

Leitfaden für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen

Am Beispiel H2IntraDrive



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner
Robert Micheli, M.Sc.

Leitfaden für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen

Am Beispiel H2IntraDrive



Impressum

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner,
Robert Micheli, M.Sc.

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Gestaltung:

Susanne Höcht

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Druck:

Druckerei WIRmachenDRUCK GmbH

ISBN:

978-3-941702-55-4

Copyright 2015 – Printed in Germany

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Die urheberrechtlichen Verwertungsrechte liegen beim Herausgeber.

Nachdruck, Übersetzung, Vervielfältigung oder Speicherung auf Datenträger ist nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers möglich.

Für Satz- und Druckfehler, für unrichtige Angaben der Unternehmen sowie für Marken- oder Urheberrechte wird jeglicher Schadensersatz ausgeschlossen.

Die Autoren

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München

Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner leitet seit 1994 den Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München. Als wesentliche Forschungsinhalte des Lehrstuhls werden neben der Technischen Logistik die Steuerung und Optimierung von Materialflussprozessen durch innovative Ident-Technologien (RFID), die Weiterentwicklung der Logistikplanung auf Basis digitaler Werkzeuge sowie die Rolle des Menschen in der Logistik behandelt.



Robert Micheli, M.Sc.

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München

Robert Micheli absolvierte seinen Bachelor im Bereich Produktion und Logistik an der Freien Universität Bozen in Italien. Anschließend führte er sein Studium im Bereich Produktionsmanagement an der Technischen Universität München weiter. Seit Februar 2011 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl fml. Seine Forschungsschwerpunkte liegen auf dem Gebiet neuer Antriebssysteme bei Flurförderzeugen, insbesondere im Bereich von Brennstoffzellensystemen.



Projektpartner und Fördermittelgeber

H2IntraDrive

Projektpartner



Fördermittelgeber

Das Forschungsprojekt H2IntraDrive wird im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) gefördert.

Ziel des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) ist die Marktvorbereitung von Produkten mit dieser zukunftsgerichteten Technologie. Der Fokus des NIP liegt neben groß angelegten Demonstrationsprojekten auch auf Projekten aus dem Bereich Forschung und Entwicklung. Koordiniert wird das Programm von der NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.

Gefördert durch:



Koordiniert durch:



Nationales Innovationsprogramm
Wasserstoff- und
Brennstoffzellentechnologie

Über diesen Leitfaden

Im Rahmen des im Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) geförderten Forschungsprojekts H2IntraDrive wurde mit den Industriepartnern BMW und Linde Material Handling an der Realisierung von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen gearbeitet. Zusammen mit den Partnern wurden fünf Gabelstapler und sechs Routenzugschlepper für den Betrieb mit Wasserstoff angepasst sowie Brennstoffzellensysteme integriert. Zudem wurde die erste deutsche stationäre Wasserstoffinfrastruktur, mit deren Hilfe Flurförderzeuge direkt in der Werkshalle betankt werden können, im BMW-Werk Leipzig aufgebaut, genehmigt und in Betrieb genommen. Die Durchführung des Projektes war aufgrund der neuen und innovativen Wasserstoff-Technologie, vor allem in Bezug auf die Umsetzung, für alle Beteiligten Neuland. Dadurch konnte nicht auf vorhandenes Wissen und Expertise zurückgegriffen werden. Aus Betreibersicht waren somit nicht alle Potenziale hinsichtlich einer schnellen und effizienten Umsetzung nutzbar.

Aus diesem Grund haben wir uns entschlossen das gewonnene Wissen aus dem Forschungsprojekt H2IntraDrive zusammen mit den Erfahrungen von Betreibern, Herstellern und Behörden zu dokumentieren und aufzubereiten. Als Ergebnis entstand ein Leitfaden, der bei einer Umsetzung von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen unterstützt und hilft, Zeit- und Kostenpotenziale zu heben. An dieser Stelle möchten wir die Gelegenheit nutzen und uns bei allen beteiligten Personen bedanken.

Der Leitfaden soll in erster Linie eine Unterstützung für eine schnelle und kostengünstige Inbetriebnahme von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen sein. Hierfür wurden Instrumente wie Terminpläne, Checklisten, informative Ratschläge und Ablaufbeschreibungen entwickelt. Zudem gibt der Leitfaden einen Überblick über verschiedene Wasserstoffinfrastrukturkonzepte und deren Funktionsweise. Dieses Wissen erleichtert die Diskussion mit den einzelnen Lieferanten. Eine detaillierte Kosten- oder fundierte Hardwarebewertungen sind nicht Umfang dieses Dokumentes.

Wir wünschen Ihnen eine erfolgreiche Umsetzung von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen und hoffen die Informationen auf den folgenden Seiten können dazu beitragen.



Inhalt

1 Allgemeines

1.1	Planungsprämissen.....	11
1.1.1	Standort- bzw. Gebäudeauswahl.....	11
1.1.2	Betreiber- und Schichtmodell	12
1.1.3	Flurförderzeugflotte	12
1.1.4	Indoor- bzw. Outdoor-Einsatz	13
1.2	Lieferantenübersicht	14
1.3	Checkliste für die Festlegung von Planungsprämissen	15

2 Wasserstoffinfrastruktur

2.1	Terminplan.....	17
2.2	Aufbau und Funktionsweise.....	17
2.2.1	Wasserstoffspeicher.....	18
2.2.2	Betankungsanlage	19
2.2.3	Befüllanlage bzw. Dispenser	19
2.3	Spezifikationen.....	21
2.3.1	Betankungsanlage und Dispenser	21
2.3.2	Wasserstoffversorgung	22
2.3.3	Betreibermodell.....	23
2.3.4	Service und Wartung.....	23
2.3.5	Zugelassene Überwachungsstelle	24
2.4	Auftragsvergabeprozess	24
2.5	Infrastrukturaufbau.....	25
2.5.1	Bauliche Maßnahmen	25
2.5.2	Aufbau der Betankungsanlage.....	26
2.5.3	Inbetriebnahme	26
2.6	Checkliste für die Inbetriebnahme der Wasserstoffinfrastruktur.....	27

3 Flurförderzeuge

3.1	Terminplan.....	29
3.2	Aufbau und Funktionsweise.....	29
3.2.1	Brennstoffzellensystem	29
3.2.2	Flurförderzeug	30
3.3	Spezifikationen.....	31
3.3.1	Umrüstung vs. Neuanschaffung.....	31
3.3.2	Flurförderzeugausstattung	31
3.3.3	Schnittstellen.....	32
3.3.4	Service und Wartung.....	32
3.4	Auftragsvergabeprozess	32
3.5	Inbetriebnahme	33

3.6	Checkliste für die Inbetriebnahme der Flurförderzeuge.....	34
4 Genehmigungen und Gutachten		
4.1	Terminplan.....	35
4.2	Genehmigungsprozess	35
4.3	Genehmigungen H2IntraDrive.....	37
4.3.1	Änderungsgenehmigung nach §16 BImSchG.....	37
4.3.2	Erlaubnis nach Betriebssicherheitsverordnung.....	39
4.3.3	Baugenehmigung	39
4.4	Gutachten H2IntraDrive	39
4.5	Checkliste für notwendige Genehmigungen und Gutachten	40
5 Sicherheitsmaßnahmen		
5.1	Infrastruktur.....	41
5.1.1	Gaswarnanlage	41
5.1.2	Brandmelder.....	41
5.1.3	Aufschaltung auf Brandmeldezentrale	41
5.1.4	Not-Aus-Schalter	41
5.1.5	Potenzialausgleich	42
5.1.6	Blitzschutz.....	42
5.1.7	Hallenlüftung	42
5.1.8	Abreißkupplung	42
5.2	Flurförderzeuge	42
5.2.1	Wegfahrsperrung.....	42
5.2.2	Potenzialausgleichsbänder	43
5.2.3	Definierter Abstellort.....	43
Ergänzende Literatur		44
Abbildungsverzeichnis		45

1 Allgemeines

In Kapitel 1.1 des Leitfadens für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen werden wichtige anwendungsspezifische Prämissen dargestellt. Diese sollen bereits bei Projektbeginn definiert sowie festgehalten werden. Sie haben direkte Auswirkungen auf die in den folgenden Kapiteln beschriebene Planung und Umsetzung der Wasserstoffhardware. Abschließend werden in Kapitel 1.2 in einer Lieferantenübersicht die wichtigsten europäischen Hersteller für Wasserstoffflurförderzeuge und Wasserstoffinfrastruktur aufgezeigt.

1.1 Planungsprämissen

Durch eine detaillierte Ausarbeitung von Planungsprämissen für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen wird zu Projektbeginn die Grundlage für alle weiteren Planungen und Lieferantengespräche geschaffen. Folgende Punkte sind zu berücksichtigen:

- Standort- bzw. Gebäudeauswahl sowie mögliche Erweiterungen
- Betreiber- und Schichtmodell
- Typ und Anzahl der Flurförderzeuge
- Prognostizierter Wasserstoffverbrauch der Flurförderzeugflotte
- Anzahl Betankungen pro Tag
- Indoor- bzw. Outdoor-Einsatz der Flurförderzeuge

1.1.1 Standort- bzw. Gebäudeauswahl

Der Einsatzort der Flurförderzeuge muss im Vorfeld festgelegt werden. Hierfür gilt es neben dem Anwendungsort auch eventuell später angedachte Erweiterungsmöglichkeiten zu berücksichtigen. So kann zum Beispiel ein Demo-Betrieb in einem Teilbereich/Halle eines Werks realisiert und anschließend der Einsatz auf das gesamte Werk ausgerollt werden. Vor allem für die Wasserstoffinfrastruktur kann eine vorausschauende Standortwahl und Berücksichtigung einer späteren Erweiterbarkeit zu wesentlichen Einsparungen führen. Zudem müssen eventuelle Anwendungseinschränkungen der Flurförderzeuge bei der Wahl des Einsatzortes berücksichtigt werden.

In Abbildung 1-1 ist das Werkslayout des BMW-Werk Leipzig zu sehen und das für die Umsetzung der wasserstoffbetriebenen Flurförderzeuge (H2IntraDrive) ausgewählte Gebäude, der CFK-Karosseriebau der BMW i-Fahrzeuge. Als mögliche Erweiterung nach erfolgreicher Projektumsetzung wurde die Montage der i-Fahrzeuge identifiziert.

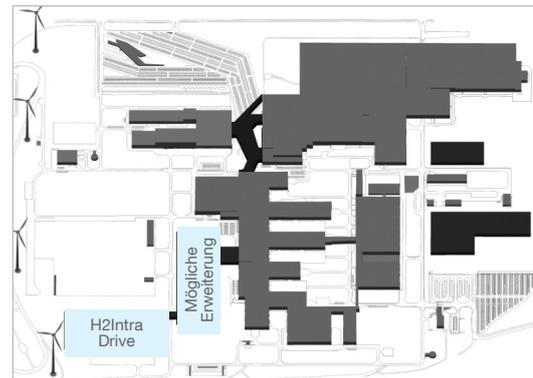


Abb. 1-1: Standort- bzw. Gebäudeauswahl im Rahmen des Projektes H2IntraDrive [Quelle: BMW]

Für die im Forschungsprojekt H2IntraDrive eingesetzten Flurförderzeuge ist ein Einsatz bzw. Betrieb nicht möglich in ...

- ... feuer- oder explosionsgefährdeten Bereichen,
- ... verschmutzten und staubigen Bereichen,
- ... feuchten und nassen Bereichen (Luftfeuchtigkeit > 95 %),
- ... Außenbereichen bei Regen,
- ... Räumen mit geringem Sauerstoffgehalt (z. B. Papierfabriken),
- ... Umgebungen mit einer Temperatur niedriger als -15°C sowie höher als 40°C.

1.1.2 Betreiber- und Schichtmodell

Zu Projektbeginn soll bereits das spätere Betreibermodell der Flurförderzeuge festgelegt werden. So müssen zum Beispiel Themen wie Anschaffung der Flurförderzeuge (Leasing, Kauf, Nutzungsüberlassung), Service & Wartung und Mitarbeiter-Schulungen mit einem möglichen Dienstleister geklärt werden. Des Weiteren sind verschiedene Betreibermodelle für die Wasserstoffinfrastruktur denkbar, welche in Kapitel 2.3.3 näher beschrieben werden.

