlinien und die Schulung des Personals kann eine sichere und zuverlässige Betankung gewährleistet werden.

D.7.2. Fazit für Intralogistikanwendungen

In der ISO 12619-14 wird ein spezifischer elektrischer Widerstand für die Kraftstoffleitung bei Wasserstoffanwendungen vorgegeben. Gemäß der Norm sollte der elektrische Widerstand der Kraftstoffleitung einen Wert 1.000.000 Ohm pro Meter ($1 \text{ M}\Omega/\text{m}$) aufweisen.

Diese Anforderung zielt darauf ab, sicherzustellen, dass die Kraftstoffleitung eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit aufweist, um elektrostatische Aufladungen abzuleiten und die potenzielle Ansammlung von Ladungen zu verhindern. Ein niedriger elektrischer Widerstand ermöglicht eine effektive Ableitung von Ladungen, um Zündfunken zu vermeiden und die Sicherheit bei der Handhabung des Wasserstoffs zu gewährleisten.

Grundsätzlich wird im Hinblick auf die Standardisierung der H₂-Betankungsanlagen für Intra-logistikfahrzeugen empfohlen, den Potenzialausgleich über die Kraftstoffleitung zu ermöglichen.

Entsprechend dem Informationsaustausch mit der Firma. WEH wird bestätigt, dass die Füllkupplung bzw. Zapfpistole keine statische Elektrizität aufbauen kann und alle Bauteile elektrisch leitend miteinander verbunden sind. Ein Potenzialunterschied ist dahingehend auszuschließen, sofern die technische Ausführung des Befüllschlauchs gleichartig ist.

D.8. Kompatibilität

An Logistikstandorten werden Waren nicht nur gelagert, sondern auch umgeschlagen. So werden Güter von beispielsweise Nutzfahrzeugen und LKWs über den öffentlichen Straßenverkehr von anderen Logistikstandorten angeliefert (Extralogistik) und z. B. an Flurförderzeuge übergeben, die dann innerbetrieblich die Waren transportieren, einlagern und ggf. dem Produktionsprozess zuführen (Intralogistik). An einem Logistikstandort treffen verschiedene Fahrzeugtypen aufeinander. Dadurch können sich in der Form Synergien ergeben, dass eine gemeinsame Wasserstoffinfrastruktur für verschiedene Anwendungen zur Verfügung steht und das Verhältnis von Infrastrukturkosten zur Flottengröße somit optimiert wird.

Die Betrachtungen in diesem Abschnitt beziehen sich sowohl auf die innere Kompatibilität – zwischen unterschiedlichen Intralogistikfahrzeugen – als auch auf die externe Kompatibilität zu angrenzenden Anwendungen wie z. B. Fahrzeugen für die Extralogistik.

D.8.1. Technischen Randbedingungen

D.8.1.1. Innere Kompatibilität

Die innere Kompatibilität steht hier im Vordergrund und ist Kern der Untersuchung für die Standardisierung der H₂-Infrastruktur für Intralogistikanwendungen. Aufgrund der kurzen Betankungszeit kann im Verhältnis ein Dispenser zu ca. 100 Flurförderzeuge mit Wasserstoff versorgen. Das Ziel ist daher, dass die Wasserstoffabgabe über die Dispenser hersteller- und modellübergreifend von allen Intralogistikfahrzeugen bzw. Brennstoffzellensystemen genutzt werden kann. Hierfür ist eine Kompatibilität aller für die Betankung notwendigen Schnittstellen erforderlich. Es ist empfehlenswert, hierfür einen einheitlichen Industriestandard für H₂-Intralogistikfahrzeuge zu etablieren. Die z. T. noch bestehenden Varianten sollten Übergangsweise aber zumindest an jedem Einsatzort einheitlich gelöst werden. Im Folgenden wird auf die Kompatibilität der einzelnen Schnittstellen konkret eingegangen.

Betankungsanschlüsse

Bei den Intralogistikfahrzeugen hat sich die 350bar-Betankung etabliert. Die 250 bar-Betankung in diesem Anwendungsbereich, die vor einigen Jahren z. B. noch von Fronius verwendet wurde, wird von aktuellen Brennstoffzellensystem-Herstellern nicht mehr angeboten, und auch aus den operativen Einsätzen in Europa sind die 250bar-Brennstoffzellensysteme mittlerweile verschwunden. Die in den Normen SAE J2600 und ISO 17268 beschriebenen H35-Füllkupplungen und -Tankstutzen sind standardisierte Bauteile. Die herstellerübergreifende Kompatibilität ist daher sichergestellt.

Potenzialausgleich

Wie im Abschnitt B.3-Potenzialausgleich beschrieben, wird der Potenzialausgleich aktuell an den verschiedenen Einsatzorten noch unterschiedlich gelöst, und zwar über

- a. das Datenkommunikationskabel
- b. eine Klemme, die am Fahrzeug oder dem Brennstoffzellensystem befestigt wird
- c. die Ableitung über Fahrzeug und Erdungsbander
- d. die Ableitung über Fahrzeug und leitfähiger Bereifung

Kommunikationsschnittstelle und Betankungsprotokoll

Die Kommunikation zwischen Brennstoffzellensystem und Dispenser ist aktuell sehr unterschiedlich an den verschiedenen Einsatzorten gelöst. Im Abschnitt B.7 - Daten- und Kommunikationsschnittstelle wurde auf die unterschiedlichen Lösungen bereits detailliert eingegangen. Dieses stellt die größte Herausforderung bei der Standardisierung da. In diesem Aspekt kann die Interoperabilität aktuell nur individuell an jedem Einsatzort gelöst werden. Plug Power bietet hier zwar das Datenkommunikationskabel als eigene Standardlösung an. Die Kommunikation zwischen Brennstoffzellensystemen anderer Hersteller mit den Plug Power GenFuel-Dispenser ist aber von Haus aus nicht möglich.

Eine Kommunikationsschnittstelle ist prinzipiell nicht zwingend erforderlich, würde aber für das Betankungsprotokoll und eine schnelle Betankungsgeschwindigkeit deutliche Verbesserungen bringen. Bezogen auf die Interoperabilität kann auf eine Kommunikationsschnittstelle zwischen Brennstoffzellensystem und Dispenser verzichtet werden. Hierfür ist es dann allerdings erforderlich, dass der Dispenser entsprechend auf die konservativste Druckrampe vor eingestellt wird, die für den Kreis, der von ihm zu betankenden Brennstoffzellensysteme unter Worst-Case-Annahmen, in Frage kommt. Der Dispenser ist somit nur eingeschränkt für die vordefinierten Brennstoffzellensysteme nutzbar.

Wasserabsaugung

Den größten Anteil bei den meisten Intralogistikflotten haben 24V-Brennstoffzellensysteme, die keine Wasserabsaugung benötigen. Die Wasserabsaugung wird nur von den leistungsstärkeren Brennstoffzellensysteme benötigt, die in der Regel aber im Flottenmix der Anwender vorkommen. In Europa werden aktuell solche Brennstoffzellensysteme nur von zwei Herstellern angeboten, die beide den gleichen Stecknippel (Typ: Rectus 25SBTS10MVN von Parker Hannifin) verwenden. Dispenserseitig sollte das entsprechende beschriebene Gegenstück der Schnellverschlusskupplung mit Schlauchanschluss verwendet werden, das mit den Rectus 25 NW 7.8-Kupplung kompatibel ist.

Die Art der Pumpe für die Wasserabsaugung, spielt für die Kompatibilität keine entscheidende Rolle.

Positionierung der Betankungsschnittstelle

Die Positionierung der Betankungsschnittstellen am Brennstoffzellensystem spielt vor allem für die Flurförderzeug-Hersteller eine wesentliche Rolle, da an den Fahrzeugmodellen entsprechende Aussparungen vorgesehen bzw. Tankklappen integriert werden müssen. Auch die Position der Lüftungsschlitze für das Ansaugen der Umgebungsluft (O₂), als auch das Abführen der Wärme muss zwischen dem Brennstoffzellensystem- und dem Flurförderzeug-Hersteller abgestimmt werden.

Mit der Einführung neuer Modelle und der Entwicklung des Wettbewerbs auf Seiten der Brennstoffzellensystem-Hersteller entsteht hier eine neue Herausforderung. So ist ein H₂-Intralogistikfahrzeug heute für ein ganz bestimmtes Brennstoffzellensystem-Modell vorbereitet. Ein vergleichbares Modell eines anderen BZS-Herstellers wäre so nicht unbedingt kompatibel zu diesem Fahrzeug. So müssten unterschiedliche Anpassungen bzw. Optionen seitens der FFZ-Hersteller angeboten werden, um für jeden BZS-Hersteller eine passende fahrzeugseitige Vorbereitung anzubieten.



