

Schlussbericht

Linde Material Handling GmbH

für das BMDV - Förderprojekt
03B10805

KION HyPower 24V

Entwicklung eines europäischen 24V Brennstoffzellensystems für
Lagertechnikgeräte
(Laufzeit 01.10.2020 – 31.05.2024)



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Koordiniert durch:



Projektträger:



Linde Material Handling GmbH

Meth Henning
Henning.Meth@kiongroup.com

| Dr. Hans-Meinhardt-Allee 1, 63741 Aschaffenburg
| Tel.: 06021 99 4594

Autoren

Dieses Dokument wurde erstellt von Linde MH
Die Kapitel wurden verfasst von
Dr. Joachim Hirth
Christoph Seikel
Henning Meth

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| I. | Kurze Darstellungen..... | 5 |
| 1. | Aufgabenstellung..... | 5 |
| 2. | Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde..... | 6 |
| 3. | Planung und Ablauf des Vorhabens..... | 7 |
| 4. | Stand der Technik / Stand der Wissenschaft, den angeknüpft wurde..... | 8 |
| II. | Eingehende Darstellungen..... | 9 |
| 1. | Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse..... | 9 |
| | Inhalt und Ergebnisse von AP1 (Anforderungsmanagement an Brennstoffzelle)..... | 9 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP2 (Analyse Arbeitsspiele)..... | 13 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP3 (Entwicklung Systemarchitektur mit Hilfe von Simulationsmodellen)..... | 15 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP4 (Aufbau eines funktionalen elektrischen Bretttaufbau des Hybridsystems)..... | 20 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP5 (Definition der max. Zielabmessungen von Hauptkomponenten wie Tank, Stack, Batterie)..... | 23 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP6 (Aufbau eines funktionalen Bretttaufbau des Wasserstoffsystems)..... | 27 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP7 (Aufbau Brennstoffzellenprüfstand)..... | 30 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP8 (Erstellung FMEA/Risikomanagement für BZ-System) .. | 34 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP9 (Softwareentwicklung Steuerung)..... | 36 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP10 (Aufbau und Inbetriebnahme erster funktionaler Prototyp)..... | 44 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP11 (Aufbau und Inbetriebnahme industrialisiere Prototypen)..... | 48 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP12 (Test/Validierung inklusive CE-Konformität)..... | 57 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP13 (Feldtest)..... | 65 |
| | Inhalte und Ergebnisse von AP14 (Produktionskonzepterstellung)..... | 69 |

| | |
|--|----|
| Inhalte und Ergebnisse von AP15 (Servicekonzepterstellung) | 73 |
| Wissenschaftlicher Ausblick und Anschlussfähigkeit..... | 77 |
| 2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit | 77 |
| 3. Voraussichtlicher Nutzen..... | 78 |
| 4. Fortschritt bei anderen Stellen..... | 78 |
| 5. Veröffentlichungen / Patentrelevante Arbeiten | 79 |
| III. Anlage Erfolgskontrollbericht | 81 |

I. Kurze Darstellungen

1. Aufgabenstellung

Ziel des Projekts KION HyPower 24V war,

- die Entwicklung, Validierung und Industrialisierung bis einschließlich eines Feldtests eines europäischen 24V Brennstoffzellensystems für Lagertechnikgeräte. Angestrebt wurde der technologische Reifegrad von 8 (*TRL 8 – System complete and qualified*).
- Beendigung der Quasimonopolstellung von Brennstoffzellensystemen durch einen US-amerikanischen Lieferanten, um eine Wettbewerbs Situation auf dem Europäischen Markt zu etablieren.
- Die Wertschöpfungskette von Entwicklung, Serienfertigung und Service am Wirtschaft Standort Europa zu implementieren.

Die Neuentwicklung ist bei dem KION Tochterunternehmen Linde MH Material Handling GmbH in Deutschland erfolgt.

Im Einzelnen wurden von Linde MH folgende Arbeitspakete bearbeitet:

- AP1 Anforderungsmanagement an Brennstoffzelle
- AP2 Analyse Arbeitsspiele
- AP3 Entwicklung Systemarchitektur mit Hilfe von Simulationsmodellen
- AP4 Aufbau eines funktionalen elektrischen Brettaufbau des Hybridsystems
- AP5 Aufbau mech. Prototyp ohne Funktion für Einbauuntersuchungen
- AP6 Aufbau eines funktionalen Brettaufbau des Wasserstoffsystems
- AP7 Aufbau Brennstoffzellenprüfstand
- AP8 Erstellung FMEA/Risikomanagement für BZ-System
- AP9 Softwareentwicklung Steuerung
- AP10 Aufbau und Inbetriebnahme erster funktionaler Prototyp
- AP11 Aufbau und Inbetriebnahme industrialisierte Prototypen
- AP12 Test/Validierung inklusive CE-Konformität
- AP13 Feldtest

- AP14 Produktionskonzepterstellung
- AP15 Servicekonzepterstellung

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Weltweit gibt es mit XXXXX einen bedeutenden Anbieter von H₂-Brennstoffzellensystemen. Dieser hat inzwischen auch auf dem europäischen Markt die Dominanz erreicht. Weiter gibt es seit Projektstart noch 2 weitere deutsche Hersteller für Brennstoffzellensysteme in unterschiedlichen Leistungsklassen XXXXX und XXXXX, deren Produkte nicht den Anforderungen bezüglich Bauraums und Performance von Linde MH entsprechen. Dazu ist es zwingend notwendig, dass der Kunde einen Service aus einer Hand erhält (Fahrzeug und Brennstoffzellensystem). Dieses zum heutigen Stand mit Drittanbietern nicht umsetzbar.

Die Systeme der Marktbegleiter sind aus Sicht von Linde MH Material Handling als technologisch nicht ausgereift und deshalb als nicht nachhaltiges System einzustufen. Die Quasimonopolstellung von XXXXX und der somit fehlende Wettbewerb gehen zu Lasten der Nutzer, da technologische (qualitative) und auch ökonomische Alternativen fehlen. XXXXX hat dazu im Jahr 2023 eine Warnung herausgegeben, dass ggf., dass es möglicherweise nicht über genügend Barmittel verfügen würde, um seinen Betrieb und seinen Investitionsbedarf in den nächsten zwölf Monaten zu finanzieren. Dieses würde bei Bestandskunden auch in Deutschland und Europa zu massiven Problemen und der Marktdurchdringung der Technologie führen.