Neben dem geplanten Betreibermodell ist das geplante Schichtmodell und die täglichen Betriebsstunden der Flurförderzeuge z.B. für die spätere Berechnung des Wasserstoffverbrauchs notwendig.

1.1.3 Flurförderzeugflotte

Für den angestrebten Anwendungsbereich gilt es, die verschiedenen Typen von Flurförderzeugen, wie z.B. 3 t Schlepper und 1,6 t Gabelstapler, zu definieren und hinsichtlich Marktverfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen bzw. Flurförderzeugen mit Brennstoffzellenantrieben zu prüfen. Folgende Brennstoffzellensysteme für Flurförderzeuge sind aktuell in Europa verfügbar:

- 80 V-System (Einsatz z.B. in Gegengewichtsstapler und Schlepper)
- 48 V-System (Einsatz z.B. in Gegengewichtsstapler und Schlepper)
- 24 V-System (Einsatz z.B. in Niederhubwagen und Routenzugschlepper)

Neben dem Fahrzeugtyp ist die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge für die Berechnung des täglichen H₂-Flottenverbrauchs und somit der Infrastrukturauslegung notwendig. Folgend einige Richtwerte bzgl. des Wasserstoffverbrauchs verschiedener Flurförderzeuge, die jedoch je nach Anwendung

bzw. Belastungsprofil variieren können:

- Gegengewichtsstapler (2,5 t Hublast und 80 V-System): 0,40 kg H₂/h
- Routenzugschlepper (3 t Zuglast und 24 V-System): 0,03 kg H₂/h
- Niederhubwagen (2 t Tragfähigkeit und 24 V-System): 0,03 kg H₂/h

Ist die durchschnittlich benötigte elektrische Energie des Flurförderzeuges bekannt, kann mit folgender Formel der zukünftige Wasserstoffverbrauch berechnet werden. Hierfür werden zudem der sogenannte Lower Heating Value (LHV), zu deutsch „Heizwert“, von Wasserstoff und der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems bezogen auf den LHV benötigt. Dabei beträgt der LHV 33,33 kWh/kg, der Wirkungsgrad der Brennstoffzellen kann zwischen 40 % und 55 % liegen.

$$x = \frac{E_{FFZ}}{LHV \cdot \eta_{BZ}}$$

- x: Wasserstoffverbrauch pro Betriebsstunde [kg]
- E_{FFZ} : Elektrisch verbrauchte Energie des Flurförderzeuges pro Betriebsstunde [kWh]
- LHV: Lower Heating Value (Heizwert) von Wasserstoff [33,33 kWh/kg]
- η_{BZ} : Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystem bezogen auf den LHV von Wasserstoff [%]

Zusätzlich zum täglichen Verbrauch gilt es, die Anzahl der täglichen Betankungen zu bestimmen. Diese ergibt sich durch die täglichen Betriebsstunden, den durchschnittlichen Verbrauch und der nutzbaren Tankkapazität der Flurförderzeuge. Folgend als Anhaltspunkt hierfür die Tankkapazitäten der im Forschungsprojekt H2IntraDrive ein-



Abb. 1-2: Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen im CFK-Karosseriebau im BMW-Werk Leipzig

gesetzten Brennstoffzellensysteme:

- 80 V-System Gabelstapler:
1,8 kg Wasserstofftankkapazität
bei 350 bar und 15°C
- 24 V-System Routenzugschlepper:
0,73 kg Wasserstofftankkapazität bei
350 bar und 15°C

1.1.4 Indoor- bzw. Outdoor-Einsatz

Für die Festlegung der Planungsprämissen gilt es, abschließend den Einsatzbereich einzugrenzen, d. h. werden die Flurförderzeuge nur innerhalb eines Gebäudes oder auch außerhalb eines Gebäudes eingesetzt?

Bei einer reinen Indoor-Anwendung ist eine Indoor-Betankung der Flurförderzeuge erforderlich, wobei die Betankungsanlage

außerhalb und ein oder mehrere Dispenser bzw. Zapfsäulen innerhalb des Gebäudes aufgebaut werden können. Ein mögliches Einfrieren der Brennstoffzelle bzw. Brennstoffzellenmembran ist dabei nicht möglich. Vorausgesetzt die Flurförderzeuge werden nicht in Kältelagern abgestellt. Ein Betrieb in Kältelagern ist im Normalfall ohne weitere Probleme möglich, sollte aber dennoch mit den entsprechenden Lieferanten abgestimmt werden. Der Indoor-Betrieb eines wasserstoffbetriebenen Gabelstaplers und Routenzugschleppers ist in Abbildung 1-2 zu sehen.

Werden die Flurförderzeuge Outdoor bzw. Indoor und Outdoor eingesetzt, können Dispenser und Betankungsanlage auch im Außenbereich aufgestellt werden. Hierbei

sind geringere Sicherheitsmaßnahmen notwendig. Dadurch können Kosten und Genehmigungsaufwand eingespart werden. Ist neben dem Betrieb zudem ein Abstellen der Flurförderzeuge im Außenbereich über Nacht vorgesehen, muss, mit den Lieferanten sichergestellt werden, dass die Brennstoffzellensysteme dafür ausgelegt sind und die Membran der Zelle nicht einfrieren kann. Ein Betrieb im Außenbereich und das Abstellen im Innenbereich führt in der Regel zu keinem Einfrieren der Membran und ist folglich unbedenklich. Dies sollte dennoch mit dem Lieferanten abgestimmt werden.

1.2 Lieferantenübersicht

Auf dem europäischen Markt gibt es eine Reihe von Lieferanten mit unterschiedlicher Erfahrungen in den Bereichen wasserstoffbetriebene Flurförderzeuge, Brennstoffzellensysteme für Flurförderzeuge, Wasserstoffbetankungsanlagen und Gasherstellung. Im Gegensatz zum amerikanischen Markt werden aufgrund der Maschinenrichtlinie keine Plug and Play Lösungen, d. h. ein eins zu eins Tausch der Batterie eines batteriebetriebenen Flurförderzeuges mit einem Brennstoffzellensystem, angeboten bzw. bedarf einer offiziellen Freigabe des Flurförderzeugherstellers. Die folgende Auflistung von Herstellern mit Erfahrung im

Bereich von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen ist lediglich ein Auszug von Hersteller ohne jegliche Bewertung:

Wasserstoffbetriebene Flurförderzeuge:

- Linde Material Handling
- Still
- Toyota Material Handling

Brennstoffzellensysteme:

- Fronius International
- H2Logic
- Hydrgenics
- HyPulsion (Joint Venture zwischen Air Liquide und Plug Power)

Wasserstoffbetankungsanlagen:

- Air Liquide
- Air Products
- H2Logic
- Linde Gas

Gashersteller:

- Air Liquide
- Air Products
- Linde Gas

Planungsbüro für Umsetzung H2-Betankungsanlagen für Flurförderzeuge

- WPW Leipzig GmbH (Umsetzung bei H2IntraDrive)

1.3 Checkliste für die Festlegung von Planungsprämissen

- Am/Im welchen Standort/Gebäude werden die wasserstoffbetriebenen Flurförderzeuge eingesetzt?
- Gibt es Gebäude in denen die Anwendung der Flurförderzeuge erweitert werden soll/kann?
- Welche Anforderungen an die Flurförderzeuge ergeben sich anhand der Gebäudeauswahl (z. B. sehr staubig, Temperaturen unter null Grad)?
- Werden die Flurförderzeuge Indoor, Outdoor oder Indoor und Outdoor eingesetzt?
- Wer ist der Betreiber der Flurförderzeuge?
- Wird in 1-, 2- oder 3-Schichten gearbeitet?
- Welche verschiedenen Typen von Flurförderzeugen sind im Einsatz und wie hoch ist die Anzahl der einzelnen Flurförderzeuge?
- Wie hoch sind die täglichen Betriebsstunden der Flurförderzeuge?
- Wie hoch ist der elektrische Verbrauch der Flurförderzeuge bei der Anwendung oder ähnlichen Anwendungen?
- Wie hoch ist der tägliche Wasserstoffbedarf der Flurförderzeugflotte?
- Wie viele Betankungen finden pro Tag statt?
- Welche Lieferanten kommen in Frage?

2 Wasserstoffinfrastruktur

Nachdem die allgemeinen Planungsprämissen definiert sind, kann mit der Planung der benötigten Infrastrukturhardware begonnen werden. Hinsichtlich eines besseren Verständnisses werden in Kapitel 2.2 die Funktionsweise der Wasserstoffinfrastruktur erläutert und alternative Umsetzungsmöglichkeiten diskutiert. Anschließend werden in den Kapiteln 2.3 bis 2.5 notwendige Tätigkeiten, von der anfänglichen Infrastrukturspezifikation bis zum Aufbau der Anlage, beschrieben sowie umsetzungsorientierte Hinweise gegeben. Ein Terminplan angelehnt an die Erfahrungen aus H2IntraDrive in Kapitel 2.1 und eine Checkliste in Kapitel 2.6 bilden den praktischen Rahmen für eine effiziente Umsetzung der in diesem Kapitel beschriebenen Tätigkeiten.

2.1 Terminplan

Aufgabe	Monat 1	Monat 2	Monat 3	Monat 4	Monat 5	Monat 6	Monat 7	Monat 8	Monat 9
Definition Wasserstoffinfrastrukturspezifikationen	■								
Ausschreibung	■								
Angebote Lieferanten einholen		■							
Angebotsverhandlung und Vergabe		■							
Lieferzeit Wasserstoffinfrastruktur			■	■	■	■	■	■	■
Planung baulicher Vorbereitungen			■	■	■	■	■	■	■
Umsetzung bauliche Vorbereitungen							■	■	■
Aufbau Wasserstoffinfrastruktur								■	■
Inbetriebnahme Wasserstoffinfrastruktur									■

Abb. 2-1: Terminplan Wasserstoffinfrastruktur

2.2 Aufbau und Funktionsweise

Eine Infrastruktur für die Betankung von mehreren wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen besteht im Wesentlichen aus den drei miteinander verbundenen Komponenten Wasserstoffspeicher, Betankungsanlage und Dispenser (auch Befüllanlage genannt). In Abbildung 2-2 ist die Wasserstoffversorgung der Flurförderzeuge schematisch dargestellt, dabei ist die Wasserstoffinfrastruktur mit ihren drei Komponenten ersichtlich. Der Wasserstoffspeicher wird durch Traileranlieferungen mit Wasserstoff versorgt. Dieser wird durch die Betankungsanlage verdichtet und in einem Hochdruckspeicher (HD-Speicher), der Teil der Betankungsan-

lage ist, zwischengespeichert. Nachdem das Flurförderzeug an der Befüllanlage bzw. am Dispenser angekoppelt und der Befüllvorgang gestartet wird (in der Regel durch Drücken eines Knopfes an der Befüllanlage), strömt der Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Flurförderzeuges, bis ein vorher definierter Zieldruck erreicht wird. Parallel zum Befüllen des Flurförderzeuges wird bei Bedarf das Kondensatwasser, welches bei der chemischen Reaktion des Wasserstoffes mit Luft entsteht und aufgefangen wird, durch die Befüllanlage aus dem Flurförderzeug abgesaugt.



Abb. 2-2: Schematische Darstellung Wasserstoffversorgung

2.2.1 Wasserstoffspeicher

Generell kann Wasserstoff gasförmig oder flüssig gespeichert werden. Bei der gasförmigen Speicherung wird bei der Versorgung von Flurförderzeugen zusätzlich in Niederdruckspeicherung und Hochdruckspeicherung unterschieden.

Niederdruckspeicherung

Als Niederdruckspeicherung wird die Speicherung von Wasserstoff in Tanks mit einem Betriebsdruck von ca. 50 bar bezeichnet. Aufgrund des geringen Speicherdrucks wird im Vergleich zum Hochdruckspeicher ein wesentlich größeres Volumen benötigt. Ein beispielhafter Niederdruckspeicher ist in Abbildung 2-3 zu sehen.



Abb. 2-3: Niederdruckspeicherung von Wasserstoff bei einer öffentlichen Tankstelle [Quelle: LindeGas]

Wird z. B. von 46 bar Tankbetriebsdruck und 26 bar Tankentnahmedruck (Eingangsdruck des im Projekt H2IntraDrive verwendeten Verdichters) ausgegangen, würde der Tank

bei einer nutzbaren Tankkapazität von ca. 130 kg Wasserstoff einen Durchmesser von 2,8 m und eine Höhe von 18 m aufweisen.