Abbildung 40: Positionierung der Betankungsschnittstellen am Fahrzeug

D.8.1.2. Äußere Kompatibilität

Die in der Normen SAE J2600 und ISO 17267 definierten Betankungskupplungen kommen auch bei anderen Anwendungen zum Einsatz, so auch bei Nutzfahrzeugen und LKWs, die zu den Extralogistikfahrzeugen zählen. Wie bereits in den Abschnitten 0 und C.4 beschrieben sind diese Betankungskupplungen abwärts kompatibel, so dass die H35-Füllkupplung eines 350 bar Dispensers auch auf den H70-Tankstutzen eines Nutzfahrzeugs mit 700bar Technologie passt. Bei einer Betankung eines 700bar-Fahrzeugs mit 350 bar-Dispenser, würde der Fahrzeugtank nicht bis zum maximalen Betriebsdruck, sondern nur etwa „halbvoll“ betankt werden. Dennoch können sich durch die Teilbetankung Vorteile für Logistikstandorte ergeben,

Die H35-Kupplungen sind hingegen nicht kompatibel mit den H35HF-Betankungskupplungen, die z. B. bei Bussen verwendet werden, die aufgrund der deutlichen größeren Tankvolumina mit höheren Volumenströmen betankt werden.

Allerdings sind an den heutigen H₂-Dispensern für Intralogistikanwendungen weder eine Kommunikationsschnittstelle noch ein Potenzialausgleich für andere Anwendungen vorgesehen. Ob ein Nutzfahrzeug somit an dem Intralogistikfahrzeug betankt werden darf, muss vorher mit den Herstellern geklärt werden.

Eine Betankung eines Flurförderzeugs mit 350bar-Tank an einem 700 bar-Dispenser ist nicht möglich.

D.8.2. Fazit für Intralogistikanwendungen

Die in Abschnitt D.7.2 beschriebene Empfehlung, den Potenzialausgleich zukünftig über die Kraftstoffleitung durchzuführen, ist aktuell an keinem europäischen Einsatz mit Intralogistikfahrzeugen realisiert, verspricht aber für eine zukünftige Standardisierung die sinnvollste Variante zu sein, da dieses auch bei Straßenfahrzeugen heute bereits so realisiert und somit Stand der Technik ist.

Die Gespräche mit den BZS- und FFZ-Herstellern zur Positionierung der Betankungsschnittstellen haben deutlich gemacht, dass eine Standardisierung in diesem Punkt weitergedacht sein muss und es keine einheitliche Lösung für alle Brennstoffzellensysteme geben kann. Lediglich die Abmessung des Bereichs, in dem sich die Schnittstellen für die H₂-Betankung befinden könnten, wäre zu standardisieren. Hinsichtlich der Positionierung der Betankungsschnittstellen stellen 24V-, 48V- und 80V-Systeme unterschiedliche Anforderungen. In diesem Zusammenhang kam von einigen CIN-Mitgliedern die Anregung, ebenfalls die mögliche Positionierung der Lüftungsschlitze festzulegen. Es wird empfohlen analog zu den DIN-Batterietrögen für die verschiedenen Leistungs- und Spannungsklassen der Brennstoffzellensysteme passende Designanforderungen festzulegen, die zwischen den BZS- und FFZ-Herstellern abgestimmt werden sollten.

Eine weitere Frage ist, von welcher Seite aus betankt werden sollte. Anders als bei Straßenfahrzeugen und öffentlichen Zapfsäulen, die meist auf einer Insel stehen, die von beiden Seiten angefahren werden kann, sind die Dispenser bei Intralogistikanwendungen meist so positioniert, dass diese nur von einer Seite angefahren werden können. Da bei den klassischen Gegengewichtsstapler die Aufstiegsseite für den Fahrer auf der in Fahrtrichtung linken Seite liegt, wird empfohlen, die linke Seite als Betankungsseite festzulegen. Dies hat den Vorteil, dass die Wege beim Betankungsprozess für den Fahrer möglichst kurzgehalten werden und vermieden wird, dass der Fahrer um den Stapler herumlaufen muss und dabei ggf. in den Verkehrsweg tritt.

Es gibt allerdings auch Situationen, bei denen die linke Seite als Betankungsseite nicht ideal ist, beispielsweise bei Gegenverkehren, wenn die Fahrbahn gekreuzt werden muss. Daher soll die linke Betankungsseite nur eine Empfehlung bleiben und beide Seiten sollten zulässig bleiben.

Bei heutigen Anwendungen sind die Schnittstellen meist je Einsatzort einheitlich gelöst und die Kompatibilität wird vor Ort über Individuallösungen realisiert. Dieses erfordert allerdings höheren Planungsaufwand und hat oft höhere Kosten durch Sonderlösungen zur Folge. Auch die Interoperabilität für die Betankung von z. B. Nutzfahrzeugen wird dadurch erschwert, da z. B. ein Potenzialausgleich über die Kraftstoffleitung bei den Intralogistik-Dispensern nicht vorhanden ist.

Es wird empfohlen, die heutigen Schnittstellen, so wie sie heute ausgestaltet sind übergangsweise beizubehalten und einsatzortspezifisch einheitlich festzulegen. Der in dieser Ausarbeitung beschriebene Soll-Zustand für eine Standardisierung der H₂-Infrastruktur für Intralogistikanwendung kann auch parallel zu vorhandenen Installationen am Einsatzort implementiert werden. Hierfür wären Anpassungen an den Dispensern vor Ort notwendig. Neue H₂-Intralogistikfahrzeuge könnten dann z. B. von einer schnelleren Betankung profitieren, während die bereits im Einsatz befindlichen Fahrzeuge dann noch mit einer konservativen Druckrampe betankt würden und ggf. zusätzlich geerdet werden müssten.

E. Beschreibung des empfohlenen Soll-Standards für Intralogistikanwendungen

E.1. Vorbemerkungen

Im Folgenden wird eine Empfehlung für den Soll-Standard beschrieben, die als Grundlage die gewonnenen Erkenntnisse aus der Befragung der CIN-Mitglieder, Gesprächen mit CIN-nahen Unternehmen, sowie den im Rahmen der Ausarbeitung als relevant eingestuften Normen verwenden. Die Empfehlung basiert zudem auf den technischen Randbedingungen, die im Abschnitt C.12.1 bereits detailliert beschrieben wurden und definiert die entsprechende Auslegung, Sicherheit und die betrieblichen Eigenschaften für die Betankung von Intralogistikfahrzeugen mit gasförmigem Wasserstoff.

Der Anwendungsbereich des hier vorgeschlagen Standards bezieht sich auf die H₂-Betankung von Intralogistikfahrzeugen mit gasförmigem Wasserstoff und einem Betriebsdruck von 350 bar im Innen- als auch Außenbereich. Zusätzlich wird empfohlen, den Anwendungsbereich des Soll-Standards auf Fahrzeugtankgrößen bzw. die Größe des im Brennstoffzellensystems integrieren H₂-Tanks auf ein Fassungsvermögen von z. B. 5 kg Wasserstoff zu beschränken, um nicht mit den Anforderungen aus Normen für andere deutlich größere Industriefahrzeuge in Konflikt zu geraten. Der empfohlene Soll-Standard zielt ebenso darauf ab, für zukünftige Intralogistikfahrzeuge mit fest verbauten bzw. vollintegrierten Brennstoffzellensystemen herangezogen zu werden.

Betankungsanschlüsse für andere gasförmige Brennstoffe oder Brennstoffgemische, wie u. a. Wasserstoff-Erdgas-Gemische, sind von diesem Standard ausgeschlossen.

E.2. Drahtlose Kommunikation

Als wesentlicher Bestandteil für eine prozessoptimierte, ungekühlte und schnelle Betankung von wasserstoffbetriebenen Intralogistikfahrzeugen wird empfohlen, eine sicherheitsgerichtete und drahtlose Datenkommunikation zwischen dem Brennstoffzellensystem und dem Dispenser zu implementieren, die dem im Abschnitt D.1.7.4 beschriebenen Modellansatz 4 entspricht.

Das Ziel ist es, dass der Bediener bzw. Fahrer zum Betanken des Intralogistikfahrzeugs nur die H₂-Füllkupplung und falls erforderlich den Entwässerungsschlauch ankuppeln muss, bevor er den Betankungsvorgang am Dispenser startet.

Hierfür ist es erforderlich, dass sowohl der Dispenser als auch die Brennstoffzellensysteme mit entsprechenden Funkmodulen ausgestattet werden.