Mit einem umgesetzten technologischen Reifegrad von TRL 8 hat Linde MH mit dem durchgeführten Fördervorhaben die bestehende europäische Marktdominanz von XXXXX deutlich verringert und zu einer Wettbewerbssituation geführt. Folgende Problembereiche wurden durch das Förderprojekt gelöst:

Problembereich 1: fehlende alternative europäische Lieferanten gegenüber XXXXX

- Es gibt keinen nennenswerten europäischen Wettbewerber auf dem Brennstoffzellemarkt für Flurförderzeuge
- ungenügende Zuverlässigkeit und hoher Wartungsaufwand der Brennstoffzellensysteme beim Kunden
- Verfügbare Brennstoffzellensysteme erfüllen oft nicht die europäischen Kundenanforderungen wie Lebensdauer, Performance, Trogabmaße und Gewichte
- Service aus einer Hand von Brennstoffzellensystem und Fahrzeug

Problembereich 2: Die Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie war bzw. ist in folgenden Punkten notwendig:

- Höhere Lebensdauer der Komponenten, d.h. geringere Wartungskosten
- Höhere Lebensdauer, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit des Systems durch Optimierung des Hybridsystems (evtl. adaptive Anpassung an den Einsatzzweck beim Kunden)

- Höhere Resistenz gegenüber Staub und Verunreinigungen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Projektstruktur und der zeitliche Ablauf der Arbeitspakete sind in untenstehender Abbildung 1 wiedergegeben. Die Darstellung zeigt die Planung lt. AZK (bei Antragstellung), tatsächlich wurde der Starttermin im Zuwendungsbescheid vom 29.10.2020 um ein Quartal auf den 01.10.2020 geändert, da noch Ergänzungen zum Zuwendungsantrag bereitgestellt werden mussten. Die Projektlaufzeit war kostenneutral bis zum 31.05.2024 verlängert worden. Hintergrund für die Verlängerung waren u.a.

- längere Lieferzeiten für Komponenten wie z.B. der H₂ Tank oder die Qualifizierung des Tankventils.
- Besetzung neuer Stellen im Bereich der Brennstoffzellenentwicklung
- Verzögerung des Feldtests durch lange Lieferzeiten von Komponenten und organisatorische Themen bei den Feldtestkunden.

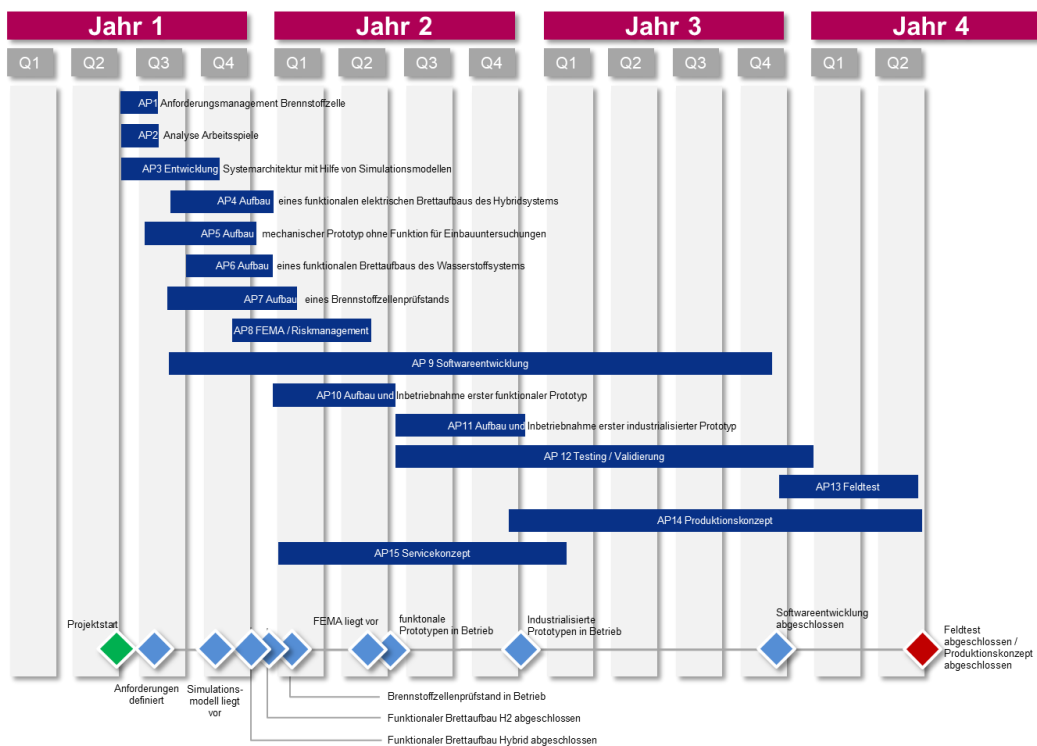


Abbildung 1: Projektplanung [Quelle: Gesamtvorhabensbeschreibung KION HyPower 24V]

4. Stand der Technik / Stand der Wissenschaft, den angeknüpft wurde

XXXXX hat seine Aktivitäten im Bereich Brennstoffzellen Entwicklung und Produktion komplett im Projekt FFZ70 eingestellt. XXXXX ist aktuell als Quasimonopolist am Markt und die vertriebenen Systeme entsprechen nicht dem technischen Reifegrad und Anforderungen dem europäischen Markt. Marktbegleiter haben zwar Prototypen gebaut haben aber noch keine industrialisierte Serienreife erreicht. Ebenfalls ist in dieser Baugröße und Leistungsklasse nur 2 Wettbewerber am Markt vertreten. Auf dem Nordamerikanischen und Asiatischen Markt sind zwar noch ein paar Anbieter, welche Brennstoffzellensystem für Lagertechnik anbieten, aber diese haben wiederum keine Zertifizierung nach CE.

Linde MH hatte das Ziel, ein Brennstoffzellensystem zu entwickeln, welches eine Linde spezifische Anforderungen entspricht (analog Bleisäure oder Li-Ionen Batterien) um unabhängig vom Einsatzgebiet genutzt zu werden.

Linde Material Handling hat in den Fördervorhaben H2Intradrive und FFZ70 Erfahrungen im Bereich Applikation von Brennstoffzellensystemen (XXXXX, XXXXX, XXXXX) in Flurförderzeugen gesammelt. In den Projekten wurden neben der Verfügbarkeit der Brennstoffzellensysteme durch Drittanbieter auch die Infrastruktur und wirtschaftlichen Randbedingungen untersucht.

Probleme wurden bei den Marktbegleitersystemen in der Zertifizierung, Robustheit, Lautstärke, Industrialisierung, Gesamtkosten (TCO) sowie dem Hybridspeicher festgestellt.



Abbildung 2: Projekt FFZ70 AGV Fahrzeug mit Brennstoffzelle bei XXXXX

II. Eingehende Darstellungen

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden die Inhalte der von Linde MH durchgeführten Arbeiten und die erreichten Ergebnisse beschrieben.

Inhalt und Ergebnisse von AP1 (Anforderungsmanagement an Brennstoffzelle)

UAP 1.1 Definition Dauerleistung

Die Definition der Systemdauerleistung war für die Gesamtauslegung des Brennstoffzellensystems, primär des Stacks und der Hybridbatterie, notwendig. Das Gesamtsystem ist auf 10.000 Betriebsstunden wie das Fahrzeug ausgelegt, und muss die dafür notwendige Zyklen bestehen.

Bedingt durch die Degradation des Stacks muss die Systemdauerleistung mind. zum End of Life des Stacks immer noch zur Verfügung stehen, damit der Kunde keine Leistungseinbußen im Betrieb verspürt.

Mit der Covid-19 Pandemie war es nicht möglich neue Arbeitsspiele bei Kunden vor Ort zu vermessen. Auf Basis von bekannten gemessenen und synthetischen Arbeitsspielen und über Vergleiche zur Li-Ion Batterie Kapazitäten konnte eine Systemdauerleistung bei End of Life von 1,3kW ermittelt werden. Die Systemdauerleistung des Systems durfte nicht zu stark überdimensioniert werden, um die verstärkten Alterungsprozesse im Teillastbereich des Brennstoffzellenstacks zu minimieren. Hierbei waren die performantesten Fahrzeuge wie ein Routenzugschlepper oder ein Hochhubwagen für die Auslegung berücksichtigt.