Hochdruckspeicherung

Wird der Wasserstoff im Wasserstoffspeicher bei einem deutlich höheren Druck (ca. 200 bar) gespeichert, kann von einem Hochdruckspeicher (HD-Speicher) gesprochen werden. Diese können z. B. aus mehreren zusammengeschlossenen 50 Liter Gasflaschenbündel realisiert werden, auch Maxipacks genannt. Bedingt durch den höheren Speicherdruck liegt die Energiedichte im Vergleich zum Niederdruckspeicher höher, was folglich ein geringeres Speichervolumen bei derselben Speichermenge an Wasserstoff ergibt. Wird z. B. von 180 bar Tankbetriebsdruck und 26 bar Tankentnahmedruck ausgegangen, würde der Hochdruckspeicher (Maxipacks) bei einer nutzbaren Tankkapazität von ca. 130 kg Wasserstoff eine Abmessung von 19 m x 0,75 m x 2 m (Länge x Breite x Höhe) aufweisen. In Abbildung 2-4 ist der Hochdruckspeicher (rote Maxipacks) in der rechten Bildhälfte und die Betankungsanlage links daneben aus dem H2IntraDrive Projekt zu sehen.

Bei einer Betrachtung des Energieaufwands, der für das Verdichten des Wasserstoffes eingebracht werden muss, kann der HD-Speicher aus Sicht des Betreibers der

Betankungsanlage weitere Vorteile bringen. So kann beim Befüllen des Flurförderzeuges erst aus dem Wasserstoffspeicher und anschließend aus dem HD-Speicher der Betankungsanlage übergeströmt werden. Zudem ist der Verdichtungsaufwand von 180bar auf 450bar wesentlich geringer als von 26 bar auf 450 bar. Der energetische Vorteil eines HD-Speichers kann nur bei einer entsprechenden Funktionsweise der Betankungsanlage genutzt werden, d. h. der Verdichter muss bei einem variablen Eingangsdruck funktionieren.



Abb. 2-4: Betankungsanlage und Hochdruckspeicher im H2IntraDrive Projekt

Flüssigspeicherung

Eine Flüssigspeicherung des Wasserstoffs, wie in Abbildung 2-5 zu sehen, bringt den Vorteil einer höheren Energiedichte. Wesentliche Herausforderungen sind dabei die Wärmedämmung des Tanks sowie die Reduzierung von Verdunstungsverlusten. Bei einer Betrachtung einer nutzbaren Tankkapazität von ca. 130 kg würde das Tankvolu-



Abb. 2-5: Flüssigspeicherung von Wasserstoff [Quelle: LindeGas]

men bei einer Flüssigspeicherung ca. 2 m³ betragen. Ein Tank mit einem Durchmesser von 1,5 m und einer Höhe von ca. 2 m wäre ausreichend.

2.2.2 Betankungsanlage

Bei den oben erwähnten Speichermethoden ist der Speicherdruck immer geringer als der maximale Betankungsdruck. Infolgedessen muss der Wasserstoff mit Hilfe der Betankungsanlage, dargestellt in Abbildung 2-4, auf einen geeigneten Druck komprimiert und gegebenenfalls bei hohem Druck, in der Regel ca. 450 bar zwischengelagert (HD-Speicher) werden. Diese Zwischenlagerung wird für die Entkoppelung zwischen Kompressions- und Befüllprozess genutzt. Bei einem Verzicht der Zwischenlagerung müsste der Kompressor den Tank des Flurförderzeuges direkt befüllen. Die Folgen wären eine größere Auslegung des Kompressors, höherer Energieaufwand der Anlage sowie längere Betankungszeiten. Hinsichtlich der Kompressionsmethoden stehen verschiedene Funktionsweisen bzw. Bauarten von Kompressoren zur Verfügung, gängige Methoden sind:

- Ionischer-Verdichter (H2IntraDrive)
- Kolbenverdichter
- Luftkolbenverdichter
- Membranverdichter

2.2.3 Befüllanlage bzw. Dispenser

Mit Hilfe der Befüllanlage, auch Dispenser genannt, wird Wasserstoff aus dem HD-Speicher der Betankungsanlage durch Überströmen direkt in den Tank des Flurförderzeuges gefüllt. Im Wesentlichen kann hier zwischen einer sogenannten Zieldruckbetankung oder einer druckgeführten Betankung unterschieden werden.

Zieldruckbetankung

Bei der Zieldruckbetankung wird mit einer definierten Durchflussrate bis zu einem definierten Zieldruck (350 bar) befüllt, hierfür ist keine Kommunikation zwischen Fahrzeug und Tankanlage notwendig. Aufgrund des Temperaturanstieges von Wasserstoff und Tank während des Überströmvorganges sowie des zulässigen maximalen Zieldruck von 350 bar kann das Flurförderzeug nicht zu 100 % voll betankt werden. In der folgenden Abbildung 2-6 ist eine Zieldruckbetankung eines wasserstoffbetriebenen Gabelstaplers im H2IntraDrive Projekt zu sehen.

und Dispenser ist hierfür notwendig. Hierbei ist ein gezieltes Überfüllen des Fahrzeuges auf z.B. 380 bar zulässig. Infolgedessen kann das Flurförderzeug bis zum maximal möglichen Tankinhalt befüllt werden. Ferner kann das Fahrzeug aufgrund der variablen und auch höheren Durchflussrate schneller betankt werden.

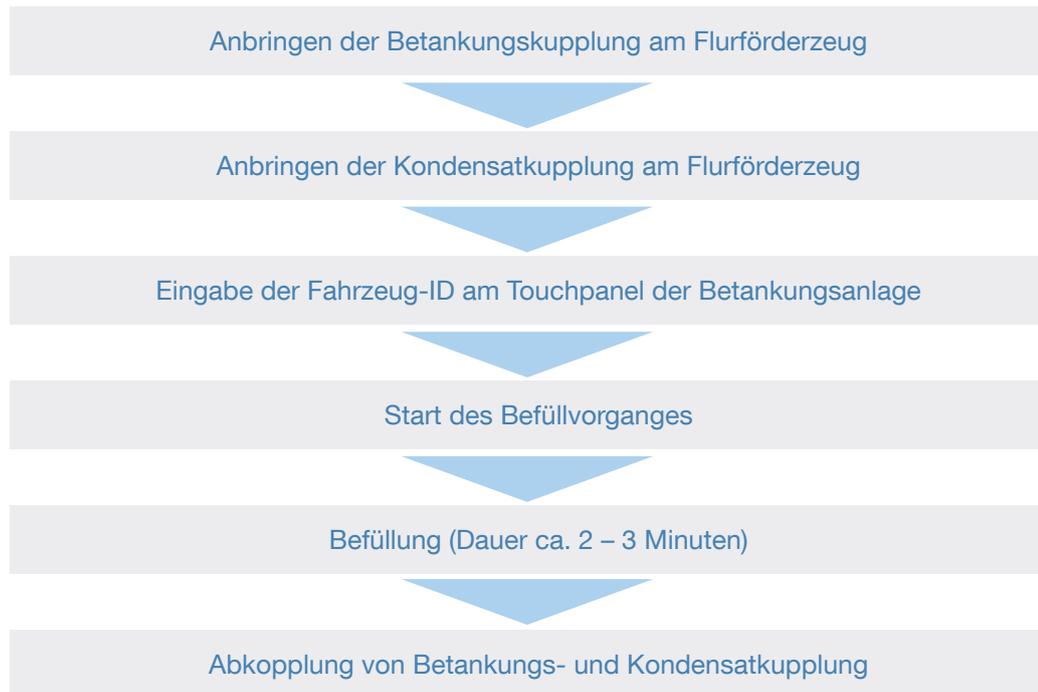


Abbildung 2-6: Betankung eines wasserstoffbetriebenen Gabelstaplers

Druckgeführte Betankung

Bei der druckgeführten Betankung wird die Durchflussrate anhand der Tanktemperatur angepasst und ist somit variabel, eine Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug

Ein möglicher Befüllprozess des Flurförderzeuges kann wie folgt durchgeführt werden:



2.3 Spezifikationen

Hinsichtlich der Angebotsausschreibung der Wasserstoffinfrastruktur gilt es, Spezifikationen für die benötigte Hardware zu definieren. Eine strukturierte und durchdachte Anforderungsliste bzw. ein Lastenheft steigert die Qualität der Herstellerangebote, erleichtert den späteren Angebotsvergleich und beschleunigt somit den Vergabeprozess.

Aus der Festlegung der Planungsprämissen in Kapitel 1.1 ergeben sich folgende Rahmenbedingungen, die den Wasserstoffinfrastrukturlieferanten zur Angebotserstellung idealerweise bereitgestellt werden sollten:

- Werks- bzw. Hallenlayout inkl. gekennzeichneter Betriebsbereiche der Flurförderzeuge und eventueller Erweiterungsbereiche
- Betreibermodell für Wasserstoffinfrastruktur (nur wenn bereits entschieden, siehe Kapitel 2.3.3)
- Anzahl Flurförderzeuge
- Flurförderzeugtypen inkl. Betankungsdruck und Tankkapazitäten (siehe Kapitel 1.1.3)
- Prognostizierter täglicher Verbrauch an Wasserstoff
- Anzahl Betankungen pro Tag
- Indoor- bzw. Outdoor-Einsatz

Des Weiteren sollten Spezifikationen zu folgenden Themenbereichen definiert und somit vom Lieferanten gefordert werden:

- Betankungsanlage und Dispenser
- Wasserstoffversorgung
- Betreibermodell
- Service und Wartung
- Zugelassene Überwachungsstelle

Die Festlegung der Spezifikationen ist nicht zwingend erforderlich. So kann z. B. in einigen Teilbereichen auf die Erfahrung und das Know-how des Lieferanten zurückgegriffen werden. Jedoch sollten vom Lieferanten im Angebot Angaben zu den einzelnen Punkten gefordert werden. Ansonsten kann ein objektiver Angebotsvergleich nicht durchgeführt werden.

2.3.1 Betankungsanlage und Dispenser

Betankungsanlage und Dispenser müssen die Versorgung der Flurförderzeugflotte mit Wasserstoff gewährleisten. Dabei kann eine bestimmte Verfügbarkeit der Anlage gefordert werden. Hohe Verfügbarkeiten von 97 bis 100 Prozent bedeuten in den meisten Fällen eine redundante Ausführung mehrerer Funktionselemente. Als Folge steigt die Investition für die Anlage. Organisatorische Notfallkonzepte, wie z.B. direktes Überströmen vom Wasserstoffspeicher in das Flurförderzeug, können kürzere Ausfall bzw. Reparaturzeiten überbrücken. Somit können Notfallkonzepte als eine Alternative für eine fest vorgeschriebene Verfügbarkeit gesehen werden. Verfügbarkeiten und Notfallkonzepte sollten noch während der Angebotsphase mit dem Lieferanten besprochen und definiert werden.

Neben der Verfügbarkeit ist die Auslegung bestimmter Funktionselemente wie z. B. den HD-Speicher der Betankungsanlage und die Leistung des Verdichters entscheidend für die Versorgung der Flurförderzeuge. Werden z.B. mehrere Flurförderzeuge direkt hintereinander befüllt, muss der HD-Speicher entsprechend ausgelegt werden. Ist dies nicht der Fall, können die Flurförderzeuge bei einem Druckabfall im HD-Speicher unter den Betankungsdruck der Flurförderzeuge,

nur noch direkt aus dem Verdichter befüllt werden. Längere Betankungszeiten sind die Folge. Der Verdichter hingegen muss mindestens die Menge des täglichen Wasserstoffverbrauchs über den gesamten Tag (24 h) auf das Druckniveau des HD-Speichers verdichten können. Liegt seine Verdichterleistung nur leicht unter dem täglichen Wasserstoffverbrauch kann es dazu führen, dass Flurförderzeuge nicht voll befüllt werden können bzw. für eine optimale Befüllung die Flurförderzeuge nur zu vorher definierten Tankzeiten befüllt werden dürfen. Folglich sollte der Verdichter anhand des täglichen Verbrauchs und der zeitlichen Verteilung der Betankungen bzw. der Spitzenlasten ausgelegt sein.

Die Verbindung zwischen dem HD-Speicher, der Betankungsanlage und dem Dispenser gilt es so einfach wie möglich zu gestalten. Eine gerade Streckenführung ohne Kurven ermöglicht einen einfachen Einsatz von sogenannten Endlosrohren. Diese werden aufgerollt angeliefert und vor Ort abgerollt. Durch den Einsatz von Endlosrohren können Schweiß- oder Schraubverbindungen, welche aufwendig geprüft bzw. überwacht werden müssen, vermieden werden.