Der kontinuierliche Datenaustausch zwischen BZS und H₂-Dispenser während des Betankungsprozesses mit einer sicherheitsgerichteten Datenerfassung und -verwendung ermöglicht so eine variable, durch In-situ-Messungen gesteuerte Betankung. Das BZS-Funkmodul sollte mit dem Brennstoffzellensystems fest verbunden sein, beispielsweise durch Verschraubungen. Damit soll sichergestellt sein, dass es beim servicebedingten Austausch des Brennstoffzellensystems nicht zu Verwechslungen kommen kann.

Im Rahmen dieser Studie wurde darüber hinaus diskutiert, ob die Übermittlung des Einsatzbereiches des Flurförderzeugs einen Einfluss auf die Betankung haben soll. Hintergrund dieser Fragestellung ist, dass das Brennstoffzellensystem bei geringeren Temperaturen im H₂-Tank (VSS) theoretisch schneller betankt werden könnte bzw. höhere Betankungsdrücke zugelassen werden könnten und somit die Verfügbarkeit und Reichweite der Fahrzeuge verbessert werden könnten. Zusätzlich zu der IST-Temperatur im H₂-Tank könnte der nach der Betankung geplante Einsatzbereich, wie z. B. Außeneinsatz im Winter oder Einsatz im Tiefkühlager („TK-Bereich“) bei z. B. -30°C, hier für die Betankung weiter positiv genutzt werden. Da der geplante Einsatzort des FFZ nach der Betankung allerdings nicht sicher gewährleistet werden kann (z. B. durch Unfall des Fahrzeugs, ungeplante Routen-Unterbrechung des Fahrers u. ä.) sollte dies nicht weiter berücksichtigt werden.

E.3. Konstruktive Anforderungen an die Systeme

Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln, ergeben sich konstruktive und technische Anforderungen an die H₂-Infrastruktur sowie die Brennstoffzellensysteme. In der folgenden Tabelle sind die wesentlichen Aspekte zusammengefasst. Es sei an dieser Stelle anzumerken, dass diese Anforderungen sich ausschließlich auf die Kompatibilität der erforderlichen Schnittstellen für die H₂-Betankung von Intralogistikfahrzeugen beziehen.

Aspekt	Brennstoffzellensystem	H ₂ -Dispenser
Sensorik	Der im Brennstoffzellensystem verbaute H ₂ -Tank muss über eine sicherheitsgerichtete Temperaturerfassung verfügen.	Die im Dispenser verbauten Sensoren müssen Signale sicherheitsgerichtet erfassen. Folgende Sensoren sind erforderliche: <ul style="list-style-type: none"> • Drucksensor in der Kraftstoffleitung • Umgebungstemperatursensor Die Sensoren sind gem. der in SAE J-2601-3 beschriebenen Methode „Fill to target pressure with variable flow rate“ anzuordnen.
Ventile	Der H ₂ -Tank im Brennstoffzellensystem muss über ein thermisches Sicherheitsventil (TPRD) nach ISO 19882 verfügen	<ul style="list-style-type: none"> • Überdrucksicherung (max. Auslösewert: 483 bar bzw. 1,38*NWP) • Regelventil mit veränderbarem Querschnitt • Automatisches Absperrventil Die Ventile sind gem. der in SAE J-2601-3 beschriebenen Methode „Fill to target pressure with variable flow rate“ anzuordnen.
Betankungs-kupplungen	Tankstutzen gem. der Druckklasse H35 , SAE J2600 bzw. ISO 17268. Der Tankstutzen muss mit einem entsprechenden NFC-Tag ausgestattet sein.	Füllkupplung gem. der Druckklasse H35 , SAE J2600 bzw. ISO 17268. Die Füllkupplung muss mit einem entsprechenden NFC-Reader ausgestattet sein.

Tabelle 7: Technische Anforderungen an Dispenser und Brennstoffzellensystem – Teil 1

Aspekt	Brennstoffzellensystem	H ₂ -Dispenser
Potenzialausgleich	<p>Ein Potenzialausgleich muss sichergestellt werden zu folgenden Schnittstellen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Über den Tankstutzen zur Füllkupplung (Dispenser) • Am Gehäuse oder Boden des BZS für den Potenzialausgleich mit dem Intralogistikfahrzeug. 	<p>Die Kraftstoffleitung muss über einen Widerstand von min. 1 MΩ /m verfügen, um Potenzialunterschiede zwischen Brennstoffzellensystem über die Füllkupplung zum Dispenser ableiten können.</p>
Wasserabsaugung (je nach BZS)	<p>Es wird empfohlen eine Schnellverschlusskupplung gem. eines ISO-Standards o.ä, festzulegen. Die Mindestanforderung sollte ein Durchfluss von 5,4 l/min sein.</p> <p>Als Referenz kann der aktuell weit verbreitete</p> <p>Stecknippel Typ: Rectus 25SBTS10MVN oder ein mit der mit der Kupplung Rectus 25KBTF13BVN kompatibles Modell angenommen werden.</p> <p>Über die drahtlose Kommunikation sollte der Füllstand des Wassertanks an den Dispenser übermittelt werden. Die notwendige Dauer der Wasserabsaugung kann über die initiale BZS-Identifikation durch den Dispenser eigenständig bestimmt werden.</p>	<p>Es wird empfohlen eine Schnellverschlusskupplung gem. eines ISO-Standards o.ä, festzulegen. Die Mindestanforderung sollte ein Durchfluss von 5,4 l/min sein.</p> <p>Als Referenz kann der aktuell weit verbreitete</p> <p>Kupplung Typ: Rectus 25KBTF13BVN oder ein mit dem Stecknippel Typ Rectus 25SBTS10MVN kompatibles Modell angenommen werden.</p> <p>Der Wasserschlauch zur Absaugung des Wasser-Abscheidungstanks sollte als Vakuumschlauch ausgeführt sein.</p> <p>Sofern der Dispenser im Außenbereich steht, wird eine elektrische Begleitheizung des Schlauches notwendig sein, wenn ein vollständiges Entleeren des Schlauches nach dem Betankungsvorgang technisch nicht umsetzbar ist. Die Förderhöhe sowie der Typ der Absaugpumpe sollte grundsätzlich mehrere Varianten zulassen, um die am Einsatzort spezifischen Anforderungen individuell abzudecken.</p>
Wegfahrsperr und Abreißsicherung	<p>Die Wegfahrsperr sollte durch eine erfolgreiche Verbindung zwischen H₂-Füllkupplung und Tankstutzen bzw. einer erfolgreichen NFC-Kopplung aktiviert werden.</p>	<p>Am Dispenser muss eine Schlauch-Abreißsicherung vorhanden sein.</p>

Tabelle 8: Technische Anforderungen an Dispenser und Brennstoffzellensystem - Teil 2

Aspekt	Brennstoffzellensystem	H ₂ -Dispenser
Positionierung der Betankungsschnittstellen	<p>Die für die Betankung relevanten Schnittstellen sollen in einem fest definierten Bereich („Panel“) der Abmessungen 15 x 10 cm (B x H) angeordnet sein.</p> <p>Die Position des Panels soll sich nach standardisierten Vorgaben richten, die je nach BZS-Klasse die Abmessungen vorgibt (vgl.D.8.1.1- Innere Kompatibilität)</p> <p>Das Betankungspanel soll sich in Fahrtrichtung links vom Flurförderzeug befinden. Die Positionierung auf der rechten Seite oder nach hinten soll statthaft bleiben, wenn anwendungstechnische Anforderungen dieses erfordern.</p>	<p>Der Dispenser soll so positioniert werden, dass das Fahrzeug von links betankt werden kann. Wenn örtliche oder anwendungstechnische Bedingungen es erfordern, darf das Fahrzeug auch von der rechten Seite betankt werde.</p>
Betankungsprotokoll	<p>Nach erfolgreicher Verbindung der Datenkommunikation sollte das BZS die herstellerseitigen Vorgaben hinsichtlich der Betankungsrampe an den Dispenser übermitteln.</p> <p>Die Software und zugehörige Hardware muss entsprechend der unter „Regelkreise und Sicherheitsregelung im Absatz C.12.2 - Übertragung auf Intralogistikanwendungen genannten Normen bewertet werden.</p>	<p>Die empfangenen Betankungskurven werden verwendet, um die Regelung der Betankung über geeignete Sensorik im Dispenser und BZS durchzuführen. Etwaige unzulässige Betriebszustände führen weiterhin vom Dispenser aus gesteuert zum Abbruch des Betankungsvorgangs.</p>
Automatisierung	<p>Durch die Integration von Potenzialausgleich, ggf. Wasserabsaugung, H₂-Befüllkupplung und NFC-Schnittstelle in einem Bauteil werden physische Anschlüsse reduziert, was die Zuverlässigkeit erhöht und Fehlerquellen minimiert. Drahtlose Kommunikation, unter Einsatz von Technologien wie Bluetooth, NFC oder Ultra-Wideband, ist entscheidend für eine sichere Datenübertragung und zukünftige Automatisierung des Betankungsprozesses. Insbesondere die Verwendung von BLE/UWB erlaubt präzise Gerätelokalisierung, was eine genaue Identifizierung und Kommunikation zwischen Zapfsäule und Fahrzeug bereits vor Beginn des Betankungsprozesses ermöglicht. Kameragestützte Sensorik kann darüber hinaus mit Hilfe von Roboterarmen die Zapfpistole an das Brennstoffzellensystem ankoppeln.</p>	