Da der Stack durch die Degradation ein „Beginning und End of Life“ hat, muss die Dauerleistung mind. auf das End of Life Kriterium ausgelegt sein. Bei einer ermittelten Degradation von ca. 30% muss der Stack bei Beginning of Life eine Dauerleistung von 1,8kW besitzen.

-vertraulich-

Abbildung 3: exemplarische Polarisationskurven Beginning of Life und End of Life

UAP: 1.2 Definition Peak Leistung

Hierzu wurden die verschiedenen Fahrzeuge von Linde MH analysiert. Da Lagertechnikgeräte in sehr verschiedene Einsätze zum Einsatz kommen, sind die Peak Leistungen sehr unterschiedlich. Geräte können eine Hubmast, d.h. eine Arbeitshydraulik haben. Die Hubleistung ist hier ausschlaggebend für die Peakleistung. Durch die verschiedenen Anwendungsgebiete und Leistungsklassen wurde folgende Peakleistung definiert:

60s --> max. 8,4kW

UAP: 1.3 Außenabmaße in Bezug auf Fahrzeugverfügbarkeit

Nach Diskussion mit der Produktstrategie und den Produktmanagement von Linde und Still konnten die Zielfahrzeugbaureihen identifiziert werden.

Hierbei stehen Mitgängerfahrzeuge nicht im Fokus der Brennstoffzellenentwicklung, weil diese zu wenige Betriebsstunden pro Jahr erreichen, um eine Brennstoffzelle wirtschaftlich zu betreiben. Der Fokus lag auf den Lagertechnikgeräten mit Fahrerplattform.

Zusätzlich mussten bei den Zielfahrzeugen auch alle Batterievarianten bezüglich der Außenabmaße miteinander verglichen werden.

Bei Linde sollten alle Fahrzeuge mit einem seitlichen Batteriewechsel mit der Bleibatteriegröße 4 PzS (Trog 67) lateral berücksichtigt werden. Diese Produkte werden in hohen Stückzahlen gefertigt und bei Kunden in Flotten mit hohen Betriebsstunden eingesetzt. Hierunter fällt auch der Routenzugschlepper P40c von Linde, welcher im XXXXX Werk XXXXX zum Einsatz kommt.



Abbildung 4: Linde Schlepper P40c

Definierten Außenabmaße der Brennstoffzelle sind wie folgt definiert:

Tabelle 1: Abmaße BZ System

| | Bezeichnung | Länge [mm] | Breite [mm] | Höhe[mm] |
|---------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
| Basis System | 4 PzS L (Trog 67) | 786 | 310 | 627 |

*Abmaße sind die geforderten Werte, können aber mit den angegebenen Werten erreicht werden, um das System im Still OPX auch einzusetzen.

UAP 1.4: Gewicht

Das Brennstoffzellensystem soll als Ersatz zu einer Bleisäure Batterie in Einsatz kommen. D.h. das System muss ein äquivalentes Gewicht zu den heutigen Bleisäure Batterien haben.

Anbei das definierte Gewicht:

Tabelle 2: Zielgewichte BZ-System

| | Bezeichnung | Gewicht [kg] |
|---------------------|--------------------|---------------------|
| Basis System | 4 PzS L | 330 |

Für ein optionales System wird noch ein Zusatzgewicht unterhalb des Brennstoffzellensystems angeschraubt, um weitere Variante abzubilden. Die Systemleistung bleibt gegenüber dem Basissystem identisch. Die optionale Variante wurde im Projekt nicht weiter umgesetzt.

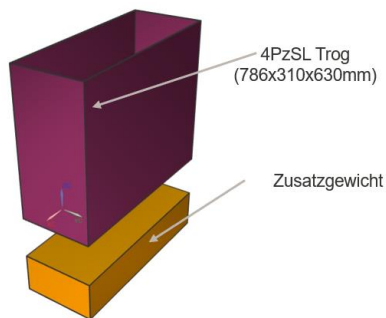


Abbildung 5: Konzept Zusatzgewicht

Inhalte und Ergebnisse von AP2 (Analyse Arbeitsspiele)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP2 (Analyse Arbeitsspiele)

Im Rahmen von AP2 sollten die Vermessung von Kundenarbeitsspiele zur Bestätigung der in AP1 definierten Auslegungsdaten dienen. Diese Arbeitsspiele waren als Eingangsdaten für ein Simulationsmodell genutzt werden, um verschiedene Einsätze gegenüber der Auslegung zu bestätigen.

UAP 2.1: Ermittlung von potenziellen AS-Kunden

Bedingt durch die COVID-19 Situation waren ab März 2020 bei Linde MH keine Dienstreisen und Kundenbesuche mehr möglich. Eine erste Auswahl von Kunden wurde zusammen mit dem Produktmanagement erarbeitet. Bei den Kunden handelt es sich um Brennstoffzellen- sowie Bleisäurebatteriekunden. Hierbei stehen Kunden mit größeren Flotten, Mehrschichteinsatz und harten Arbeitsspielen im Fokus.

- Automobilwerke
- Logistikdienstleister
- Lebensmittelversorger (Lager)

Die Vermessung der Arbeitsspiel konnte pandemiebedingt nicht durchgeführt werden. Hierfür wurden alternative Datensätze aus weiteren Projekten und synthetisch generieren Arbeitsspiele verwendet.

UAP 2.2 Einführung und Bereitstellung der notwendigen Messtechnik

Die Messtechnik für die Vermessung der Kundenarbeitsspiele besteht aus einer standardisierten Messbox für 24V Fahrzeuge. Die Messbox kann neben Strom auch Daten aus dem CAN BUS des Fahrzeugs aufzeichnen.

Die Messbox kam aber bedingt durch das Nichtdurchführen des UAP 2.1 nicht zum Einsatz.

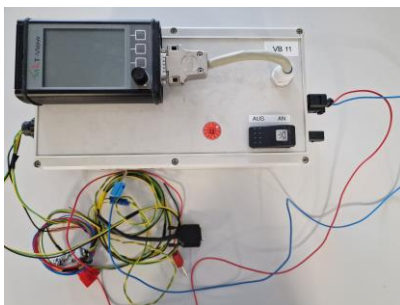


Abbildung 6: Messbox

UAP 2.3: Ermittlung von potenziellen AS-Kunden

Alternativ wurden gegenüber den Kundenarbeitsspielen, die Freigabearbeitsspiele der Schwesternwerke von Linde MH aus Chatellerault (FR) und Luzzara (IT) für

Lagertechnikgeräte für die Bestätigung des Systems verwendet. Diese Arbeitsspiele werden zur Validierung von Lagertechnikfahrzeugen mit Bleisäure oder Li-Ionen Batterie verwendet.

Alle Marktbegleitersysteme konnten dieses Arbeitsspiel, welches 1h gefahren wird, nicht über die Zeit durchhalten. Hier waren oft die Brennstoffzellensysteme nach 10-15min an ihrer Leistungsgrenze. Das Linde MH Brennstoffzellensystem wurde auch nach diesen Arbeitsspielen getestet. Die Ergebnisse sind im UAP 11.9 zu finden. Der Anspruch von Linde MH ist es, dass diese Arbeitsspiele auf 1h ohne Leistungsverlust gefahren werden müssen.