Der Wasserstoffspeicher muss anhand des täglichen Verbrauchs an Wasserstoff und der gewünschten Lieferhäufigkeit durch Wasserstofftrailer ausgelegt werden. Durch einen Fernwartungszugriff kann der Lieferant selbstständig den Zeitpunkt einer notwendigen Befüllung des Wasserstoffspeichers erkennen. Die Verantwortung der Wiederbeschaffung ist mit dem Lieferanten zu klären.

Sind die Schnittstellen zum Flurförderzeug für Betankung und Kondensat-Entnahme bereits definiert, sollten diese dem Hersteller mitge-

teilt werden. Im Bereich von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen entspricht die Füllkupplung „TK 16 ohne Datenschnittstelle“ der Firma Weh dem internationalen Standard und wird auch im Projekt H2IntraDrive eingesetzt. Der Betankungsdruck der jeweiligen Flurförderzeugtypen ist aufzuführen. Für die Kondensat-Entnahme wird im Projekt H2IntraDrive die Kupplung „Rectus 25SBTS10 MVN“ eingesetzt. Hierfür gibt es keinen Standard, jedoch ist die Verwendung einer schnell verfügbaren Kupplung zu empfehlen. Die anfallende Menge an Kondensat sollte dem Lieferanten mitgeteilt werden. Zudem gilt es bei der Auslegung der Kondensatabsaugung sicherzustellen, dass die bei einer Betankung maximal anfallende Kondensatmenge innerhalb der Betankungszeit abgesaugt werden kann.

Für den Betrieb der Anlage bedarf es je nach Anwendung Strom, Druckluft und einen Internetzugang/ISDN-Leitung (Fernwartung). Bereits vorhandene Angaben oder Restriktionen sollten in der Angebotspezifikation beachtet werden.

Des Weiteren bedarf es an Spezifikationen, welche Teile der Betankungsanlage Indoor oder Outdoor (→ Winterfest) aufgestellt werden. Für die gesamte Anlage wird die Verwendung von schnell verfügbaren Ersatzkomponenten empfohlen.

2.3.2 Wasserstoffversorgung

Die benötigte Wasserstoffqualität ist mit den Flurförderzeug- bzw. Brennstoffzellensystemlieferanten zu klären. Die Reinheitsklassen, wie z. B. 5.0 (99.999 %) und 6.0 (99,9999 %) sind keine technischen Spezifikationen sondern ein Verkaufssynonym. Der Lieferant bestimmt nach eigenen Vorgaben Inhaltsstoffe im Wasserstoff und schließt daraus auf die Reinheit des Wasserstoffes,

d. h. Stoffe die nicht gemessen werden sind nicht im Datenblatt des Wasserstoffes angeführt. Würde somit nur CO (Kohlenstoffmonoxid) gemessen, dürfte der Anteil bei 5.0 Wasserstoff 10 ppm CO betragen. Diese hohe Konzentration würde zu einer Vergiftung der Brennstoffzelle führen. Infolgedessen wurde die Norm SAE J 2719 entwickelt. Diese reguliert den Anteil bestimmter Stoffe wie z.B. S (Schwefel) und CO. Jedoch können die vorgeschriebenen Grenzwerte analytisch nur aufwendig bzw. aktuell nicht nachgewiesen werden. Dadurch muss den Angaben des Lieferanten häufig vertraut werden.

Wasserstoff gilt heute bei vielen als „grüner“ Kraftstoff. Jedoch kann Wasserstoff nur bedingt CO₂ frei hergestellt werden. Mittlerweile bietet der TÜV SÜD eine Zertifizierungsmethode zur Erzeugung von grünem Wasserstoff (TÜV SÜD Standard CMS 70) an. Dabei erhält z.B. Wasserstoff, welcher durch Pyro-Reforming von Glycerin hergestellt wird und damit 35 Prozent geringeren Treibhausgas-Emissionen gegenüber konventionell hergestelltem Wasserstoff (Herstellung durch Steam Reforming) aufweisen, die TÜV Zertifizierung. Das zu erreichende Einsparpotenzial bei diesem Herstellungsverfahren steigt im Jahr 2017 auf 50 und im Jahr 2018 auf 60 Prozent. Wird Wasserstoff hingegen durch Elektrolyse gewonnen, liegt der Wert bei 75 Prozent und verändert sich nicht.

Um Verwechslungen zwischen Normkubikmeter und Kubikmeter zu entgehen empfiehlt es sich die Wasserstoffmenge bzw. -preis in Kilogramm-Angaben zu verhandeln.

2.3.3 Betreibermodell

Für die Anschaffung der Wasserstoffinfrastruktur gibt es im Wesentlichen drei ver-

schiedene Möglichkeiten:

- Kaufen
- Mieten
- „Pay at the pump“

Die Vor- bzw. Nachteile von Kaufen und Mieten, wie z.B. Invest, Haftungsfragen und Wartungsaufwand, werden hier nicht weiter erörtert. Bei der Zahlungsmodalität „Pay at the pump“ (auf Deutsch „zahle an der Zapfsäule“) bezahlt der Kunde einen vorher definierten Wasserstoffpreis. Dieser beinhaltet bereits die Miete der Wasserstoffinfrastruktur. Zu beachten ist, dass die in Kapitel 4 beschriebenen behördlichen Genehmigungen und die damit verbundenen Gutachten immer erstellt werden müssen, egal ob gekauft, gemietet oder bei „pay at the pump“. Zudem gilt es, mögliche Aufwände für den Betreiber bzw. Kunden mit dem Lieferanten zu klären. So kann z. B. ein täglicher Kontrollgang erforderlich sein.

2.3.4 Service und Wartung

Bei einer Störung der Wasserstoffinfrastruktur können die Flurförderzeuge nicht betankt werden. Ein Ausfall der gesamten Flotte ist die Folge. Um dem entgegenzuwirken kann z.B. vom Hersteller eine definierte Verfügbarkeit der Anlage gefordert werden. Infolgedessen könnten einzelne Elemente der Anlage redundant ausgelegt werden wodurch jedoch höhere Investitionen notwendig werden. Eine Alternative hierzu ist die Vereinbarung von schnellen Reaktionszeiten bei Ausfällen im Service- und Wartungsvertrag um die Stillstandszeit zu verkürzen.

Für eine spätere Vergleichbarkeit der Angebote empfiehlt es sich, eine detaillierte Auflistung des Service und Wartungsumfanges inkl. der anfallenden Kosten einzufordern.

2.3.5 Zugelassene Überwachungsstelle

Im Rahmen der für den Betrieb der Wasserstoffinfrastruktur, aber auch der Flurförderzeuge notwendigen Genehmigungen müssen verschiedene Gutachten erstellt und Prüfungen durchgeführt werden, wie z.B. Gefährdungsbeurteilung, EX-Schutz Dokument und Prüfung vor Inbetriebnahme. Hierfür muss jeweils eine zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS), wie z. B. TÜV Süd (bei H2IntraDrive) benannt werden. Aufgrund der Komplexität und des Neuigkeitsgrades der Wasserstofftechnologie wird eine Zusammenarbeit mit einer einzigen ZÜS empfohlen. Dabei sollen Erfahrungswerte der im Projekt involvierten Lieferanten mit berücksichtigt werden. So kann eine ZÜS z.B. geringere Auflagen fordern als eine andere. Nach der Festlegung sollte die Zusammenarbeit mit der definierten ZÜS dem Wasserstofflieferanten aber auch dem Flurförderzeuglieferanten empfohlen werden. Wesentlicher Vorteil ist eine Schnittstellenreduzierung und somit ein einfacheres und schnelleres Genehmigungsverfahren bei der ZÜS.

2.4 Auftragsvergabeprozess

Nachdem die in Kapitel 2.3 beschriebenen Wasserstoffinfrastrukturspezifikationen definiert wurden, werden diese in den Ausschreibungsspezifikationen bzw. Lastenheft übersichtlich zusammengefasst und an die Hersteller versendet. Nach Erhalt der Angebote sollten diese gegenübergestellt werden. In der Angebotspräsentation kann anschließend auf eventuelle offene Punkte eingegangen werden. Nachdem alle Angebote vergleichbar und komplett sind, wird der Auftrag nach entsprechenden Verhandlungen an einen Lieferanten vergeben.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht kann die Wasserstoffinfrastruktur und die Wasserstoffversorgung getrennt betrachtet werden. Eine getrennte Vergabe kann jedoch auch zu Problemen führen. So muss bei einem Ausfall von mehreren Brennstoffzellensystemen durch Wasserstoffverunreinigungen der fehlerhafte Prozessschritt bestimmt werden. Ein vollständiger Nachweis, inwiefern der Wasserstoff bereits verunreinigt angeliefert oder durch die Wasserstoffinfrastruktur kontaminiert wurde, ist oft schwierig zu erbringen. Die Folge könnte ein Rechtsstreit sein.

Erstellung Ausschreibungsspezifikationen

Neben der in Kapitel 2.3 beschriebenen Wasserstoffinfrastrukturspezifikationen sollen folgende Punkte im Angebot des Lieferanten zu finden sein bzw. gefordert werden:

- Verbindlicher Angebotspreis
- Verfahrensschema, aus dem die Liefergrenze hervorgeht
- Aufstellungsvorschlag für Infrastruktur
- Terminplan von Bestellung bis Inbetriebnahme
- Unterstützung bei behördlichen Genehmigungen (siehe Kapitel 4.2)
- Angebot, Bedienungsanleitung und Dokumentation in gewünschter Sprache (z. B. Deutsch).

Für die Festlegung von konkreten Entscheidungen können im Angebot verschiedene Szenarien eingefordert werden. So kann z.B. ein Angebotspreis für einen Kauf der Wasserstoffinfrastruktur in Verbindung mit der Wasserstoffbelieferung gefordert werden. Zeitgleich kann aber auch ein Angebotspreis für den Kauf der Wasserstoffinfrastruktur ohne Wasserstoffbelieferung und eine Wasserstoffbelieferung ohne Wasserstoffinfrastrukturkauf gefordert werden.

2.5 Infrastrukturaufbau

Nachdem der Lieferant mit der Herstellung der Wasserstoffbetankungsanlage beauftragt worden ist und bevor mit dem eigentlichen Betrieb der Anlage begonnen werden kann, muss die Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut werden. Hierfür sollen alle für die baulichen Maßnahmen notwendigen Unterlagen (z.B. Aufstellflächen und Medienanschlüsse) beim Hersteller eingefordert werden. Auf deren Basis gilt, es eine erste Entwurfsplanung zu erstellen und Angebote für die Durchführung der baulichen Arbeiten einzuholen. Nach Erstellung der Ausführungsplanung und dem Erhalt der Baugenehmigung (siehe 4.3.3) können die baulichen Vorbereitungen durchgeführt werden. Diese werden in Kapitel 2.5.1 beschrieben. Nachdem diese abgeschlossen sind und die Genehmigung für den Aufbau der Betankungsanlage (siehe 4.3) erteilt wurde, kann mit dem Aufbau der eigentlichen Wasserstoffinfrastruktur und dem ersten Testbetrieb begonnen werden (siehe Kapitel 2.5.2). Abschließend muss vor der Inbetriebnahme die „Prüfung vor Inbetriebnahme“ durch die ZÜS durchgeführt werden (siehe Kapitel 2.5.3).

2.5.1 Bauliche Maßnahmen

Bei den baulichen Maßnahmen müssen alle notwendigen Leistungen für den späteren Aufbau der Betankungsanlage, Dispenser und Wasserstoffspeicher erbracht werden. Folgend werden die im Rahmen des Projektes H2IntraDrive durchgeführten baulichen Maßnahmen beschrieben.