Tabelle 9: Technische Anforderungen an Dispenser und Brennstoffzellensystem - Teil 3

E.3.1. Datenübertragung zwischen Brennstoffzellensystem und Dispenser

Daten	Beschreibung	Mindestanforderung	Standard	Optional
Fahrzeugtank: Typ	Tanktyp I, II, III oder IV gem. ISO-Norm	●	●	
Fahrzeugtank: Temperatur	Temperatur im Fahrzeugtank		●	
Fahrzeugtank: Druck	Druck im Fahrzeugtank	●	●	
Fahrzeugtank: Volumen	Nennvolumen des Fahrzeugtanks			○
BZS: Betankungskurve	Betankungskurve, die der Fahrzeugtank an den Dispenser übermittelt		●	
BZS: BZS-ID	Eindeutige Identifikationsnummer des Brennstoffzellensystems (z. B. Hersteller-Code und Seriennummer)			○
BZS: Fehlermeldung	Definierter Fehlercode des BZS			○
BZS: Abbruchsignal	Abbruchsignal des BZS zum Abbruch der H ₂ -Betankung		●	
BZS: SOC-Batterie	Aktueller Ladezustand des Batterie-Pufferspeichers im BZS			○
FFZ: FFZ-ID	Eindeutige Identifikationsnummer des Flurförderzeugs (z. B. Hersteller-Code und Seriennummer)			○
FFZ: Fehlermeldung	Definierter Fehlercode des FFZ			○
Dispenser: Betankungs-Datum	Kalendarisches Datum der Betankung			○
Dispenser: Betankungs-Uhrzeit	Kalendarische Uhrzeit der Betankung			○
Dispenser: Betankungs-Dauer	Dauer des Betankungsvorgangs, z.B. vom Anschluss bis zum Abkuppeln der Zapfpistole			○
Dispenser: Befüllmenge (H ₂)	Masse in kg, die während des Betankungsvorgangs vom Dispenser an das BZS abgegeben wurde			○
Sonstiges: Fahrer-ID	Eindeutige Identifikationsnummer des FFZ-Fahrers (z. B. Personalnummer)			○

Tabelle 10: Datenaustausch zwischen Brennstoffzellensystemen und Dispenser

Für bereits in Betrieb befindliche Anlagen soll insofern eine angemessene Übergangsfrist von z. B. fünf Jahren gelten, als dass die Mindestanforderung bei der Betankung ohne Kommunikation als erfüllt gilt, wenn der Zugang zu dem Dispenser organisatorisch für einen bestimmten Kreis von Brennstoffzellensystemen beschränkt wird und der Dispenser so voreingestellt ist, dass alle zugangsberechtigten Brennstoffzellensysteme ausschließlich mit der gleichen Druckrampe betankt werden (s. Modell 1 und Modell 2). Die Druckrampe ist im Vorfeld durch Probebetankungen vom HRS-Hersteller oder einer von ihm autorisierten Person zu ermitteln. Dabei sind folgende Grenzparameter einzuhalten:

- Maximaler Betankungsdruck = maximaler Betriebsdruck
- Max. zulässige Temperatur während der Betankung = 85°C
- Max. zulässiger Volumenstrom: 10 g/sek

F. Beschreibung des Prozesses zur Überführung in einen ISO-Standard

F.1. Koordination nationaler und internationaler Normungsarbeit

Die Normungsarbeit bei nationalen, europäischen und internationalen Normungsorganisationen folgt in der Regel einem strukturierten Prozess.

Der Normungsbedarf kann auf verschiedene Weisen und durch verschiedene Parteien identifiziert werden und den Normungsgremien als neue Normungsprojekt vorgeschlagen werden. Anfragen für neue internationale Normen werden oft von nationalen Normungsorganisationen, Industrieverbänden oder Regierungen eingereicht, können aber auch von Regierungen, Verbrauchern oder anderen Interessengruppen kommen.

Sobald die grundlegende Normungsidee definiert ist, geht es im ersten Schritt darum, den Normungsbedarf in die Normungsorganisationen zu tragen und dort den Normungsexperten vorzustellen. Hierbei ist es erforderlich darzulegen, warum diese Norm gebraucht wird und warum ggf. bereits existierende Normen zu dem Thema nicht ausreichen.

Auch sollten betrachtet werden, ob der Normungsbedarf eher national, europäisch oder international ausgerichtet ist und der geeigneten Normungsorganisation vorgetragen werden.

Die Normungsorganisationen erstellen dann Arbeitsprogramme, in denen festgelegt wird, an welchen Normen gearbeitet werden soll. Die Entscheidung, welche Normen tatsächlich entwickelt werden, basiert oft auf technischen, wirtschaftlichen oder sozialen Bedürfnissen.

Erst dann werden Technische Komitees oder Arbeitsgruppen innerhalb der technischen Komitees gebildet, um an spezifischen Normen zu arbeiten. Hierzu werden Experten aus Industrie, Forschungseinrichtungen, Verbraucherorganisationen und Regierungsstellen in diese Gremien berufen.

Die nationalen und internationalen Normungsorganisationen tauschen sich ggf. untereinander aus. So koordinieren nationale Normungsorganisationen die Arbeit zwar auf nationaler Ebene, können aber auch nationale Spiegelgremien für internationale Gremien bilden.

Internationale Normungsorganisationen, wie die International Organization for Standardization (ISO) oder das European Committee for Standardization (CEN), koordinieren die Normungsaktivitäten auf internationaler Ebene.

Insbesondere die internationalen Normungsorganisationen arbeiten eng zusammen, um Doppelnormungen zu vermeiden. Wenn bereits existierende Normen den Bedarf abdecken, werden diese oft übernommen oder ggf. aktualisiert, um Redundanzen zu vermeiden.

Sobald ein Normenentwurf verfasst ist, können in der Kommentierungsphasen verschiedene Interessengruppen Ihre Kommentare und Rückmeldungen geben, dabei gilt das Konsensprinzip. Erst wenn der Normenentwurf im Konsens mit den beteiligten Parteien entwickelt wurde, erfolgt die Verabschiedung und Veröffentlichung der neuen Norm.

Es ist wichtig zu beachten, dass dieser Prozess in den verschiedenen Normungsorganisationen variieren kann. Die Beteiligung von Experten und Interessengruppen sowie der Konsensbildung sind jedoch allgemeine Prinzipien, die in der Normungsarbeit gelten.

F.2. ISO - International Organization for Standardization

Die *International Organization for Standardization* – kurz: ISO - ist eine unabhängige, nicht-staatliche internationale Organisation, deren Zentralsekretariat sich in Genf (Schweiz) befindet.

Über ihre Mitglieder bringt die ISO-Experten zusammen, um Wissen auszutauschen und freiwillige, konsensbasierte, marktrelevante internationale Normen zu entwickeln, die Innovationen fördern und Lösungen für globale Herausforderungen bieten. Aktuell gehören 168 nationale Normungsorganisationen der ISO an.⁸³

Die ISO hat Expertengruppen zusammengestellt, die die verschiedensten Bereiche vertreten. Insgesamt gibt es dafür mehr als 250 technische Ausschüsse.

Die ISO-Mitglieder können selbst entscheiden, ob sie in einem bestimmten technischen Ausschuss mitarbeiten möchten und wie stark sie sich einbringen möchten. Dazu werden zwischen zwei Mitglied-Status unterschieden:

- **O-Members:**
können die Normen, die entwickelt werden, beobachten und Kommentare und Ratschläge abgeben.
- **P- Members:**
beteiligen sich aktiv, indem sie in verschiedenen Stadien der Entwicklung über die Norm abstimmen.

In den meisten Fällen kommen die Experten, die ISO-Normen entwickeln, aus der Praxis. Sie verfügen zwar über Expertenwissen, verfolgen aber keinen hochwissenschaftlichen Ansatz. Es gilt die Herausforderungen der verschiedenen Industriesektoren zu verstehen und zu antizipieren und die Normung als Instrument zu nutzen, um gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen, von denen alle profitieren.⁸⁴

In der Regel dauert die Entwicklung einer Norm vom ersten Vorschlag bis zur endgültigen Veröffentlichung etwa 3 Jahre.