[UAP 2.4: Auswertung der Arbeitsspiele und Priorisierung für Simulation](#)

Um eine erste Auslegung durchführen zu können, wurde auf bestehende Auslegungsdaten zurückgegriffen: Hierbei handelt es sich um 5 Arbeitsspiele, die teilweise synthetisch angepasst wurden.

Die Arbeitsspiele wurden auf eine Schichtdauer von 7h skaliert und analysiert. Im Unterschied gegenüber der Li-Ionen Batterieanwendung müssen bei den Arbeitsspielen die Pausenzeiten berücksichtigt werden. In den Pausenzeiten kann der Hybridspeicher des Brennstoffzellensystems nachgeladen werden.

Inhalte und Ergebnisse von AP3 (Entwicklung Systemarchitektur mit Hilfe von Simulationsmodellen)

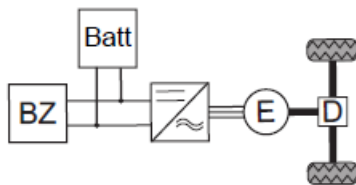
Zielsetzung des Arbeitspakets AP3 (Entwicklung Systemarchitektur mit Hilfe von Simulationsmodellen)

Im Rahmen von AP3 wurde die Systemarchitektur mit Hilfe von Matlab Simulink Modellen erstellt. Hierbei steht die Leistung und Lebensdauer (Zyklen der Batterie und Degradation des Brennstoff-zellenstacks) im Vordergrund.

UAP 3.1: Entwicklung von verschiedenen Systemarchitekturen

Brennstoffzellensysteme für Flurförderzeuge benötigen aufgrund der dynamischen Leistungsanforderungen der Fahrzeuge einen Hybridspeicher. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden unterschiedlich konzeptionierte Hybridarchitekturen unter Verwendung von Lithiumionenbatterien vergleichsweise betrachtet:

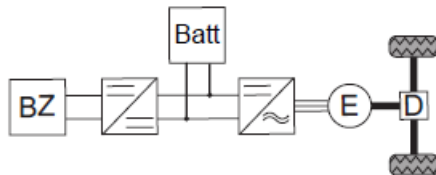
a. System ohne DCDC-Wandler



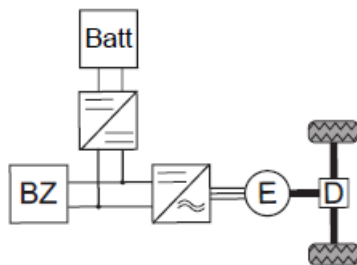
| Vorteile | Nachteile |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Topologie besitzt den geringsten leistungselektronischen Aufwand | <ul style="list-style-type: none"> • Brennstoffzellenspannung und Batteriespannung müssen nahezu gleich sein |
| <ul style="list-style-type: none"> • Es ist keine Zwischenkreis-spannungsregelung nötig | <ul style="list-style-type: none"> • Eine geregelte Leistungsaufteilung zwischen den Quellen ist nicht möglich |
| <ul style="list-style-type: none"> • Kostengünstig | <ul style="list-style-type: none"> • Es gibt keinen Schutz der Brennstoffzelle gegen Elektrolyse (ohne Relais) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Schnellere Degradation der Brennstoffzelle |

b. System mit einem DCDC-Wandler

Variante b1 - System mit DC/DC-Wandler an der Brennstoffzelle, um diese damit sehr konstant zu betreiben.



Variante b2 - System mit DC/DC-Wandler, direkt an der der Batterie.



| Vorteile | Nachteile |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Nur ein mittlerer programmier-technischer Aufwand nötig | <ul style="list-style-type: none"> Verluste durch DC/DC Wandler vorhanden |
| <ul style="list-style-type: none"> Eine geregelte Leistungsaufteilung zwischen Quellen ist möglich | <ul style="list-style-type: none"> Bei Variante mit DC/DC-Wandler an der Brennstoffzelle ist eine hohe Leistung des Wandlers nötig |
| <ul style="list-style-type: none"> Lebensdaueroptimierung durch Regelung möglich | <ul style="list-style-type: none"> Bei Variante mit DC/DC-Wandler an der Batterie ist eine hohe Spannung des BZ-Stacks notwendig |
| <ul style="list-style-type: none"> Bei Variante mit DC/DC-Wandler an der Brennstoffzelle kommt es zu keinen Spannungseinbrüchen im Zwischenkreis | |

Vergleichende Betrachtungen ergaben einen eindeutigen Kosten-/Nutzenvorteil für die Variante b1.

Um dieses Hybridsystem via Simulation optimal an die dynamischen Lastanforderungen anzupassen sowie die optimalen Parameter bzgl. Stack-Leistung, Stack-Spannung und

Batteriekapazität zu ermitteln, mussten zunächst Simulationsmodelle von folgenden Komponenten erstellen werden: Brennstoffzellen-Stack, Batterie und DC/DC-Wandler.

UAP 3.2: Simulatorische Abbildung des Brennstoffzellen-Stacks

Entwickelt wurde ein Brennstoffzellenmodell mit Matlab-Simulink auf Basis der physikalisch und chemischen Grundgleichungen. Es können die Stack-Kennlinien (Polarisationskurven) zu "Beginning of Life" (BOL) und "End of Life" (EOL) simuliert werden. Diese liefern den Zusammenhang zwischen Stack-Spannung in Abhängigkeit des Stack-Stromes. Bei dem Modell wurde auch die Stack-Alterung mitberücksichtigt.

UAP 3.3: Simulatorische Abbildung des Hybridpuffers

Die Brennstoffzelle bzw. der Brennstoffzellen-Stack selbst ist nur ein Energiewandler, welcher aus gespeichertem Wasserstoff und Umgebungsluft elektrische Energie erzeugt. Somit ist dieses System nicht für die Aufnahme von Energie geeignet, welche bei mobilen Anwendungen zum Beispiel durch Rekuperation beim Abbremsen des Fahrzeugs gegeben ist. Ebenso hängt die Lebensdauer einer Brennstoffzelle stark von deren Belastungsart ab, wobei ein eher stationärer Betrieb anzustreben ist. Die Lebensdauer sinkt, wenn es durch Überlastung zur H₂-Unterversorgung kommt, die Zelle nahe der gefährlichen Leerlaufspannung betrieben wird und die Zelle oft zu- und abgeschaltet wird. Diese Betriebszustände sind bei der hochdynamischen Beanspruchung eines Flurförderfahrzeugs gegeben und sollen mittels Batterie, genauer Lithium-Ionen-Batterie, verringert werden. Diese kann die durch Rekuperation rückgespeiste Energie aufnehmen und Lastspitzen abschwächen. Ebenso kann die Brennstoffzelle im optimalen Arbeitspunkt und über kurze Pausen von mehreren Minuten bis Stunden (abhängig von der Batteriekapazität) hinweg betrieben werden, wodurch sich deren Lebensdauer der eines stationären Betriebes angleicht und deren Wirkungsgrad um bis zu 15 % gesteigert werden kann. Für das gesamte Hybridsystem wurden die beiden Komponenten Brennstoffzelle und Batterie so ausgelegt, dass die Nennleistung der Brennstoffzelle, der am häufigsten vorliegenden Leistung der Last entspricht, wobei die Batterie nicht ge- oder entladen wird. In diesem Betriebspunkt ist der Gesamtwirkungsgrad des Systems am größten (vgl. folgende Abbildung).