Im Rahmen des Bauvorhabens der Aufstellfläche für Betankungsanlage und Wasserstoffspeicher sowie der unterirdischen Verbindung der Betankungsanlage mit dem Dispenser wurden zu Beginn Aushubarbei-

ten und Leitungsverlegungen durchgeführt. Folgende Rohre wurden dabei in der Erde verlegt:

- 2 Leerrohre für Starkstrom, Schwachstrom, Datenkabel und Brandmeldeanbindung
- 3 HD-Leitungen für Wasserstoffzuführung und -rückführung sowie Druckluft

Des Weiteren wurden notwendige Arbeiten wie Sicherstellung der Entwässerung und Berücksichtigung von notwendigen Potenzialausgleichsanschlüssen durchgeführt. Anschließend konnte der Beton für die Bodenplatte gegossen werden. Die Ausführung in Beton war aufgrund der besseren elektrischen Ableitfähigkeit bzw. den Potenzialausgleich gegenüber Asphalt notwendig. Bei der Ausführung der Bodenplatte wurden unter anderem folgende Punkte berücksichtigt:

- Aufstellfläche für Betankungsanlage und Wasserstoffspeicher
- Fläche für Wasserstoffanlieferung durch Trailer inkl. Aufkantung für Anfahrerschutz der Betankungsanlage
- Umzäunung der Betankungsanlage, wobei das Umlaufen aller Anlagenteile möglich sein soll
- Rampe und Wendepplatz für Gabelstapler, welcher beim Aufbau der Anlage notwendig ist

Nach der Fertigstellung der Bodenplatte konnte die Umzäunung der Betankungsanlage und des Wasserstoffspeichers aufgebaut werden. Hierbei wurden zwei Zweiflügel-Tore für den Zugang mit dem Gabelstapler sowie den Austausch des Stickstofflagers (wird als Druckluftversorgung für Betankungsanlage verwendet) und eine Einflügel-Tür für die Trailerbefüllung in den Zaun integriert. Der Zaun stellt zudem einen zu-

sätzlichen Anfahrerschutz für die Betankungsanlage dar.

Hinsichtlich der baulichen Maßnahmen im Bereich des Dispensers musste ein Anfahrerschutz durch Leitplanken realisiert werden. Zudem war aufgrund der schlechten Ableitfähigkeit des Hallenbodens das Anbringen einer Metallplatte, auf welcher die Flurförderzeuge während der Betankung stehen, notwendig. Zur Sicherstellung des selben Potenzials zwischen Betankungsanlage und Metallplatte wurden diese durch ein Potenzialausgleichskabel verbunden. Weitere Maßnahmen, welche z.B. durch die Explosionenschutz-Zone (EX-Zone) um den Dispenser notwendig sein könnten, waren aufgrund der gewählten Lage abseits von elektrischen Anlagen nicht erforderlich.

Abschließend folgt eine Auflistung aller Medienanschlüsse inkl. Bereitstellungsort, welche vom Wasserstoffinfrastrukturlieferanten gefordert und von Seiten des Wasserstoffinfrastrukturbetreibers bereitgestellt wurden:

- Druckluftanschluss in der Werkshalle für Dispenser,
- Entwässerungsanschluss in der Werkshalle für das Kondensatwasser
- Starkstromanschluss bei der Aufstellfläche Betankungsanlage
- Datenanschluss für Fernwartung bei der Aufstellfläche Betankungsanlage
- Anbindung Brandmeldezentrale bei der Aufstellfläche Betankungsanlage

2.5.2 Aufbau der Betankungsanlage

Bevor mit dem Aufbau der Betankungsanlage begonnen werden kann, muss in einem vor Ort Termin der Wasserstoffinfrastrukturlieferant die baulichen Gegebenheiten prüfen. Eine positive Prüfung stellt zum einen den Abschluss der baulichen Maßnahmen

und zum anderen den Start für den Aufbau der Betankungsanlage dar. Ferner muss für den Infrastrukturaufbau, wie bereits in Kapitel 2.5 erwähnt, die behördliche Genehmigung vorliegen. Anlieferung und Montage der Anlage wird gänzlich durch den Wasserstoffinfrastrukturlieferanten durchgeführt. Von Seiten des Auftraggebers müssen lediglich der Zugang für das Montagepersonal und eventuelle Einfuhrerlaubnisse erteilt werden.

2.5.3 Inbetriebnahme

Nachdem die baulichen Maßnahmen und der Aufbau der Betankungsanlage abgeschlossen sind, erfolgt nach BetrSichV §14 eine Prüfung vor Inbetriebnahme durch einen Sachverständigen der ZÜS. Hierfür müssen alle von der ZÜS geforderten Sicherheitskonzepte (siehe Kapitel 5) umgesetzt sein. Andernfalls können Nachforderungen ausgesprochen werden. Bis zur Umsetzung dieser kann eine vorläufige Betriebserlaubnis erteilt werden. Bei gravierenden Mängeln kann die Betriebserlaubnis verweigert und erst nach Nachbesserungen erteilt werden. Vor der Durchführung ist eine Prüfung von Notaus-Schaltern, Brand- und Gasaustrittsmeldern zu empfehlen. Ferner kann die Aufschaltung der Störmeldungen auf das Feuerwehroleitsystem geprüft werden.

Für die Durchführung der Prüfung vor Inbetriebnahme sollten Vertreter des Herstellers der Anlage, des Betreibers (Projektleiter, Sicherheitsverantwortlicher) und der Feuerwehr anwesend sein. Folgend eine beispielhafte Beschreibung des Ablaufs der Prüfung vor Inbetriebnahme, wofür ca. fünf Stunden benötigt werden:

- Kontrolle des Typenschildes der Anlage/Baugruppe

- Erklärung der Anlagenfunktionsweise durch Hersteller
 - Von Wasserstoffspeicher bis Dispenser
 - Typenschilder von einzelnen Bauteilen werden protokolliert
- Prüfung der Brandmelder
- Prüfung der Notausschalter
- Durchführung Probebetankung
- Anbringen des Prüfsiegels
- Erstellung der Betriebserlaubnis

Anlage. Somit können die H₂-Flurförderzeuge eingesetzt und betankt werden. Die wiederkehrenden Prüfungen nach BetrSichV §15 erfolgt jährlich durch die ZÜS.

Die Erstellung und der Erhalt der Betriebserlaubnis sind der offizielle Betriebsstart der

2.6 Checkliste für die Inbetriebnahme der Wasserstoffinfrastruktur

- Welche Spezifikationen gibt es für Betankungsanlage und Dispenser?
- Welche Spezifikationen gibt es für die Wasserstoffversorgung?
- Wer ist der Betreiber der Wasserstoffinfrastruktur?
- Wurden die Ausschreibungsspezifikationen erstellt und an potenziellen Lieferanten ausgeschrieben?
- Welche Lieferanten werden für eine Angebotspräsentation eingeladen?
- Liegen alle notwendigen Informationen für ein Angebotsvergleich vor?
- An wen wird der Auftrag für die Wasserstoffinfrastruktur vergeben?
- An wen wird der Auftrag für die Wasserstoffversorgung vergeben?
- Welche baulichen Maßnahmen müssen berücksichtigt werden?
- Wurde das Vorhaben mit der Werksfeuerwehr abgestimmt?
- Sind alle baulichen Maßnahmen abgeschlossen und kann mit dem Aufbau der Betankungsanlage begonnen werden?
- Liegen alle notwendigen Dokumente vor und ist der Aufbau bzw. Test der Anlage und Sicherheitsmaßnahmen abgeschlossen?
- Welche Auflagen ergaben sich während der Prüfung vor Inbetriebnahme nach BetrSichV §14?
- Wurden die Auflagen aus der Prüfung vor Inbetriebnahme nach BetrSichV §14 umgesetzt?

3 Flurförderzeuge

Mit Hilfe des in Kapitel 1 beschriebenen Vorgehens wurden Anzahl und Typ der Flurförderzeuge definiert. Darauf aufbauend kann mit der Planung bzw. Umsetzung der wasserstoffbetriebenen Flurförderzeuge begonnen werden. Hierfür werden in Kapitel 3.2 der Aufbau und die Funktionsweise der Flurförderzeuge inklusive Brennstoffzellen aufgezeigt. Ferner werden in den Kapiteln 3.3 bis Kapitel 3.5 notwendige Arbeiten bzw. Abläufe von der Flurförderzeugspezifikation bis zur Inbetriebnahme der Flurförderzeuge beschrieben sowie weitere Hinweise gegeben. Der Terminplan angelehnt an den Erfahrungen aus H2IntraDrive in Kapitel 3.1 und die Checkliste in Kapitel 3.6 runden die in diesem Kapitel beschriebenen Tätigkeiten ab.

3.1 Terminplan

Aufgabe	Monat 1	Monat 2	Monat 3	Monat 4	Monat 5	Monat 6	Monat 7	Monat 8	Monat 9	Monat 10
Definition Flurförderzeugspezifikationen	■									
Ausschreibung	■	■								
Angebote Lieferanten einholen		■	■							
Angebotsverhandlung und Vergabe		■	■							
Lieferzeit Flurförderzeuge & Brennstoffzellen			■	■	■	■	■	■	■	■
Inbetriebnahme Flurförderzeug										■

Abb. 3-1: Terminplan Flurförderzeuge

3.2 Aufbau und Funktionsweise

Wasserstoffbetriebene Flurförderzeuge können im Wesentlichen durch zwei Unterscheidungsmerkmale von batteriebetriebenen Flurförderzeugen differenziert werden. Der größte und signifikanteste Unterschied ist der Austausch des Bleiakкумуляtors durch das Brennstoffzellensystem (siehe Kapitel 3.2.1). Der zweite Unterschied liegt in der eventuell benötigten Anpassung bzw. Vorbereitung des Flurförderzeuges für den Betrieb mit einem Brennstoffzellensystem (siehe Kapitel 3.2.2).

3.2.1 Brennstoffzellensystem

In der Brennstoffzelle des Brennstoffzellensystems reagiert Wasserstoff mit Sauerstoff, dabei entsteht Strom und das sogenannte Kondensat (H_2O). Der Wasserstoff wird hierfür in einem Tank bei maximal 350 bar im Brennstoffzellensystem gelagert und der Sauerstoff der Luft entzogen. Die gewonnene elektrische Energie treibt anschließend

das Flurförderzeug an bzw. wird in einer Lithium-Ionen-Batterie zwischengespeichert. Diese dient zum Abfangen von Leistungsspitzen und ermöglicht einen möglichst konstanten, im optimalen Betriebspunkt liegenden Betrieb der Brennstoffzelle. Das während der chemischen Reaktion entstandene Kondensat wird, je nach Ausführung des Brennstoffzellensystems, in einem Tank aufgefangen und bei der Betankung abgesaugt oder direkt in der Brennstoffzelle verdampft. Neben den bereits erwähnten Komponenten besteht das Brennstoffzellensystem zudem aus verschiedenen Pumpen, dem Kühlsystem und der Regelungstechnik. Diese ermöglichen einen vollkommen eigenständigen Betrieb. Es entsteht ein autarkes, sich selbstregelndes, System.

Um eine Integration der Brennstoffzellensysteme in Flurförderzeuge zu vereinfachen, werden Abmessungen und Gewicht der Brennstoffzellensysteme den sonst verwen-

deten Batterien angepasst. Für die Anpassung des Gewichtes müssen zum Teil Zusatzgewichte in das Brennstoffzellensystem integriert werden.

3.2.2 Flurförderzeug

Je nach Bauart des Flurförderzeuges sind für einen Betrieb mit Brennstoffzellensystem mehr oder weniger umfangreiche Chassis-Anpassungen notwendig. So müssen eventuell die Batterietür verändert sowie Lüftungsschlitze und eine Serviceklappe in-

tegriert werden. Ergänzend wird ein Brennstoffzellen-Display mit allen wichtigen Informationen über das Brennstoffzellensystem im Fahrerraum angebracht. Des Weiteren können eventuelle Sicherheitsmaßnahmen, wie z.B. eine Wegfahrsperrung während der Betankung, zusätzliche Eingriffe in das Flurförderzeug mit sich bringen. In der folgenden Abbildung 3-2 ist ein Flurförderzeug (Gegengewichtsstapler) im Einsatz im CFK-Karosseriebau bei BMW dargestellt.