Die Expertengruppen, die die Normen erarbeiten nennen sich Technical Committees (technische Komitees, kurz: TC) erarbeitet.

⁸³ S. (ISO, 2023)

⁸⁴ Vgl. (ISO, 2023)

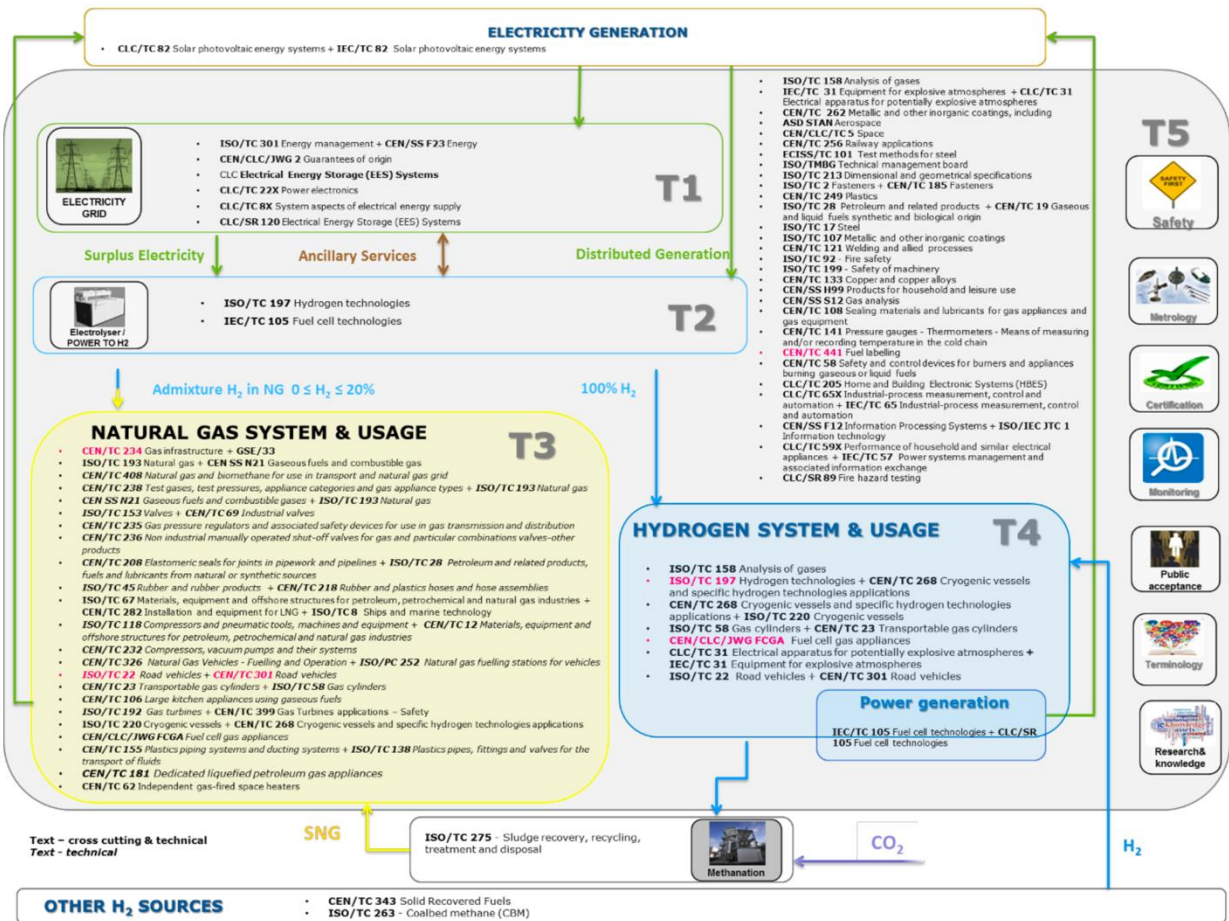


Abbildung 41: europäische und internationale Zusammenarbeit der Normungsorganisationen im Bereich Wasserstoff⁸⁵

Die Abbildung 41 gibt eine Übersicht über die europäische und internationale Zusammenarbeit im Bereich Wasserstoff und zeigt die hohe Anzahl an technischen Komitees, die derzeit in dem Bereich aktiv sind. Das Thema H₂-Betankung von Intralogistikfahrzeugen ist voraussichtlich am ehesten für das **Technical Committee ISO/TC 197** – „Hydrogen technologies“ relevant, das dem Bereich „Hydrogen system & usage“ zugeordnet ist (DIN e. V., 2023). Das TC 197 befasst sich aktuell auch mit der H₂-Betankung von PKWs und Nutzfahrzeuge und ist zuständig für die neue Norm „ISO 19985-1 : Gaseous hydrogen - Fuelling protocols for hydrogen-fuelled vehicles“, die zum Zeitpunkt der Studie allerdings noch nicht vorlag bzw. veröffentlicht war. Ebenfalls relevant könnte das **Technical Committee IEC/TC 105** – „Fuel cell technologies“ sein.

Die Experten, die in den technischen Komitees der ISO mitarbeiten, werden von den nationalen Mitgliedern der ISO vorgeschlagen. Unternehmen und Einzelpersonen sind nicht berechtigt, der ISO als Mitglieder beizutreten.

⁸⁵ S. (CEN, 2019)

F.3. DIN - Deutsches Institut für Normung e. V.

Für Deutschland ist die zuständige nationale Normungsorganisation das DIN Deutsches Institut für Normung e. V. mit dem man zunächst in Kontakt treten muss, um für die Mitarbeit an einer ISO vorgeschlagen zu werden.

Das DIN ist die allgemeine Normungsorganisation in Deutschland. Daneben gibt es die DKE - Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik als zuständige Organisation für die Erarbeitung von Standards, Normen und Sicherheitsbestimmungen in den Themenfeldern Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik. Die vom Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) getragene Organisation ist als Geschäftsbereich des VDE zugleich ein Normenausschuss im Deutschen Institut für Normung.

Als deutsches Mitglied in den internationalen und europäischen Organisationen für die Normung der Elektrotechnik vertreten das DIN und die DKE die deutschen Interessen bei der Erarbeitung und Weiterentwicklung der Internationalen und Europäischen Normen zum Abbau von Handelshemmnissen und zur weltweiten Öffnung der Märkte.⁸⁶

Das nationale Spiegelgremium zur ISO/TC 197 ist der Normungsausschuss „NA 032-03-06 AA“, sowie das DKE/K 384 ist als nationales Spiegelgremium zu IEC/TC 105. Ebenfalls relevant und hilfreich für eine erste Vorstellung ist das **DKE/K 352 "Elektrische**

Ausrüstung von Flurförderzeugen" mit dem bereits zum Ende der Studie eine erste Kontaktaufnahme erfolgt ist.

DIN-Normungsroadmap Wasserstofftechnologie

Interessanterweise wurde Anfang 2023 innerhalb der DIN die „Normungsroadmap Wasserstofftechnologie“ gestartet, die ebenfalls ein geeigneter Kontaktpunkt ist, die Interessen des CIN-Netzwerkes, das aus dieser Ausarbeitung hervorgeht in die relevanten Gremien einzubringen.

Die „Normungsroadmap Wasserstofftechnologie“ ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördertes Verbundprojekt, das den Wasserstoff-Markthochlauf aktiv durch Normen und Standards unterstützen und dazu beitragen soll, eine entsprechende Qualitätsinfrastruktur für Wasserstofftechnologien aufzubauen. Wasserstoff wird dabei als Energieträger, -speicher und Element der Sektorenkopplung für die Transformation zu einer defossilisierten Wirtschaft als ein zentraler Baustein gesehen. Im Rahmen des im Januar 2023 gestarteten Verbundprojekts wird zusammen mit Expertinnen und Experten aus Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und der Zivilgesellschaft ein strategischer Fahrplan erarbeitet für eine schnelle und gezielte Erweiterung und Anpassung des technischen Regelwerks im Bereich der Wasserstofftechnologien.⁸⁷

⁸⁶ vgl. (wikipedia.de, 2023)

⁸⁷ Vgl. (DIN e. V., 2023)

F.3.1. Ziel der NRM-Wasserstofftechnologien

Das erklärte Ziel der DIN-Normungsroadmap Wasserstofftechnologie ist es einen strategischen Fahrplan für die technische Regelsetzung für die gesamte Wertschöpfungskette der Wasserstofftechnologien zu erarbeiten und dafür alle Stakeholder und nationalen technischen Regelsetzer im Bereich der Wasserstofftechnologien zu vernetzen und zu koordinieren. Die Aufgabe der Normungsroadmap ist es die Bedarfe an Normungen zu identifizieren. Die Ausarbeitung konkreter Normen obliegt dann der gewohnten Gremienstruktur des DIN.