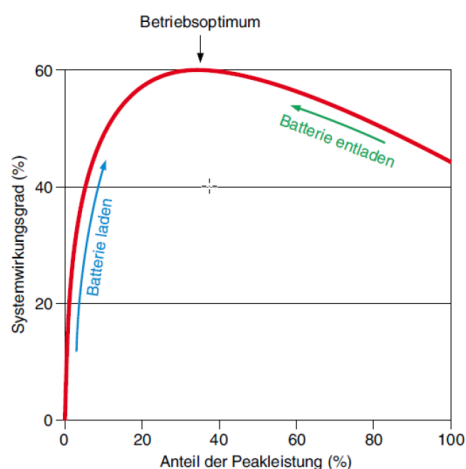


Abbildung 7: Diagramm Systemwirkungsgrad über Anteil Peakleistung

Die Simulation erfolgte in Matlab/Simulink. Bei der sekundären Batterie war die Zellchemie, Lade- und Endladekurven, Zyklenzahl, Thermisches Verhalten zu modellieren.

Es wurde ein Batteriemodell entwickelt, das folgende Funktionen beinhaltet:

- Berechnung der zugeführten und abgeführten Energie zur Hybridbatterie (Energiebilanz).
- Berechnung des SOC (State of Charge)
- Berechnung der Batterievollzyklen und der Batteriespannung.
- Berechnung der thermischen Verlustleistung.

UAP 3.4: Simulatorische Abbildung des Spannungswandlers

Bei der Modellierung des DCDC-Wandlers wurde ein Ansatz verfolgt, der auf Basis der Leistungsbilanz zwischen Eingang (entspricht Anschlussseite der Brennstoffzelle) und Ausgang Aussagen zum stationären Betriebsverhalten zulässt. Dabei kommt ein Wirkungsgradkennlinienfeld zum Einsatz, das mit Messwerten eines realen Wandlers parametrisiert Rückschlüsse auf die arbeitspunktabhängigen Wandlungsverluste ermöglicht. Durch das Einbinden der grundlegenden Regler Eigenschaften können darüber hinaus Sollwertvorgaben und Begrenzungseffekte für die ein- und ausgangseitigen Spannungen und Ströme nachgebildet werden.

Das Ergebnis zeigt, dass ein Leistungsspannungswandler hilft, die Alterungsprozesse bei Stack und Batterie zu verringern. Dieser Spannungswandler wurde von Linde MH auf Basis der Simulation spezifiziert und von einem Lieferanten aus Deutschland entwickelt.

UAP 3.5: Validierung des Simulationsmodells

Das Linde MH-Simulationsmodell wurde mit dem Modell des Stack-Lieferanten abgeglichen und hierbei eine hohe Übereinstimmung beider Simulationsergebnisse festgestellt werden.

UAP 3.6: Auslegung des BZ Hybridsystems mit Hilfe der Auslegungsarbeitsspiele

Mit Hilfe von verschiedene Arbeitsspielen konnte ein universelles (teilsynthetisches) Arbeitsspiel erstellt werden. Hiermit wurden nachfolgend die Hauptkomponenten, wie Stack, Batterie und DCDC-Wandler, hinsichtlich Dauerleistung, Spitzenleistung und elektr. Hybrid-Speicherkapazität ausgelegt. Alle Komponenten konnten im Rahmen einer Gesamtsimulation einer eingehenden Parameterstudie unterzogen werden.

UAP 3.7: Bestätigung der Systemarchitektur mit Hilfe der Kundenarbeitsspiele

Die Anwendbarkeit der (Hybrid-)Systemarchitektur konnte mit Hilfe des universellen Arbeitsspiels bestätigt werden.

UAP 3.8: Aus Simulationsergebnissen: Anforderungen an Stack

Mit Hilfe des Simulationsmodells und unter Verwendung der Arbeitsspiele konnten zunächst die Leistungsdaten ermittelt werden. Aus letzterer ergibt sich bei vorgegebener Zellenquerschnittsfläche dann die Zellenanzahl des Stacks und somit die Spannung zu Beginn und Ende der Lebensdauer. Verschiedene Konzepte zur Hybridstrategie wurden untersucht und hinsichtlich der Stromgradienten am Stack bewertet. Diese haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Alterung des Stacks. Im Rahmen der Modellierung konnte gezeigt werden, dass eine SOC-Regelung für das Hybridsystem geeignet ist.

UAP 3.9: Aus Simulationsergebnissen: Anforderungen an Hybridenergiespeicher

Aus den Anforderungen der Fahrzyklen sowie dem gewählten Hybridsystem ergibt sich eine über die Gesamtlebensdauer zu speichernde Energiemenge. Um hierfür einen geeigneten Hybridspeicher zu finden, wurden unterschiedliche Zellkonfigurationen und Batteriekapazitäten mit Hilfe der Simulation analysiert. Letztendlich wurde eine Konfiguration gefunden, bei der die Batterie die notwendige Anzahl an Vollzyklen erreichen kann. Weiteres Optimierungspotenzial besteht hier zusätzlich durch Anpassung bzw. Verfeinerung der Regelstrategie.

UAP 3.10: Aus Simulationsergebnissen: Anforderungen an Spannungswandler

Aus der gewählten Stack-Größe (Spannung) sowie der festgelegten Hybridbatterie ergibt sich die Notwendigkeit die Spannung des Stacks anzupassen, um die Batterie in allen Zuständen der Stack-Belastung sowie -Alterung immer laden zu können. Hierfür kommt im Hybridsystem ein DCDC-Wandler mit Buck-/Boost-Funktion zum Einsatz. Die genauen technischen Anforderungen an den DCDC-Wandler wurden ebenfalls mit dem o.g. Simulationsmodells ermittelt.

Inhalte und Ergebnisse von AP4 (Aufbau eines funktionalen elektrischen Brettaufbau des Hybridsystems)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP4 (Aufbau eines funktionalen elektrischen Brettaufbau des Hybridsystems)

Auf der Basis der Simulationsergebnisse wurden die entsprechenden Komponenten wie Stack, Batterie, DCDC-Wandler, und Li Ionen Batterie gewählt. Diese müssen in einem ersten Prototypenaufbau gut zugänglich sein. Hierfür wurde ein sogenannter Brettaufbau umgesetzt. Die Vorgehensweise von Prototypenaufbauten ist in Abbildung 8 zu sehen:

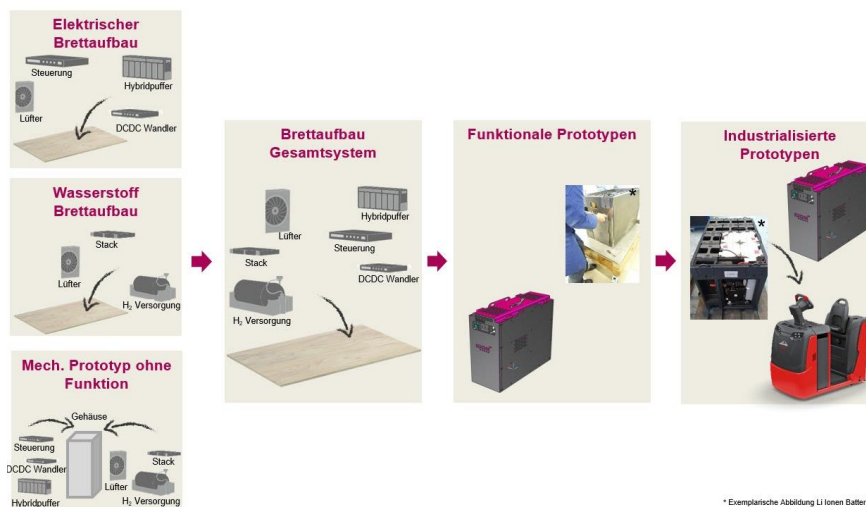


Abbildung 8: Prinzipielle Vorgehensweise für Prototypenaufbauten

UAP 4.1: Beschaffung aller elektrischen Hybridkomponenten, wie Hauptsteuerung, Batterie, Spannungswandler, Widerstände, weitere elektrische Verbraucher

Die Beschaffung der folgenden Komponenten wurde für den elektrischen Brettaufbau durchgeführt. Dabei besteht der Aufbau Der elektrische Brettaufbau des Hybridsystems besteht aus folgenden Komponenten:

- Li Ionen Batterie
- Schütze
- DCDC-Wandler
- Lüfter für DCDC-Wandler
- Elektrische Last als Simulation für Stack
- Elektrische Quelle als Stack Simulation



Li Ionen Batterie inklusive Schütze Master BMS (Steuerungen) und CPS

DCDC-Wandler plus Luftkanal und Lüfter

Nicht sichtbar: Brennstoffzellensteuerung Linc2

Elektrische Last als Simulation des Stacks

Elektrische Quelle als Stack Simulation

Abbildung 9: elektrischer Brettaufbau (Hybridsystem)

[UAP 4.2: Programmierung der elektr. Quelle/Senke](#)

Da bei dem elektrischen Brettaufbau das Wasserstoffsystem noch nicht vorhanden war, konnte das System unabhängig vom einem Wasserstoffprüfstand betrieben werden. Damit das Hybridsystem initial in Betrieb genommen werden konnte, wurde eine elektrische Quelle Senke verwendet. Diese konnte zwar noch nicht die elektrische max. Last des Fahrzeugs abbilden aber simulierte die Stromentnahme und Rekuperation des Fahrzeugs.

[UAP 4.3: Programmierung der Stackkennlinie als simulierter Stack](#)

Um im elektrischen Brettaufbau das Hybridsystem unabhängig von einer Wasserstoffinfrastruktur zu betreiben, wurde eine weitere elektrische Quelle genutzt, um das Stack-Verhalten zu simulieren. Hierzu wurde die Polarisationskennlinie des Stacks in die elektrische Quelle durch Programmierung hinterlegt.

[UAP 4.4: Programmierung des DCDC-Wandlers](#)

Bei dem DCDC-Wandler handelt es sich um einen Step up /Step down Wandler. Der Wandler stellt sicher, dass in jedem Betriebs- und Lebensdauerzustand des Stacks und der Li Ionen Batterie, die Li Ionen Batterie geladen werden kann. Stack sowie Li Ionen Batterie haben einen Beginning of Life (BOL) und End of Life (EOL) und verlieren über die Lebensdauer Leistung bzw. Kapazität. Der DCDC-Wandler besitzt eine CAN-Kommunikation und muss über diese angesteuert werden. Diese wurde in diesem Brettaufbau implementiert.

[UAP 4.5: Programmierung der Hauptsteuerung](#)

Im ersten Schritt wurde die Linde Steuerung LINC2 verwendet. Diese Steuerung wurde nur bis einschließlich der Funktionalen Prototypen als Übergangslösung verwendet. Für die

Steuerung LINC2 ist eine große Wissensbasis im Entwicklungsteam vorhanden, mit dessen ein erstes System schnellstmöglich in Betrieb genommen werden konnte. Für das Vorserien System wurde dann die Software auf die neuen Fahrzeugsteuerung KMC (KION Motion Controller bzw. jetzt KFC KION Fuel Cell Controller) portiert. Die Steuerung LINC2 wurde in den elektrischen Brettaufbau integriert und dient zur Steuerung sämtlicher Komponenten.

UAP 4.6: Programmierung weiterer Schnittstellen

Im elektrischen Brettaufbau mussten auch noch Komponenten aus der Li Ionen Batterie wie Schütze oder auch der elektrische Lüfter, der den DCDC-Wandler kühlt, angesteuert werden. Diese Komponenten wurden auch durch die LINC2 Steuerung angesteuert.

UAP 4.7: Vorabtests zur Bestätigung des Hybridsystemkonzepts

Zunächst wurde alle elektrischen Komponenten einzeln in Betrieb genommen und hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften auf Einsatzfähigkeit verifiziert. In einem zweiten Schritt wurden alle o.g. Komponenten mit der zentralen Steuerung LINC2 elektrisch verbunden und zunächst einzeln angesteuert. Die Inbetriebnahme aller Funktionen war erfolgreich und die daraus gewonnen Erkenntnisse konnten auf den ersten funktionalen Prototypen und dessen Software übernommen werden.

Inhalte und Ergebnisse von AP5 (Definition der max. Zielabmessungen von Hauptkomponenten wie Tank, Stack, Batterie)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP5 (Definition der max. Zielabmessungen von Hauptkomponenten wie Tank, Stack, Batterie)

Im AP5 müssen die Hauptkomponenten, welche den größten Bauraum im Brennstoffzellensystem einnehmen geometrisch definiert sein, um mit der Konstruktion im CAD vorgehen zu können. Die Bauraumbegrenzung des Gesamtsystem war analog einer Blei Säure Batterie. Hier war die Herausforderung die Komponenten so zu platzieren, dass auch die Aspekte Montagefähigkeit und Servicezugänglichkeit berücksichtigt werden konnten.

UAP 5.1: Definition der max. Zielabmessungen von Hauptkomponenten wie Tank, Stack, Batterie

Bei den Abmaßen des Stacks wurde auf die bestehende Generation des Lieferanten zurückgegriffen, da die neue Generation nicht industrialisiert zur Verfügung stand. Der Stack hat 43 Zellen, ist luftgekühlt und wie in den Abbildungen zu sehen mit folgende abmaßen:



Abbildung 10: CAD Modell PEM Stack mit 43 Zellen

Bei dem Hybridsystem wurde auf ein Zellmodul von dem KION Joint Venture Unternehmen KION Battery Systems zurückgegriffen. Das Zellmodul ist auch mit weiteren Komponenten als Li Ionen Batterie mit kleiner Kapazität in Linde Fahrzeuge im Einsatz. Bei dem KBS Compact Modul handelt es sich um eine Li Ionen Batterie (Zellchemie: NCA [Nickel-Cobalt mit Aluminium-Dotierung und ist für den Einsatz in Lagertechnikgeräten entwickelt. Neben dem Zellmodul werden auch die weiteren Peripherie Geräte aus der Li Ionenbatterie wie Steuerungen (Master BMS), Schütze, Spannungsversorgung (CPS) und Sicherungen verwendet.