Abbildung 3-2: Gegengewichtsstapler im H2IntraDrive Projekt

3.3 Spezifikationen

Für die spätere Ausschreibung der wasserstoffbetriebenen Flurförderzeuge müssen zuvor detaillierte Spezifikationen der gewünschten Flurförderzeuge erstellt werden. Hierfür ergeben sich aus dem in Kapitel 1.1 definierten Anwenderszenario folgende Kriterien:

- Benötigte Flurförderzeugtypen z. B. Gegengewichtsstapler, Schlepper
- Anzahl an Flurförderzeugen je Typ
- Technische Spezifikationen z. B. Hubhöhe, max. Traglast
- Einsatzgebiet

Des Weiteren müssen Spezifikationen zu folgenden Themenbereichen definiert und somit im Angebot des Lieferanten gefordert werden:

- Umrüstung vs. Neuanschaffung
- Ausstattung des Flurförderzeuges
- Schnittstellen zur Umgebung bzw. Wasserstoffinfrastruktur
- Sicherheitskonzepte (siehe Kapitel 5.2)
- Service und Wartung

3.3.1 Umrüstung oder Neuanschaffung Flurförderzeuge

Grundsätzlich gibt es folgende zwei Arten für eine Umstellung von batteriebetriebenen auf wasserstoffbetriebene Flurförderzeuge:

- Umrüstung bestehender Flurförderzeuge
- Neuanschaffung eines wasserstoffbetriebenen Flurförderzeuges

Umrüstung

Bei diesem Lösungsansatz wird bei einem bestehenden batteriebetriebenen Flurförderzeug die Batterie durch ein Brennstoffzellensystem ersetzt. Infolgedessen ist ein

Austausch des kompletten Flurförderzeuges hinfällig. Ein geringerer Invest für die Umstellung hinsichtlich Wasserstofftechnologie ist die Folge. In den USA wird dieses Vorgehen bereits seit mehreren Jahren angewendet. In Europa muss aufgrund der Maschinenrichtlinie der Einsatz eines Brennstoffzellensystems im Flurförderzeug durch den Hersteller des Fahrzeuges freigegeben werden. Inwiefern eine Umrüstung inkl. Freigabe des Fahrzeuges durch den Hersteller möglich ist, sollte aufgrund des deutlich geringeren Invests mit den Flurförderzeug- bzw. Brennstoffzellensystemlieferanten diskutiert werden. Dabei gilt es eine Abwägung der Vor- und Nachteile, die durch eine solche Umstellung entstehen können, zu beachten.

Neuanschaffung

Im Gegensatz zur vorher beschriebenen Umrüstung wird bei einer Neuanschaffung das bereits vorhandene Fahrzeug ersetzt. Wesentlicher Vorteil dabei ist eine optimale Abstimmung des Brennstoffzellensystems auf das Flurförderzeug und eine mögliche Integration von zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen.

Bei beiden Arten gilt es, Notfalllösungen bei möglichen Ausfällen der Brennstoffzellensysteme mit zu berücksichtigen. Ein Tausch des defekten Systems mit einem Ersatzbrennstoffzellensystem oder einer Batterie könnten mögliche Lösungen darstellen. Es ist zu beachten, dass die Flurförderzeuge für einen Tausch des Brennstoffzellensystems mit einer Batterie ausgelegt sein müssen.

3.3.2 Flurförderzeugausstattung

Aus dem geplanten Einsatzgebiet des Flurförderzeuges ergeben sich bereits Anforderungen an die Ausstattung des Fahrzeuges. Dies können beim Gabelstapler z. B. Zinkenlänge oder Hubmastausstattung

sein. Ferner gilt es, spätere Anbauten durch den Betreiber zu spezifizieren. Als Beispiele können hier Terminals und Scanner genannt werden. Als weiterer wichtiger Punkt sollten Ausstattungsmöglichkeiten, welche einen sicheren Umgang mit dem Flurförderzeug ermöglichen, mit betrachtet werden. Besonders hervorzuheben ist dabei eine mögliche Wegfahrsperre bei angeschlossener Betankungskupplung.

3.3.3 Schnittstellen

Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben sind die Schnittstellen zwischen Brennstoffzellensystem und Wasserstoffinfrastruktur abzustimmen. Diese sind Betankungskupplung und je nach Brennstoffzellenfunktionsweise Kondensatkupplung. Die genaue Definition der Spezifikationen sollte in Abstimmung mit den Lieferanten getroffen werden. Zusätzlich zu den Schnittstellen zur Infrastruktur sollten Schnittstellen, die sich aus in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Anbauten wie z. B. 12 V-Stecker für Terminal und Scanner ergeben, definiert werden.

Abschließend sind noch Schnittstellen, welche sich aus Sicherheitsaspekten ergeben können, zu nennen. Z.B. muss das Flurförderzeug vor elektrostatischer Aufladung und daraus resultierender Entladungen geschützt werden. Dies kann vor allem beim Ansetzen der Betankungskupplung zu einer Gefährdung führen. Infolgedessen empfiehlt es sich, ableitfähige Reifen zu verwenden. Im Projekt H2IntraDrive wurden zusätzliche Erdungsbänder unterhalb des Fahrzeuges angebracht, welche während der Betankung für einen Potenzialausgleich über die in Kapitel 5.1.5 beschriebene Metallplatte garantieren.

3.3.4 Service und Wartung

Flurförderzeugausfälle können zu Versorgungsengpässen in der Materialbereitstel-

lung bzw. -versorgung führen. Infolgedessen müssen Notfallkonzepte erstellt werden. Zum einen kann bei einem Brennstoffzellensystemausfall durch vorgehaltene Ersatzsysteme schnell und einfach getauscht werden. Zum anderen durch die Vereinbarung einer schnellen Reaktionszeit im Service- und Wartungsvertrag zeitnahe auf Ausfälle reagiert werden. Die ideale Lösung ist je nach Anwendung zu bestimmen.

Für eine spätere Vergleichbarkeit der Angebote empfiehlt es sich, eine detaillierte Auflistung des Service und Wartungsumfanges inkl. Kosten einzufordern. Zudem soll die Durchführung der Brennstoffzellenwartung spezifiziert werden, d.h. führt diese der Flurförderzeughersteller oder der Brennstoffzellensystemhersteller durch.

3.4 Auftragsvergabeprozess

Die in Kapitel 3.3 definierten Brennstoffzellensystem- bzw. Flurförderzeugspezifikationen müssen für die Ausschreibung in einem Lastenheft bzw. als Spezifikationen zusammengefasst werden. Diese werden an die ausgewählten Lieferanten versendet. Nach Erhalt aller Angebote ist eine Gegenüberstellung durchzuführen, um eventuelle offene Punkte in den Angebotspräsentationen klären zu können. Anschließend kann mit den Angebotsverhandlungen und der Vergabe begonnen werden.

Erstellung Ausschreibungsspezifikationen

Zusätzlich zu der in Kapitel 3.3 definierten Brennstoffzellensystem- bzw. Flurförderzeugspezifikationen gilt es folgende Punkte im Rahmen des Angebotes vom Lieferanten zu fordern:

- Verbindlicher Angebotspreis
- Terminplan von Bestellung bis Inbetriebnahme
- Unterstützung bei behördlichen Genehmigungen (siehe Kapitel 4.2)
- Angebot, Bedienungsanleitung und Dokumentation in gewünschter Sprache (z. B. Deutsch)

Hinsichtlich Lebensdauer des Brennstoffzellensystems können aktuell keine fundierten Aussagen getroffen werden. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Wasserstofftechnologie bei Flurförderzeugen spielt diese jedoch eine wesentliche Rolle. Infolgedessen könnte eine definierte Mindestlebensdauer des Brennstoffzellensystems vertraglich gefordert werden. Als möglicher Anhaltspunkt kann die Lebensdauer eines Bleiakкумуляtors für Flurförderzeuge herangezogen werden. Bei idealen Ladebedingungen wird dabei von ca. 1.000 Ladungszyklen bzw. acht- bis zehntausend Betriebsstunden ausgegangen.

3.5 Inbetriebnahme

Vor der Inbetriebnahme der Fahrzeuge gilt es, die laut Betriebsanleitung beschriebenen Serviceumfänge und Überprüfungen vor Erstinbetriebnahme durchzuführen. Zusätzlich müssen für den Transport geschlossene Sicherheitsventile geöffnet werden. Typisches Beispiel hierfür ist das Sicherheitsventil des Wasserstofftanks.

Für die Inbetriebnahme der Flurförderzeuge sind keine speziellen Prüfungen einer ZÜS notwendig, da diese bereits vom Hersteller mit EG-Konformitätserklärung und CE-Kennzeichnung angeliefert werden. Infolgedessen unterlagen die Fahrzeuge bereits einer Prüfung eines Sachverständigen der ZÜS. Jedoch werden diese im Rahmen der in Kapitel 2.5.3 beschriebenen Prüfung vor Inbetriebnahme der Wasserstoffinfrastruktur nach BetrSichV §14 für die Durchführung der Probebetankung benötigt.

Im Rahmen der Inbetriebnahme sollten bereits erste Flurförderzeugfahrer im sicheren Umgang mit den Fahrzeugen unterwiesen sein.

3.6 Checkliste für die Inbetriebnahme der Flurförderzeuge

- Welche Spezifikationen gibt es für die Flurförderzeuge?
- Welche zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen (z. B. Wegfahrsperrung) am Flurförderzeug werden benötigt?
- Welche zusätzlichen Spezifikationen ergeben sich aus eventuellen Anbauten (z. B. Terminal) am Flurförderzeug?
- Wurden die Ausschreibungsspezifikationen erstellt und an potenzielle Lieferanten ausgeschrieben?
- Welche Lieferanten werden für eine Angebotspräsentation eingeladen?
- Liegen alle notwendigen Informationen für einen Angebotsvergleich vor?
- Werden die Flurförderzeuge neu angeschafft oder ist eine Umrüstung möglich?
- An wen wird der Auftrag für die Flurförderzeuge bzw. Brennstoffzellensysteme vergeben?
- Sind alle Schnittstellen zur Wasserstoffinfrastruktur abgestimmt?

4 Genehmigungen und Gutachten

Für den Betrieb der Wasserstoffinfrastruktur und der Flurförderzeuge bedarf es behördlicher Genehmigungen und Gutachten. Der dafür notwendige zeitliche Horizont wird in einem Terminplan in Kapitel 4.1 aufgezeigt. Darauf aufbauend wird in Kapitel 4.2 ein „ideales“ Vorgehen für die Abstimmung mit den Behörden beschrieben, wobei verschiedene Anwendungen unterschieden werden. Ferner werden in den Kapiteln 4.3 und 4.4 für die Umsetzung des Projektes H2IntraDrive erforderliche Genehmigungen und Gutachten erörtert. Abschließend sind in Kapitel 4.5 alle wichtigen, zu berücksichtigenden Punkte in einer Checkliste dargestellt.

4.1 Terminplan

Aufgabe	Monat 1	Monat 2	Monat 3	Monat 4	Monat 5	Monat 6
Erstellung und Einreichung BlmSchG-Antrag	■	■				
Prüfung auf Vollständigkeit des BlmSchG-Antrages durch Behörde		■	■			
Prüfung BlmSchG-Antrag			■	■	■	■
Erstellung Antrag für Erlaubnis nach BetrSichV		■				
Erstellung Brandschutzgutachten		■	■			
Erstellung Schallschutzgutachten		■	■			
Erstellung EX-Schutz-Dokument		■				
Erstellung Gefährdungsbeurteilung		■				

Abb. 4-1: Terminplan Genehmigungen und Gutachten

4.2 Genehmigungsprozess

Hinsichtlich der behördlichen Genehmigung für die Errichtung und den Betrieb der Wasserstoffinfrastruktur sowie Betrieb der Wasserstoffflurförderzeuge muss der Anwender zu Beginn klären, welche behördlichen Genehmigungen hierfür notwendig sind. Für den Anwendungsfall im Rahmen des Projektes H2IntraDrive waren dies Baugenehmigungen für die baulichen Maßnahmen der Wasserstoffinfrastruktur und eine Erlaubnis nach §13 der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV). Ferner müssen die Fragen hinsichtlich wesentlicher Beeinträchtigungen bzw. Auswirkungen auf Schutzgüter geklärt werden, welche eine Genehmigung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BlmSchG) zur Folge haben kann. In Abbildung 4-2 sind die möglichen Genehmigungsverfahren für H2-Flurförderzeugtankstellen nach BlmSchG aufgezeigt. Eine Erstgenehmigung nach §8 BlmSchG ist

nur dann erforderlich, wenn das Werk noch nicht nach BlmSchG genehmigt ist und am Standort mehr als drei Tonnen Wasserstoff gelagert werden. Bei der Anwendung von H2-Flurförderzeugen wird diese Menge in der Regel nicht überschritten. Für die Umsetzung des Forschungsprojektes H2IntraDrive war das Werk bereits nach BlmSchG genehmigt. Infolgedessen war eine Änderungsgenehmigung nach §16 BlmSchG notwendig. Im Vergleich hierzu ist eine Anzeige nach §15 BlmSchG mit einem geringeren Aufwand verbunden, jedoch müssen notwendige Genehmigungen wie z.B. Baugenehmigung und Erlaubnis nach BetrSichV gesondert beantragt werden. Eine Genehmigung nach §8 oder §16 der BlmSchG schließt diese bereits mit ein.