So soll innerhalb der Normungsroadmap eine abgestimmte nationale Vorgehensweise festgelegt werden und diese auf europäischer und internationaler Ebene eingebracht werden. Dafür will man sich mit allen relevanten Initiativen und Projekten im Bereich H₂ und Normung verknüpfen und gezielt Normungs- und Standardisierungsprojekte initiieren und unterstützen.⁸⁸

Die Arbeit im Rahmen der Roadmap gliedert sich in drei grundlegende Phasen:

- 1. Phase: Bestands- und Bedarfsanalyse

In der ersten Phase gilt es eine umfassende Übersicht über die Normungs-, Gremien- und Projektlandschaft zu erarbeiten und die Bedarfe in Normung, Standardisierung und pränormativer Forschungsbedarfe zu identifizieren.

- 2. Phase: Handlungsempfehlung

Aus den Erkenntnissen der Bedarfsanalyse sollen in der zweiten Phase konkrete Normungs- und Standardisierungsprojekten abgeleitet werden und Empfehlung von Normungs- und Standardisierungsprojekten gegeben und ggf. priorisiert werden.

- 3. Phase: Umsetzung

In der abschließenden dritten Phase sollen die Normungs- und Standardisierungsprojekte initiiert und umgesetzt werden, wobei diese auch finanziell unterstützt werden können. Dies bezieht sich auf die nationale, europäische als auch internationale Ebene, d. h. also, auch die Erstellung neuer ISO-Normen, soll unterstützt werden.

⁸⁸ Vgl. (DIN e. V., 2023)

F.3.2. Gremienstruktur der DIN-Normungsroadmap Wasserstofftechnologie⁸⁹

Die Gremienstruktur der Normungsroadmap basiert auf drei Ebenen:

F.3.2.1. Arbeitsgruppen (AGs)

Die Basis wird von den zahlreichen Arbeitsgruppen (kurz: AGs) gebildet. Diese bestehen aus verschiedenen Experten vor allem aus der Industrie. Der Anmeldeprozess ist öffentlich und die Teilnahme ist kostenlos. Innerhalb der einzelnen AGs findet die fachliche Erarbeitung der Normungsroadmap zu konkreten Themenbereichen statt. Dabei werden u.a. die aktuell relevanten Normen identifiziert und Normungsbedarfe herausgearbeitet.

Für die Teilnahme ist eine einfache Anmeldung über die Internetseite DIN.one möglich. Die Anmeldefrist lief bis zum 18.05.2023.

Jede Arbeitsgruppe hat zunächst einen AG-Betreuer, der meist von dem DIN e.V. selbst gestellt wird oder von einer dem DIN nahestehende Organisationen besetzt wird. Der AG-Betreuer koordiniert die Treffen und die Zusammenarbeit der AG-Mitglieder. Aus den Reihen der einzelnen Arbeitsgruppen wird dann bei den ersten Zusammenkünften noch zusätzlich ein AG-Leiter gewählt, der dann zusammen mit dem AG-Betreuer zentraler Ansprechpartner für die AG ist und die Treffen moderiert.

F.3.2.2. Arbeitskreise (AKs) und Unterarbeitskreise (UAKs):

Einzelne Arbeitsgruppen werden thematisch übergeordneten Unterarbeitskreisen zugeordnet, die dann weiter in Arbeitskreisen zusammengefasst werden. So fallen Intralogistikfahrzeuge in den AG Sonder-/Spezialfahrzeuge, die neben der AG Straßenfahrzeuge dem UAK Mobilität angehören. Der UAK Mobilität gliedert sich wiederum in den AK Anwendungen.

Ebenso wie die Arbeitsgruppen tagen auch die Unterarbeitskreise und Arbeitskreise regelmäßig mit dem Ziel den notwendigen Austausch innerhalb der Arbeitsgruppen zu unterstützen und ggf. auch bei Unklarheiten festzulegen, welche Fragestellung in den Verantwortungsbereich welcher Arbeitsgruppe gehört.

An den Treffen der Unterarbeitskreise nehmen die AG-Leiter und AG-Betreuer teil.

F.3.2.3. Steuerkreis:

Über den Arbeitskreisen steht der DIN-Steuerkreis, dessen Aufgabe die Schärfung der allgemeinen inhaltlichen und strategischen Ausrichtung der Normungsroadmap insgesamt ist und welcher die Ergebnisse der einzelnen Projekte vornimmt.

⁸⁹ Vgl. (DIN e. V., 2023)

AK ERZEUGUNG	AK INFRASTRUKTUR	AK ANWENDUNG	AK QUALITÄTS- INFRASTRUKTUR	AK WEITERBILDUNG, SICHERHEIT, ZERTIFIZIERUNG
UAK ERZEUGUNGSANLAGEN AG Elektrolyse AG andere Erzeugungsarten AG Gesamtsystemintegration UAK WASSERSTOFFEIGENSCHAFTEN AG Wasserstoffqualität AG Herkunftsnachweise und Umweltaspekte	UAK TRANSPORT- UND VERTEILNETZE AG Rohrleitungen AG Transportleitungen AG Anlagentechnik AG Verteilnetze UAK SPEICHERUNG AG Stationäre und ortsbewegliche, oberirdische Speicher AG CCU/CCS AG Untertage Gasspeicher AG Verflüssigung	UAK STROMVERSORGUNG UND REVERSIBLE BRENNSTOFFZELLE AG Brennstoffzelle AG Kraftwerke, Turbinen, KWK-Anlagen UAK INDUSTRIE AG (petro)chem. Industrie AG PIX AG Thermoprozessanlagen AG Reduktionsprozesse UAK WÄRME AG Häusliche Anwendungen AG Controls AG Gewerbliche Anwendungen UAK MOBILITÄT AG Befüllungsanlagen AG Straßenverkehrsfahrzeuge AG Schienenfahrzeuge AG Schiffsverkehr AG Luftfahrt AG Sonderfahrzeuge/Spezialfahrzeuge	UAK MESSTECHNIK AG Gasanalyse AG Wasserstoffzähler UAK WERKSTOFFE UND MATERIALIEN AG Metallische Werkstoffe AG Komposite und Kunststoffe UAK BAUTEILE AG Bauteile Infrastruktur AG Bauteile für Anwendung und Technologien	UAK SICHERHEIT AG Sicherheitstechnische Grundsätze AG Cybersicherheit AG Explosionsschutz AG Sicherheits- und Integrationsmanagement AG Produktzertifizierung AG Weiterbildung

Abbildung 42: Gremiumstruktur der DIN-Normungsroadmap Wasserstofftechnologie⁹⁰

F.3.3. Förderungsmöglichkeit von Normungs- und Standardisierungsprojekten

Die Normungsroadmap hat zunächst lediglich das Ziel, Normungsbedarfe aufzuzeigen, nicht jedoch die Normen selbst zu entwickeln. Durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sollen jedoch im Rahmen der Normungsroadmap Wasserstofftechnologie Normungsprojekte gefördert werden.

Hierzu können Vorschläge für Normungs- und Standardisierungsprojekte (NuS), die in der aktuellen Phase der Bedarfs- und Bestandsanalyse innerhalb der Normungsroadmap Wasserstofftechnologie entstehen, von AG-Mitgliedern bei dem AG-Betreuer eingereicht werden. Der AG-Betreuer betreut und unterstützt dann die Einreichung der NuS-Projekte beim BMWK. Für die Bewilligung der Förderung eines Normungs- und Standardisierungsprojekts ist die Zustimmung des BMWKs erforderlich.

Je nach Relevanz können sowohl nationale, europäische, aber auch internationale NuS-Projekte gefördert werden. Gefördert wird die Gremienmitarbeit der Fachexperten*innen, wobei sich die Pauschalbeträge danach unterscheiden, ob der Fachexperte die Projekt-/Gremienleitung innehat oder eine rein mitarbeitende Funktion bei dem NuS-Projekt besitzt.

⁹⁰ S. (DIN e. V., 2023)

G. Übersicht wissenschaftlicher Einrichtungen

Im Folgenden wird eine Kurzübersicht über wissenschaftliche Einrichtungen in Deutschland gegeben, die sich mit dem Thema H₂-Betankung auseinandersetzen. Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Im Umfeld Wasserstoff haben insbesondere in den letzten Jahren die wissenschaftlichen Forschungsaktivitäten deutlich zugenommen. In der Liste aufgeführt sind die Einrichtungen, über die konkrete Aktivitäten im Bereich der H₂-Tankstellen recherchiert werden konnten. Daneben sind weitere Einrichtungen bekannt, die sich aktuell für das Thema H₂-Betankung interessieren, allerdings bisher keine konkreten Forschungsprojekte bekannt gegeben haben. Dazu zählen u. a. die Hochschule Esslingen, das Karlsruher Institut für Technologie, der FML-Lehrstuhl der TU München und das PEM-Institut der RWTH Aachen.