-vertraulich-

Abbildung 11: CAD: KBS Li-Ionen Batteriemodul

Der Tank ist ein Typ I Tank aus Stahl, um ein höheres Gewicht im Brennstoffzellensystem zu realisieren. Ziel ist es ein max. Tankvolumen in das System zu verbauen, um eine große Reichweite dem Kunden zu ermöglichen. Die Begrenzungen für den Tank inklusive Tankventil sind die Außenabmaße der zu ersetzenden Bleisäure Batterien. Der Tank wird von einer europäischen Hersteller bezogen.

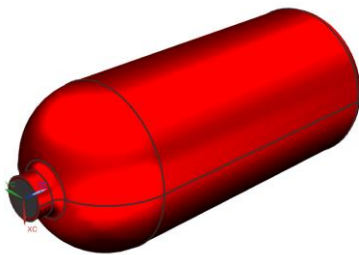


Abbildung 12: CAD H2 Tank

[UAP 5.2: Vorabdefinition aller weiteren Komponenten](#)

Folgende Komponenten wurden weiter definiert. Die Komponentenhersteller sind vorwiegend aus Deutschland und Europa, um die Werkschöpfungskette in Europa zu haben.

Wasserstoffseite:

- Tankstutzen von (IT)
- Tankventil inklusive Druckminderer und Versorgungsventil (IT)
- Druckreduzierungsventil (US)
- Spülventil (D)
- Wasserstoffsensoren (J)
- Luftfilter (D)
- Verrohrungen und Schläuche: (D)

- Lüfter (D)

Elektrisch:

- Brennstoffzellensteuerung, (D)
- Leistungs-DCDC Wandler, (D)
- Grundspannungswandler, (D)
- Drucksensoren: (D)
- Schütze (2St.), (US)
- Sicherungen
- Switchboard (notwendige Steuerung für den Stack), (D)
- Online Kommunikationsmodul plus Antenne (D)

UAP 5.3: CAD-Modellierung von geometrisch nicht final definierten Komponenten

Dieses bezog sich auf z.B. Kabelsätze, mech. Bauteile wie Halter. Diese konnten erst später im Projekt (Feldtestphase) final auf Basis von Montage und Service Erkenntnissen definiert werden. Die Modellierung wurde in einen CAD-Gesamtentwurf eingepflegt

UAP 5.4: Erstellung Konzeptentwurf im CAD auf Basis geometrisch bekannten und unbekannt Komponenten

Das Grundkonzept sah vor, die wasserstoffführenden Teile räumlich von den elektrischen Komponenten zu trennen. Alle elektrischen Komponenten sollten mit einer höheren IP Schutzklasse gegen Wasser und Staub geschützt werden. Hier sollte das System eine Robustheit erreichen, die dem Einsatz der Lagertechnikgeräte entsprechen. Die ersten Gesamtentwürfe ist im CAD in Siemens NX erstellt worden und wurden in das Datenablagensystem ECTR (SAP) eingepflegt. Der CAD-Entwurf wurde während des Projekts immer weitergepflegt auf Basis von neuen Erkenntnisständen. Der Gesamtentwurf ist exemplarisch in Abbildung XX im UAP 11.3 zu sehen

UAP 5.5: Bauraumuntersuchungen im CAD inklusive Luftführung

Ein Lüftungskonzept wurde erstellt. Die Luftansaugung erfolgt über die beiden Stirnseiten links und rechts vom Brennstoffzellensystem. Hier wird gleichzeitig noch der DCDC-Wandler mitgekühlt. Die Luft strömt dann durch den Stack (Reaktionsluft Kathode und Kühlluft) und wird durch den nachgeschalteten Lüfter aus dem System gezogen.

Da keine Bewertung der Strömungsbedingungen und Verdünnungssituation des ausgespülten Wasserstoffes im Entwurf qualifiziert werden kann, wurde mit Siemens Engineering eine CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) durchgeführt.

Die CFD-Simulation hatte 2 Ziele:

- Bestimmung der Thermischen Situation des Gesamtsystems inklusive der damit verbundenen Luftströmung
- H2 Verdünnungssituation am Spülausgang des Stacks in den Abluftstrom

Die Simulationsergebnisse zeigte auf, dass die Luftströmung ausgangszeitig noch konstruktiv optimiert werden musste, damit keine erwärmte Luft wieder zurück in das System gespült wird.

XXXXX



Abbildung 13: CFD-Ergebnisse: links Einströmen des Purge Wasserstoff und rechts die Luftströmungssituation am Ausgang des Systems

[UAP 5.6: Zeichnungserstellung von notwendigen Komponenten](#)

Für den ersten mech. nichtfunktionalen Prototypen wurden alle Zeichnungen und CAD-Teile erstellt. In der folgenden Abbildung 16 ist ein Stand des mech. nichtfunktionalen Prototypen zu sehen. Der mech. nichtfunktionale Prototyp wurde iterativ immer wieder angepasst. Der nichtfunktionale Prototyp wurde auch für konstruktive Zwecke bei Produktions- und Servicekonzept neben dem CAD verwendet.

[UAP 5.7: Beschaffung aller Komponenten mit originaler Hardware, RP Druck, und Frästeilen](#)

Die Hauptkomponenten sind alle als Frästeile, Rapid Prototyping Teile und Serien Teile beschafft worden. In den nachfolgenden Bildern sind der mech. nicht funktionale Prototyp als CAD und in real zu sehen. Der nicht funktionale Prototyp wurde für viele Detailuntersuchungen und Betrachtungen erfolgreich genutzt.



Abbildung 14: links CAD und rechts der nicht funktionale Prototyp

Inhalte und Ergebnisse von AP6 (Aufbau eines funktionalen Brettaufbau des Wasserstoffsystems)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP6 (Aufbau eines funktionalen Brettaufbau des Wasserstoffsystems)

Bei diesem Brettaufbau wurden erstmals alle vorläufigen Komponenten des Wasserstoffsystems und des elektrischen Hybridsystems vereint, bevor diese in den Bauraum integriert werden. Im Brettaufbau sind alle Komponenten für Messungen noch zu zugänglich.

UAP 6.1: Auswahl der Komponenten auf Basis der Systemarchitektur

Nach der Abstimmung mit dem Stacklieferanten wurde ein PID-Diagramm (piping and instrumentation diagram) für den Wasserstoffbrettaufbau erstellt. Mit dem PID-Diagramm wurden dann die entsprechenden Komponenten definiert. Eine Auswahl ausgewählten Hauptkomponenten ist im UAP 5.2 zu sehen.

UAP 6.2: Beschaffung der Wasserstoffkomponenten wie Stack, Ventile durch den Entwicklungsdienstleister

Teile für den nicht funktionalen Prototypen und den Wasserstoff Brettaufbau wurden teilweise direkt beschafft. Wenn die Lieferanten keine angelegten Linde Lieferanten waren, wurde die Beschaffung über einen Entwicklungsdienstleister aus Deutschland durchgeführt. Dieses hatte den Vorteil, die Teilebeschaffung zu beschleunigen und die gesetzten Terminpläne einzuhalten.

UAP 6.3: Aufbau des Wasserstoffsystems als Brettaufbau auf dem Prüfstand

Das Wasserstoffsystem als Brettaufbau wurde aufgebaut und nach Freigabe des Wasserstoffprüfstands in Aschaffenburg in Betrieb genommen (siehe Kapitel 7). An dem System wurden u.a. verschiedene Softwareentwicklungsstände getestet und Betriebszustände durch Grundlagenversuche definiert.