Nachdem die notwendigen behördlichen Genehmigungen definiert sind, gilt es frühzeitig ein Vorgespräch mit der Genehmi-

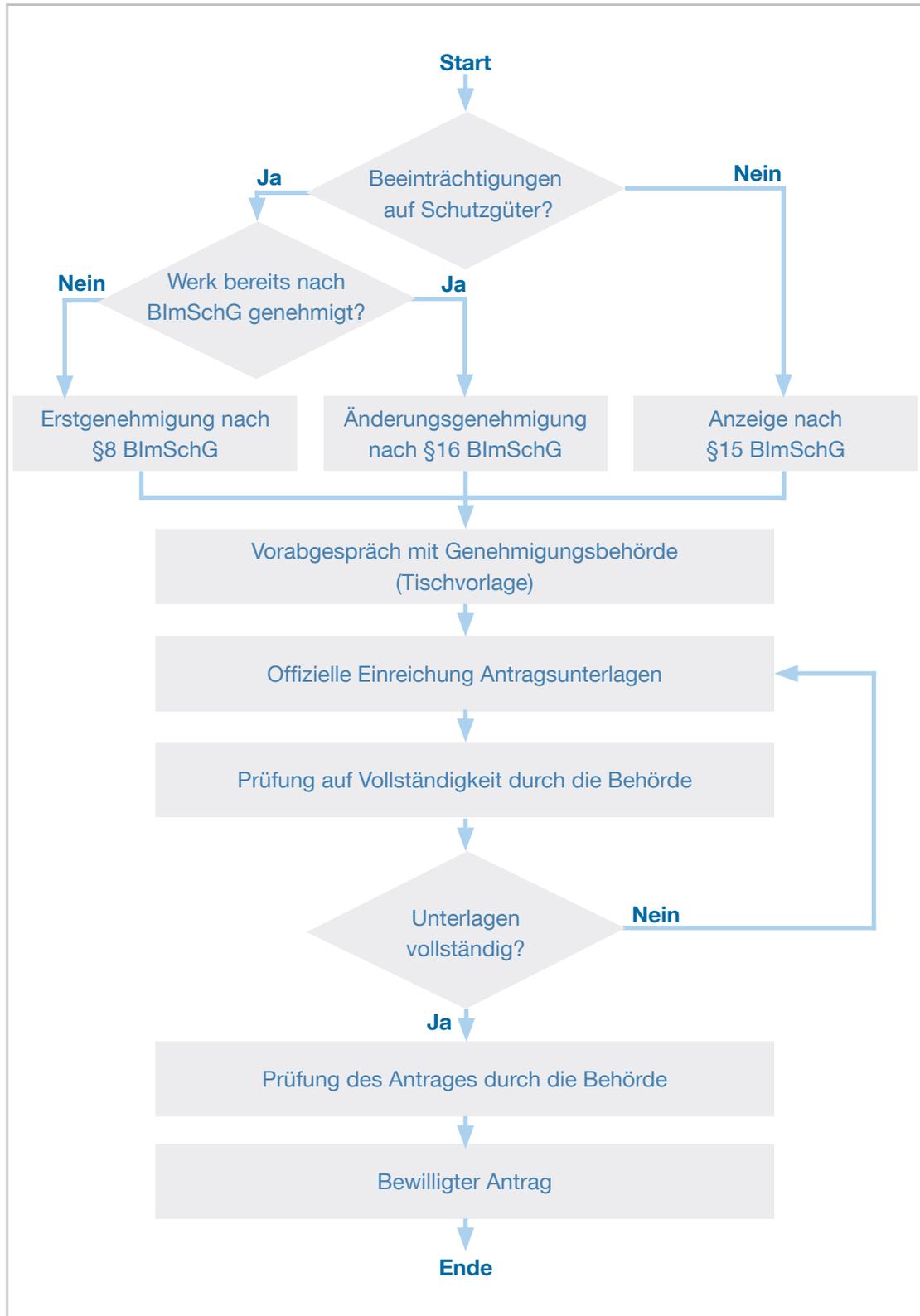


Abb. 4-2: Mögliche Genehmigungsverfahren für H2-Flurförderzeugtankstellen im Rahmen des BImSchG.

gungsbehörde zu vereinbaren. Dabei sollen das weitere Vorgehen wie z.B. effektive erforderliche Genehmigungen, Art des Genehmigungsverfahrens und die Terminschiene abgestimmt werden. Ferner kann auch eine Zulassung zum vorzeitigen Beginn nach §8a BImSchG, wodurch ein Errichten und Prüfen der Anlage vor Erhalt der endgültigen Genehmigung möglich ist, diskutiert werden. All diese Punkte sollten anhand einer sogenannten „Tischvorlage“, in der das Vorhaben skizziert ist, diskutiert werden. Darauf aufbauend kann mit der Erstellung der notwendigen Unterlagen begonnen werden. Nachdem diese eingereicht sind, hat die Behörde vier Wochen Zeit die Unterlagen auf Vollständigkeit zu prüfen. In den meisten Fällen ist mit Nachforderungen zu rechnen. Nachdem der Behörde alle Unterlagen vollständig vorliegen, hat diese bei normalen Umfängen, wie z.B. der Wasserstoffinfrastruktur für Flurförderzeuge, drei Monate Zeit, um den Bescheid zu prüfen. Diese Frist kann in Ausnahmefällen von drei auf sechs Monate verlängert werden.

Für die Antragserstellung der notwendigen Genehmigungen werden detaillierte Informationen und Dokumente des Wasserstoffinfrastruktur- und Flurförderzeuglieferanten benötigt. Diese sollen, wie bereits in den Kapiteln 2.4 und 3.4 beschrieben, von den Lieferanten frühzeitig gefordert bzw. deren Erstellung vertraglich festgelegt werden.

Abschließend ist anzunehmen, dass sich der behördliche Genehmigungsprozess je nach Bundesland unterscheiden kann und somit der Genehmigungsaufwand variiert.

4.3 Genehmigungen H2IntraDrive

Im Rahmen der Änderungsgenehmigung nach §16 BImSchG wurde im Projekt H2IntraDrive eine Zulassung zum vorzeitigen Beginn nach §8a BImSchG mit beantragt, wodurch das Errichten und Prüfen der Betankungsanlage vor Erhalt der endgültigen Genehmigung möglich war. Ferner wurde die Erlaubnis nach BetrSichV (siehe Kapitel 4.3.2) vom eigentlichen Genehmigungsprozess ausgekoppelt, separat erstellt und mit der Stellungnahme der ZÜS wieder eingekoppelt. Zudem wurden im Vorfeld eventuelle baurechtliche Maßnahmen berücksichtigt und geklärt, inwiefern diese im Rahmen der BImSchG Genehmigung notwendig sind. Dies führte zu einer getrennten Beantragung der Baugenehmigung (siehe Kapitel 4.3.3).

Sollte ein externes Planungsbüro für die Erstellung des Antrages der Änderungsgenehmigung nach §16 BImSchG beauftragt werden, ist eine gleichzeitige Vergabe der Erstellung des Antrages der Erlaubnis nach BetrSichV an dasselbe Planungsbüro empfehlenswert. Dadurch können bereits vorhandene Informationen und bestehendes Wissen genutzt werden und der Erstellungsaufwand der Erlaubnis nach BetrSichV deutlich reduziert werden.

4.3.1 Änderungsgenehmigung nach §16 BImSchG

Der Antrag für die Änderungsgenehmigung nach §16 BImSchG umfasst im Wesentlichen die Wasserstoffinfrastruktur und deren Schnittstellen zu anderen Anlagen oder Geräten. Die Struktur des Antrages ist dabei vom BImSchG vorgegeben und besteht aus 13 Kapiteln. Folgend werden diese zusammen mit beispielhaften, erforderlichen Informationen aufgezeigt:

- Kapitel 1: Antrag bzw. Allgemeine Angaben
 - Angaben zum Anlagenbetreiber
 - Standort und Umgebung der Anlage
 - Kurzbeschreibung des Vorhabens

- Kapitel 2: Anlagen-, Verfahrens- und Betriebsbeschreibung
 - Detaillierte Beschreibung des Vorhabens
 - Apparateaufstellungspläne und Apparatebeschreibung
 - Betriebsbeschreibung

- Kapitel 3: Stoffe, Stoffmengen, Stoffdaten
 - Gehandhabte Stoffe und deren Komponenten, wie z. B. Hydrauliköl und Kühlflüssigkeiten

- Kapitel 4: Emissionen/Immissionen
 - Geräuschemissionen/Schallschutzgutachten

- Kapitel 5: Abfälle
 - Keine Abfälle aus Prozess, nur Verbrauchsmaterial im Rahmen von Wartungsarbeiten

- Kapitel 6: Wasser
 - Informationen über Entsorgung des Kondensatwassers

- Kapitel 7: Anlagensicherheit
 - Anwendung der Störfall-Verordnung
 - Arbeits- und Brandschutz

- Kapitel 8: Eingriffe in Natur und Landschaft
 - In der Regel keine Eingriffe vorhanden

- Kapitel 9: Energieeffizienz
 - Beschreibung der Auswirkungen des Einsatzes von Wasserstoff anstelle von Strom

- Kapitel 10: Bauantrag/Bauvorlagen
 - Nur notwendig, wenn Umfang des Antrages

- Kapitel 11: Unterlagen für weiter nach § 13 BImSchG zu bündelnde Genehmigungen und behördliche Entscheidungen
 - Bei einzeltem Antrag keine Unterlagen vorhanden bzw. notwendig

- Kapitel 12: Maßnahmen nach Betriebseinstellung
 - Allgemeine Informationen zum Vorgehen bei Werkseinstellung

- Kapitel 13: Umweltverträglichkeitsprüfung
 - Die Anlage bedarf in der Regel keiner Umweltverträglichkeitsprüfung

4.3.2 Erlaubnis nach Betriebssicherheitsverordnung

Der Genehmigungsantrag gemäß BetrSichV §13 umfasst ähnlich den Antrag der Änderungsgenehmigung nach §16 BImSchG eine Beschreibung der Anlage und geht konkret auf sicherheitsrelevante Themen ein. Die beschriebenen Punkte können durch eine ganze Reihe von Anhängen ergänzt werden. Folgend sind eine beispielhafte Gliederung und mögliche Anhänge aufgelistet:

- Allgemeine Angaben bzgl. Antragssteller, Genehmigungsbehörde etc.
- Beschreibung der Anlage
 - Aufgabenstellung des Genehmigungsantrages
 - Verwendete Medien
 - Wasserstoffspeicher
 - Betankungsanlage
 - Dispenser/Befüllanlage
 - Sicherheitskonzepte der Anlage
 - Mögliche Notbetankung der Flurförderzeuge
- Gefährdungsanalyse der Anlage
- Mögliche Anlagen
 - Angebote von Lieferanten
 - Bedienungsanleitungen
 - Beschreibung der Flurförderzeugbetankung
 - Brandschutzgutachten
 - Darstellungen der Betankungs- und Befüllanlage
 - EX-Zonen-Dokumente
- Fehlermöglichkeits- und -einflussanalysen (FMEA)
- Konformitätsbescheinigungen
- Schallschutzgutachten
- Sicherheitsdatenblätter
- Sicherheitskonzepte und -maßnahmen
- Werkslayout inkl. Aufstellungsplan

4.3.3 Baugenehmigung

Die Baugenehmigung für die Umsetzung der in Kapitel 2.5.1 beschriebenen baulichen Maßnahmen wurde getrennt von der Änderungsgenehmigung nach §16 BImSchG beantragt. Diese wurde im Rahmen eines Baugenehmigungsverfahrens erwirkt.