Wissenschaftliche Einrichtung	Thema	Referenz	Quelle
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI	„50 Tankstellen Projekt“ (2016 abgeschlossen)	H2-Mobility	www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2016/presseinfo-24-2016-wasserstoff-tanker-hzwei.html
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE	Betrieb einer Wasserstoff-Tankstelle zu Forschungszwecken		www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/wasserstofftechnologien-und-elektrische-energiespeicher/elektrolyse-und-power-to-gas/wasserstoffinfrastruktur.html
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)	digital vernetzte Forschungstankstelle für Wasserstoff	Testgelände in Horstwalde	www.bam.de/Content/DE/Pressemitteilungen/2022/Energie/2022-05-18-wasserstofftankstelle.html
Helmholtz-Zentrum hereon GmbH	Errichtung je einer H ₂ -Tankstelle für Straßenverkehr und Schifffahrt	H2GEE – Wasserstoffstandort Geesthacht	https://wasserstoffwirtschaft.sh/de/projektkarte/h2gee-wasserstoffstandort-geesthacht-22
DLR Institut für Maritime Energiesysteme			

Wissenschaftliche Einrichtung	Thema	Referenz	Quelle
TUM - Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik	Dissertation: Dynamische Simulation zur thermodynamischen Analyse einer Wasserstofftankstelle		https://mediatum.ub.tum.de/doc/1443618/1443618.pdf
TUM - Lehrstuhl für Carbon Composites	Bereitstellung eines CcH2 (kryogenen H ₂)-Wasserstoffspeichersystems bestehend u. a. aus einer Wasserstofftankstelle.	CryoTRUCK	https://www.asg.ed.tum.de/lcc/aktuelles/article/neues-projekt-cryotruck-gestartet/
Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT)	Hochdruck-Testanlage zur Optimierung von Wasserstoff-Tankstellen	„Wasserstoff Testfeld“	https://www.zbt.de/portfolio/wasserstoff/wasserstoff-testfeld/
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut	Probenahmen zur Gasuntersuchung u. a. an H ₂ -Tankstellen		https://www.dvgw-ebi.de/leistungen/dienstleistungen-gas
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)	Abnahmetests von Wasserstofftankstellen		www.zsw-bw.de/leistung/wasserstoff-efuels/abnahmetests-von-wasserstofftankstellen.html

H. Haftungsausschluss

Diese Studie ist gemeinsam von Tim Schultz-Harzheim – greecon CONSULTING und Robert Prinz-Balan – NOVA Ing GmbH erstellt worden.

Die hier dargestellten Erkenntnisse und Schlussfolgerungen basieren auf Gesprächen mit den Mitgliedern des Clean Intralogistics Net (CIN) sowie Interviews und Besuchen von CIN-externen Unternehmen. Alle Angaben und Daten sind sorgfältig recherchiert und wurden nach Bestem Wissen so behandelt, dass die Schutzrechte dabei nicht verletzt werden.

Eine ausdrückliche oder implizierte Garantie für die Korrektheit, Vollständigkeit oder Nutzbarkeit irgendeiner Information, eines Produktes oder eines enthaltenen Prozesses kann nicht gegeben werden, insbesondere da die Informationen teils anonymisiert in die Studie eingeflossen sind und der Ursprung von möglichen Fehlinformationen nicht bei den Autoren der Studie liegen kann.

I. Quellen- und Literaturverzeichnis

- (USPTO), U. S. (15. Juni 2023). Von Class 280: land vehicle:
<https://www.uspto.gov/web/patents/classification/uspc280/defs280.htm> abgerufen
- 2006/42/EG, M. (17. Mai 2006). Richtlinie 2006/42/EG . *Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlamentes und Rates* . Straßburg, Frankreich.
- arfidex GmbH. (31. Juli 2023). www.arfidex.de. Von ATEX RFID/NFC TAGs, Lesegeräte:
<https://www.arfidex.de/index.php/produkte/atex-rfid-nfc-tags-lesegeraete>) abgerufen
- Ausschuss für Betriebssicherheit. (2023). *TRBS 1115 Teil 1: Cybersicherheit für sicherheitsrelevante Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen*. Berlin: Gemeinsames Ministerialblatt, Bundesamt für Arbeit und Soziales (BMAS).
- Avast Deutschland GmbH. (31. Juli 2023). www.avast.com. Von WLAN-Sicherheit: WEP vs. WPA oder WPA2: <https://www.avast.com/de-de/c-wep-vs-wpa-or-wpa2> abgerufen
- Bleesk Benelux Sprl. (31. Juli 2023). www.bleesk.com. Von <https://bleesk.com/uwb.html> abgerufen
- Bluetooth SIG. (31. Juli 2023). www.bluetooth.com. Von The global standard for Bluetooth device communication and positioning: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/> abgerufen
- Bluetooth SIG. (31. Juli 2023). www.bluetooth.com. Von The Characteristics That Enable Connectivity: (<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/key-attributes/range> abgerufen
- Bluetooth SIG. (31. Juli 2023). www.bluetooth.com. Von Bluetooth® Wireless Technology: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>) abgerufen
- Bluetooth SIG. (31. Juli 2023). www.bluetooth.com. Von How Bluetooth® Technology Makes Wireless Communication Reliable: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/key-attributes/reliability> abgerufen
- Bluetooth SIG. (31. Juli 2023). www.bluetooth.com. Von Enabling a Secure, Connected World: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/key-attributes/bluetooth-security/>) abgerufen
- Bundesamt für Strahlenschutz. (20. Juli 2023). www.bfs.de. Von Drahtlose Datenübertragung mit Hilfe optischer Strahlung – LiFi, VLC und Co: https://www.bfs.de/DE/themen/opt/anwendung-alltag-technik/vlc/vlc_node.html) abgerufen

- Bundesministerium der Justiz. (Juni 2023). *www.gesetz-im-Internet*. Von Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung): https://www.gesetze-im-internet.de/gsgv_9/index.html abgerufen
- CEN. (2019). CEN - CENELEC Sector Forum Energy Management – Working Group Hydrogen.
- CEP Partnership. (28. Mai 2023). https://cleanenergypartnership.de/wp-content/uploads/2022/03/CEP_workshop_HyConnect_ShellTechWorks_Day1_FINAL-1.pdf. Von HyConnect - Wireless Communication Between H2 Vehicles and Dispensers: Black-Channel-Implementierung - Hardware und Software abgerufen
- Comarch Software und Beratung AG. (31. Juli 2023). *www.comarch.de*. Von UWB – Wie funktioniert UWB Technologie und wie lässt sich UWB nutzen?: <https://www.comarch.de/news/industrie-40/industrie-40-news/uwb-technologie-wie-funktioniert-sie-und-wie-laesst-sie-sich-nutzen/#:~:text=Somit%20eignet%20sich%20UWB%20ideal,pro%20Sekunde%20erreich%20werden%20k%C3%B6nnen> abgerufen
- Coskun, V. (31. Juli 2023). *www.researchgate.net*. (Beykent Üniversitesi · Department of Computer Engineering) Von NFC interaction styles and operating modes: https://www.researchgate.net/figure/NFC-interaction-styles-and-operating-modes_fig3_278030190 abgerufen
- DGUV Test - Prüf- und Zertifizierungssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung . (Juni 2023). *Maschinensicherheit in Europa*. Von nformationen zur EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG: <https://www.dguv.de/dguv-test/prod-pruefzert/konform-prod/maschinen/index.jsp> abgerufen
- Diener Precision Pumps AG. (15. Juli 2023). *www.dienerprecisionpumps.com*. Von Verdrängerpumpen mit Hubkolbenantrieb: <https://dienerprecisionpumps.com/de/was-ist-eine-verdrangerpumpe/> abgerufen
- DIN e. V. (15. Mai 2023). *din.one*. Von Normungsroadmap Wasserstofftechnologie: *din.one* (nicht öffentlich) abgerufen
- DIN e. V. (2023). Präsentation zur Auftaktveranstaltung. "*Normungsroadmap Wasserstofftechnologie*". Berlin: Din.One.
- DIN EN IEC 62282-4-101. (06 2023). DIN EN IEC 62282-4-101. *Brennstoffzellen-Technologien - Teil 4-101: Brennstoffzellen-Energiesysteme für elektrisch betriebene Flurförderzeuge - Sicherheit*. Berl, Deutschland: Beuth Verlag.
- E. Dold & Söhne GmbH & Co. KG. (31. Juli 2023). *www.dold.com*. Von Funk-Sicherheitssystem, Wireless Safety System: <https://www.dold.com/produkte/schaltgeraete/sicherheitstechnik/wireless-safety-system/> abgerufen

- ECOM Instruments GmbH. (31. Juli 2023). *www.ecom-ex.com*. Von RFID vs. NFC - Was ist der Unterschied?: <https://www.ecom-ex.com/de/blog/post/rfid-vs-nfc-was-ist-der-unterschied> abgerufen
- Elektronik-Kompendium.de. (20. Juli 2023). *www.elektronik-kompendium.de*. Von IEEE 802.11b / WLAN mit 11 MBit: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/0907031.htm> abgerufen
- energis GmbH. (31. Juli 2023). *www.energis.de*. Von WLAN verbessern: https://www.energis.de/ratgeber/internet_telefon/wlan_empfang abgerufen
- EU COMMISSION REGULATION No 406/2010. (26 April 2010). *implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles*. Brüssel: Official Journal of the European Union.
- FiRa Consortium, Inc. (31. Juli 2023). *www.firaconsortium.org*. Von Technical FAQ: <https://www.firaconsortium.org/resource-hub/technical-faq> abgerufen
- HSI Holger Schmidt Industrietechnik GmbH & Co. KG. (08. Juni 2023). *www.rectus-hessen.de*. Von <https://www.rectus-hessen.de/produkte/> abgerufen
- Infrared Data Association (IrDA). (23. Juni 2023). Von <https://www.irda.org> abgerufen
- InfraTec GmbH. (20. Juli 2023). *infratec.de*. Von Infrarot – Infrarotstrahlung: [https://www.infratec.de/sensorik/service-support/glossar/infrarot/#:~:text=Infrarot%20\(IR\)%20besitzt%20damit%20Wellenl%C3%A4ngen,Licht%20oder%20Radiowellen%20wesensgleich%20sind.](https://www.infratec.de/sensorik/service-support/glossar/infrarot/#:~:text=Infrarot%20(IR)%20besitzt%20damit%20Wellenl%C3%A4ngen,Licht%20oder%20Radiowellen%20wesensgleich%20sind.)) abgerufen
- ISO 17268. (November 2020). Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices. Genf, Schweiz: ISO copyright office.
- ISO 19880-1. (März 2020). Gaseous hydrogen — Fuelling stations - Part 1. Genf, Schweiz: ISO International.
- ISO. (26. Juni 2023). *www.iso.org*. Von Taking part: <https://www.iso.org/get-involved> abgerufen
- ISO. (26. Juni 2023). *www.iso.org*. Von About us: <https://www.iso.org/about-us.html> abgerufen
- Joe Tajnai of HP, W.-S. T. (30. Mai 2001). Infrared Data Association Serial Infrared Physical Layer Specification - Version 1.4. Infrared Data Association.
- Jungbluth, J. (2021). Normen, Richtlinien und Verordnungen für Wasserstoff und dessen Anwendungen. *E4Ports-Auftaktveranstaltung*. Berlin: ZBT - Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH.

- Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI). (Oktober 2017). *Erläuterungen und Hinweise für die Durchführung der Erlaubnisverfahren nach § 18 der Betriebssicherheitsverordnung LV 49*. Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI).
- LTE-Anbieter.info. (20. Juli 2023). *www.lte-anbieter.info*. Von Wireless LAN | Der große Ratgeber: <https://www.lte-anbieter.info/technik/wlan/wlan-ratgeber.php> abgerufen
- NFC Forum. (31. Juli 2023). <https://nfc-forum.org/>. Von All it takes is a tap. : <https://nfc-forum.org/> abgerufen
- NFC Forum. (31. Juli 2023). *www.bluetooth.com*. Von NFC in the news: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>) abgerufen
- NPROXX B.V. (23. Juni 2023). *www.nproxx.com*. Von Die verschiedenen Druckbehältertypen: <https://www.nproxx.com/de/different-types-of-pressure-vessel/> abgerufen
- Parker Hannifin GmbH. (Dezember 2023). *Premium Schnellverschlusskupplung mit europäischem Profil, Serie 25 - .* Von *www.parker.com*: <https://ph.parker.com/de/de/product/series-25-quick-coupling/25sbts10mpn> abgerufen
- PHOENIX CONTACT Deutschland GmbH. (31. Juli 2023). *www.phoenixcontact.com*. Von Wie funktioniert sichere Kommunikation über den Black Channel? : <https://www.phoenixcontact.com/de-de/industrien/funktionale-sicherheit/black-channel-prinzip> abgerufen
- Plug Power Inc. (2019). GenDrive® H2-Brennstoffzellenantrieb - Rev. B 2019. Latham, USA.
- PSG a Dover Company. (31. Juli 2023). *www.psgdover.com*. Von Abaque Schlauchpumpen: <https://www.psgdover.com/de/abaque/products/peristaltic-pumps> abgerufen
- Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH (RTR-GmbH). (31. Juli 2023). *www.rtr.at*. Von Spektrum 2400 MHz: https://www.rtr.at/TKP/was_wir_tun/telekommunikation/spektrum/bands/2400MHz/Spektrum2400MHz.de.html abgerufen
- Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH (RTR-GmbH). (31. Juli 2023). *www.rtr.at*. Von Frequenzbereiche - Übersicht Frequenzbereiche: https://www.rtr.at/TKP/was_wir_tun/telekommunikation/spektrum/bands/FRQ_spectrum.de.html abgerufen
- SAE J2600. (Oktober 2015). Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fueling Connection Devices. USA: SAE International.
- SAE J2601-1. (Mai 2020). Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles. USA: SAE International.

- SAE J2601-3. (September 2022). Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks. USA: SAE International.
- SAE J2799. (Dezember 2019). Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software. SAE International.
- Schildknecht AG. (31. Juli 2023). *www.schildknecht.ag*. Von Wireless Profisafe: <https://www.schildknecht.ag/produkte/industrial-wireless/wireless-profisafe/> abgerufen
- SN EN 1175. (Oktober 2020). Sicherheit von Flurförderzeugen - Elektrische/elektronische Anforderungen. Zürich, Schweiz: SWISSEM.
- Sysadmin. (20. Juli 2023). *sysadmin.wiki*. Von Wireless LAN (WLAN): <https://sysadmin.wiki/Sysadmin/WirelessLAN> abgerufen
- Teledyne LeCroy. (31. Juli 2023). *www.fte.com*. Von Bluetooth® low energy Security: <https://fte.com/webhelpii/bpa600/Content/Documentation/WhitePapers/BTLE/BluetoothSmartSecurity.htm> abgerufen
- TRBS 3151/ TRGS 751. (September 2019). Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Gasfüllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen. *GMBI*. Berlin, Deutschland: Bundesministerium für Arbeit und Soziales.
- TRGS 722. (Februar 2021). Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Gemische. *GMBI*. Berlin, Deutschland: Bundesministerium für Arbeit und Soziales.
- WEH GmbH. (06. Juni 2023). *H2-Betankungskomponenten*. Von <https://www.weh.de/produkte/h2-betankungskomponenten/h2-tankstellen-bus-lkw/weh-abreissicherung-tsa5-h-fur-bus-und-lkw-tankstellen-zur-direkten-installation-an-der-zapfsaule-35-mpa> abgerufen
- Wi-Fi Alliance. (April 2023). Generational Wi-Fi® User Guide. Wi-Fi Alliance. Von https://www.wi-fi.org/download.php?file=/sites/default/files/private/Generational_Wi-Fi_User_Guide_202304.pdf abgerufen
- Wi-Fi Alliance. (19. Juli 2023). *www.wi-fi.org*. Von (<https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi>) abgerufen
- Wikipedia. (19. Juni 2023). *www.wikipedia.de*. Von OSI-Modell: <https://de.wikipedia.org/wiki/OSI-Modell> abgerufen
- wikipedia.de. (Dezember 2023). *www.wikipedia.de*. Von Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik: https://de.wikipedia.org/wiki/Deutsche_Kommission_Elektrotechnik_Elektronik_Informationstechnik abgerufen

www.coval-germany.com. (31. Mai 2023). Von Venturi-Vakuumpumpen: <https://www.coval-germany.com/Vakuumtechnik/Leitfaden-f%C3%BCr-das-Greifen-mit-Vakuum/Verfahren-zur-Vakuumerzeugung/> abgerufen

XTremeGN UG. (31. Juli 2023). *www.rfid-basis.de*. Von RFID – Informationen: <https://www.rfid-basis.de/>) abgerufen

XTremeGN UG. (31. Juli 2023). *www.rfid-grundlagen.de*. Von RFID: <https://www.rfid-grundlagen.de> abgerufen

Tim Schultz
Greecon Consulting
M +49 171 241 8220
E tim.schultz@greecon.de

Robert Prinz-Balan
Nova Ing GmbH
M +49 170 234 9459
E robert.balan@nova-ing.de