4.4 Gutachten H2IntraDrive

Im Rahmen der in Kapitel 4.3 beschriebenen behördlichen Genehmigungen mussten folgende Gutachten erstellt werden:

- Brandschutzgutachten
- Schallschutzgutachten
- EX-Schutz Dokument
- Gefährdungsbeurteilung
- Gefahrenabwehrplan

4.5 Checkliste für notwendigen Genehmigungen und Gutachten

- Ist das Werk nach BImSchG genehmigt?
- Ist die Erstellung einer Änderungsgenehmigung nach §16 BImSchG notwendig?
- Welche behördlichen Genehmigungen sind aus eigener Sicht notwendig?
- Welche Behörde ist für die Genehmigung zuständig?
- Mit welcher ZÜS soll zusammen gearbeitet werden?
- Sind alle notwendigen Informationen zur Erstellung der Tischvorlage bzw. dem ersten Vorabgespräch mit der Behörde vorhanden?
- Welche Genehmigungen sind aus Sicht der Behörde notwendig?
- Welche Unterlagen/Informationen werden zur Erstellung des Genehmigungsantrages bzw. Gutachtens benötigt und von welchem Lieferanten erhalte ich diese?
- Wer erstellt den Genehmigungsantrag gemäß BetrSichV §13?
- Wer erstellt den Antrag für eine eventuell notwendige Baugenehmigung?
- Wer erstellt das Brandschutzgutachten?
- Wer erstellt das Schallschutzgutachten?
- Wer erstellt das EX-Schutz Dokument?
- Wer erstellt die Gefährdungsbeurteilungen?
- Wer erstellt den Gefahrenabwehrplan?

5 Sicherheitsmaßnahmen

Wasserstoff ist ein geruchloses, geschmackloses und farbloses Gas. Zudem liegt die untere Explosionsgrenze bei 4,1 und die obere bei 75 Prozent, d. h. bei einer Konzentration zwischen 4,1 und 75 Prozent Wasserstoff in der Luft gilt das Gemisch als explosionsfähig. Ferner verflüchtigt sich Wasserstoff aufgrund seiner deutlich geringen Dichte als Luft sehr schnell nach oben. Bedingt durch diese Eigenschaften sind, wie beim Umgang mit jedem Gefahrenstoff, Sicherheitsmaßnahmen zu treffen. Im Rahmen des Forschungsprojektes H2IntraDrive wurden eine Reihe an Maßnahmen für einen sicheren Umgang mit Wasserstoff im Bereich der Infrastruktur umgesetzt. Diese werden in Kapitel 5.1 beschrieben. Zur Infrastruktur zählen dabei die Betankungsanlage, der Dispenser aber auch die Werkshalle. Darauf folgend werden in Kapitel 5.2 umgesetzte sicherheitsrelevante Maßnahmen im Bereich der Flurförderzeuge vorgestellt. All diese Maßnahmen führen zu einem sicheren und unfallfreien Umgang mit Wasserstoff in der Anwendung bei Flurförderzeugen.

5.1 Infrastruktur

Im Bereich der Wasserstoff- und Halleninfrastruktur wurden zum einen allgemeingültige Verhaltensregeln im Umgang mit Wasserstoff aufgestellt, wie z. B. kein offenes Feuer in der Nähe von Wasserstoff. Zum anderen wurden gezielt technisch Maßnahmen getroffen und umgesetzt. Diese sind:

- Gaswarnanlage
- Brandmelder
- Aufschaltung auf Brandmeldezentrale
- Not-Aus-Schalter
- Potenzialausgleich
- Blitzschutz
- Hallenlüftung
- Abreißkupplung

Hinsichtlich Sprinkleranlage waren keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.

5.1.1 Gaswarnanlage

Insgesamt wurden zwei Gassensoren an der Anlage angebracht, zum einen im Verdichterraum der Betankungsanlage und zum anderen am Dispenser in der Werkshalle. Die Gassensoren melden, wenn eine Störung bzw. Fehlfunktion vorliegt oder die Gaskonzentration auf 20 % der unteren Explosionsgrenze steigt. Sollte die Wasserstoffkon-

zentration die kritische Marke von 40 % der unteren Explosionsgrenze überschreiten, lösen sie einen Alarm aus.

5.1.2 Brandmelder

Im Elektro- und Verdichterraum der Betankungsanlage ist jeweils ein Brandmelder angebracht. Zusätzliche Brandmelder in der Werkshalle waren nicht notwendig.

5.1.3 Aufschaltung auf Brandmeldezentrale

Der bestehende Brandmelder der Werkshalle wurde geöffnet und um die in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Brandmelder ergänzt. Ferner wurden die in Kapitel 5.1.1 dargestellten Gassensoren mit Hilfe von sogenannten Kopplern auf die Brandmeldezentrale (BMZ) aufgeschaltet, dies war eine Forderung der ZÜS. Die Feuerwehr forderte zudem die Weiterleitung der Meldungen und der Gaskonzentrationsmeldung von 20 % der unteren Explosionsgrenze.

5.1.4 Not-Aus-Schalter

Es wurden vier Not-Aus-Schalter für die gesamten Anlage realisiert:

- Am Dispenser in der Werkshalle
- Im Elektroraum der Betankungsanlage
- Im Verdichterraum der Betankungsanlage

- Am Schaltschrank der BMZ der Werkshalle

5.1.5 Potenzialausgleich

Um eine mögliche Funkenbildung während der Betankung zu verhindern, wurde eine Metallplatte vor dem Dispenser angebracht, auf welcher die Flurförderzeuge während der Betankung stehen. Die Platte ist durch ein Potenzialausgleichskabel mit Dispenser und Betankungsanlage sowie über Potenzialausgleichsbänder mit dem zu betankenden Flurförderzeug verbunden. Die Verwendung der Metallplatte war aufgrund des schlechten Ableitwiderstandes des Hallenbodens notwendig.

5.1.6 Blitzschutz

Während des Betankungsprozesses wird eine sehr kleine Menge an Wasserstoff beim Öffnen bzw. Schließen der Betankungskupplung abgesaugt, zur Betankungsanlage zurückgeführt und über die Abblaseleitung an die Umgebung freigegeben. Zudem können technische Störungen zu einem Abblasen von Wasserstoff über die Abblaseleitung führen. Dies hat zur Folge, dass kurzzeitig eine EX-Zone am und über dem Austrittspunkt des Wasserstoffes an der Abblaseleitung entsteht. Diese EX-Zone muss vor Blitzschlag geschützt werden, infolgedessen mussten 10 m hohe Blitzschutzmasten errichtet werden.

5.1.7 Hallenlüftung

Die bereits vorhandene Hallenlüftung in der Werkshalle hat eine Luftwechselrate von $>6/h$ (d. h. 6-mal in der Stunde wird die Luft ausgetauscht). Dies war ausreichend, dass keine zusätzlichen Maßnahmen hinsichtlich Luftabsaugung notwendig wurden. Jedoch musste sichergestellt werden, dass bei einer Störung bzw. Ausfall der Hallenlüftung die Betankungsanlage in einen sicheren Zustand wechselt und folglich eine Betankung

der Flurförderzeuge nicht mehr möglich ist. Die Hallenlüftung läuft aufgrund von Anforderungen aus den Fertigungsprozessen auch nachts.

5.1.8 Abreißkupplung

Der Betankungsschlauch inkl. Betankungskupplung ist mit Hilfe einer Abreißkupplung am Dispenser befestigt. Diese löst bei einer definierten Zugkraft aus und die Ventile vor bzw. nach der Kupplung schließen automatisch. Infolgedessen wird ein Gasaustritt bei einem möglichen Abreißen des Betankungsschlauchs verhindert. Die Kupplung kann nach dem Auslösen und einer kurzen Sichtprüfung auf eventuelle Schäden sofort wieder angebracht werden und die Betankungsanlage ist wieder voll funktionsfähig.

5.2 Flurförderzeuge

Analog zu den in Kapitel 5.1 beschriebenen Maßnahmen bei der Infrastruktur wurden Maßnahmen für Flurförderzeuge definiert und umgesetzt. Diese sind:

- Wegfahrsperrung
- Potenzialausgleichsbänder
- Definierter Abstellort

5.2.1 Wegfahrsperrung

Während der Betankung ist das Flurförderzeug mechanisch durch die Betankungskupplung mit dem Dispenser verbunden. Eine Bewegung oder sogar Wegfahren des Flurförderzeuges ist in diesem Zustand ein erhebliches Sicherheitsrisiko. Dies kann zwar durch die in Kapitel 5.1.8 beschriebene Abreißkupplung minimiert werden, jedoch sollte eine Bewegung des Flurförderzeuges während der Betankung erst gar nicht möglich sein. Infolgedessen wurden die Flurför-

derzeuge mit einer Wegfahrsperrung ausgestattet, die ein Fahren des Fahrzeuges mit geöffneter Betankungsklappe verhindert.

5.2.2 Potenzialausgleichsbänder

Um den Potenzialausgleich der Flurförderzeuge mit der Umgebung, wie. z. B. Hallenboden und Metallplatte während der Betankung sicherzustellen, wurden Potenzialausgleichsbänder am Boden des Fahrzeuges angebracht. Die Verwendung von ableitfähigen Reifen hätte hierfür eine Alternative dargestellt, dies war aufgrund des Einsatzes von weißen Reifen, welche nicht als ableitfähige Variante erhältlich sind, nicht möglich.

5.2.3 Definierter Abstellort

Die Flurförderzeuge können nachts in der Werkshalle abgestellt werden. Dabei dürfen sie nicht in unmittelbarer Nähe des Dispensers stehen sondern auf Flächen bei denen keine Brandgefährdeten Güter in unmittelbarer Nähe sind.

Ergänzende Literatur

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz:
Betriebssicherheitsverordnung-BetrSichV, Berlin, 27.09.2002

Europäische Parlament und Rat der Europäischen Union:
Richtlinie 97/23/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Druckgeräte (Druckgeräte Richtlinie (DGRL))
Straßburg/Brüssel, 09.07.1997

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin,
Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS), Dortmund, 18.11.2013

Bundesministerium für Arbeit und Soziales:
Technische Regeln Druckgase (TRG), Bundesarbeitsblatt, 07.07.1989

Bundesministerium für Arbeit und Soziales:
Technische Regeln Druckbehälter (TRB), Bundesarbeitsblatt, 21.08.1995

Bundesministerium für Arbeit und Soziales:
Technische Regeln Rohrleitungen (TRR), Bundesarbeitsblatt, 1993-1998

Ministerium für Arbeit, Integration und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen (MAIS):
Das Erlaubnisverfahren nach § 13 der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV): Füllanlagen für Druckgase, Düsseldorf, 01.2012

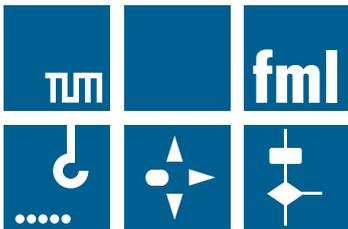
Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI):
Qualität der gutachterlichen Äußerungen im Rahmen des Erlaubnisverfahrens nach § 13
Betriebssicherheitsverordnung, 29.08.2008

TÜV SÜD Industrie Service GmbH: TÜV SÜD Standard CMS 70:
Erzeugung von grünem Wasserstoff, München, 12.2011

Verband der TÜV e. V.: VdTÜV-Merkblatt 514:
Anforderungen an Wasserstofftankstellen, Berlin, 04.2009

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Standort- bzw. Gebäudeauswahl im Rahmen des Projektes H2IntraDrive sowie mögliche Erweiterung nach Projektende [Quelle: BMW]
Abbildung 1-2:	Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen im CFK-Karosseriebau im BMW-Werk Leipzig
Abbildung 2-1:	Terminplan Wasserstoffinfrastruktur
Abbildung 2-2:	Schematische Darstellung Wasserstoffversorgung
Abbildung 2-3:	Niederdruckspeicherung von Wasserstoff bei einer öffentlichen Tankstelle [Quelle: LindeGas]
Abbildung 2-4:	Betankungsanlage und Hochdruckspeicher im H2IntraDrive Projekt
Abbildung 2-5:	Flüssigspeicherung von Wasserstoff [Quelle: LindeGas]
Abbildung 2-6:	Betankung eines wasserstoffbetriebenen Gabelstaplers
Abbildung 3-1:	Terminplan Flurförderzeuge
Abbildung 3-2:	Gegengewichtsstapler im H2IntraDrive Projekt
Abbildung 4-1:	Terminplan Genehmigungen und Gutachten
Abbildung 4-2:	Mögliche Genehmigungsverfahren für H2-Flurförderzeugtankstellen im Rahmen des BImSchG



fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15
85748 Garching b. München

Tel.: +49 (0)89 289 - 15921
Fax.: +49 (0)89 289 - 15922
E-Mail: kontakt@fml.mw.tum.de