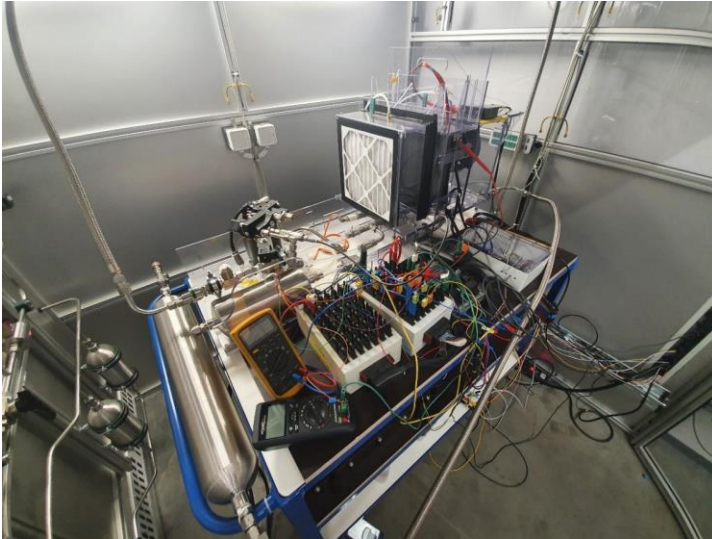


Abbildung 15: Wasserstoffsystem als Brettbaufabrikation am Prüfstand Aschaffenburg

In der Abbildung 15 ist das Wasserstoffsystem als Brettbaufabrikation im Prüfstand Aschaffenburg zu sehen. Der Vorteil des Brettbaufabrikations lag darin, dass alle Messstellen einfach zu erreichen sind. Mit der Inbetriebnahme waren diverse Abstimmungs- und Softwaretest verbunden, und es wurden erste Komponenten auf ihre Tauglichkeit qualifiziert.

UAP 6.4: Inbetriebnahme des funktionalen Brettbaufabrikations

Mit der Inbetriebnahme standen diverse Abstimmungs- und Softwaretest an, und es wurden erste Komponenten auf ihre Tauglichkeit qualifiziert. Regelungsstrategien wurden schon getestet, welche weitere Optimierungsschleifen benötigten. Die Leistungen von 1,8kW des ausgewählten Stacks wurden durch das Wasserstoffsystem als Brettbaufabrikation bestätigt.

UAP 6.5: Vorabtests zur Bestätigung des Wasserstoffsystems

Bezüglich Vorabtests wurde die max. Dauerleistung des Stacks und die Polarisationskurve durch erste Tests bestätigt. Auch die Ansteuerung der Ventiltechnik wurde erfolgreich umgesetzt und bestätigt.

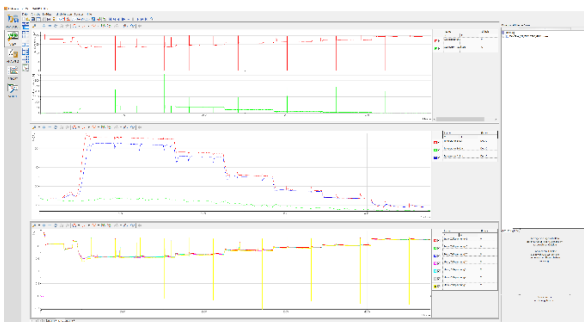


Abbildung 16: Erste Messdaten in DIAdem

Um den ersten funktionalen Prototypen in Betrieb zu können, wurde der funktionale Brettbaufabrikation des Wasserstoffsystems mit dem Hybridsystem (Li-Ionen Batterie, DCDC-Wandler, Schützen, PDU (Power Distribution Board), LINC2 Steuerung, Sicherungen,) ergänzt. Ziel war es, alle Komponenten aus dem Brettbaufabrikation „Elektrik“ und „Wasserstoff“ zu

vereinen (Abbildung 2) und in Betrieb zu nehmen, bevor der erste Funktionale Prototyp aufgebaut wurde.

Nach der Inbetriebnahme des Wasserstoffsystems, der Li-Ionen Batterie, des Spannung Wandlers wurden auch folgende weitere Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten an dem Brett Aufbau durchgeführt:

- Software-Entwicklung an der Steuerung LINC2
- Erste Untersuchung der Purge-Volumenströme, um ein Austreten von kritischen Wasserstoffmengen zu vermeiden
- Analyse des Wasserstoff-Druck-Reglers nach dem Tankventil
- Vergleich unterschiedlicher Komponenten, wie z.B. Drucksensoren oder Spülventile, um Lieferanten bewertet zu können
- Erprobung von Systemkomponenten (Überprüfen der Spezifikationen)

Mit den Erkenntnissen aus den oben genannten Untersuchungen konnte eine Komponentenauswahl unter Berücksichtigung von Herstellkosten getroffen werden. Weiter konnte die Software des Systems so weit entwickelt werden, dass der Übergang in den ersten funktionalen Prototypen stark erleichtert wurde.

Der funktionale Brett Aufbau wurde nach den ersten Aktivitäten nochmals für die Applikation des finalen Brennstoffzellensteuerungsgerät KFC (KION Fuel Cell Controller) verwendet. Hier konnten der Aufbau für die Softwarevalidierung genutzt werden.

Inhalte und Ergebnisse von AP7 (Aufbau Brennstoffzellenprüfstand)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP7 (Aufbau Brennstoffzellenprüfstand)

Um das 24V Brennstoffzellensystem entwickeln und testen zu können ist eine Infrastruktur notwendig, die u.a. Wasserstoff und eine sichere Umgebung für Testmöglichkeit zur Verfügung stellt. Diese Infrastruktur, d.h. ein Brennstoffzellensystem Prüfstand war bei Linde MH nicht vorhanden und musste am Anfang des Projekts projiziert, aufgebaut und freigegeben werden.

UAP 7.1: Erstellen der Spezifikation für BZ-Prüfstand

Für den zu errichtenden BZ-Prüfstand wurde ein Lastenheft angelegt. Es sollen Test unter HIL-Bedingungen (Hardware in the Loop) durchgeführt werden. Folgende Randbedingungen wurden für den Prüfstand definiert:

- Es sollen BZ-Systeme (incl. Hybridbatterie) bis zu einer elektrischen Dauerleistung von 18 kW und Peak-Leistung von 50 kW geprüft werden können. Die maximale Ausgangsspannung der FC-Systeme beträgt typ. 80 V DC (max. 90 V). Hierbei sollten zuvor aufgezeichnete Fahrzeug-Lastspiele über eine programmierbares Zwei-Quadranten-Netzteil aufgeprägt werden können.
- Aufgrund des Wirkungsgrades der Brennstoffzelle von 45% ist mit einer Abwärme von ca. 22 kW zu rechnen, welche über das Lüftungssystem entsorgt werden muss.
- Die Brennstoffzelle muss vom Prüfstand mit Wasserstoff auf niedrigem Druckniveau (Überdruck von 0,2...2,0 barg) versorgt werden. Zusätzlich ist über einen zweiten Strang die Versorgung auf Mitteldruckniveau (bis 15 barg) eingerichtet worden. Das notwendige und zu errichtende Gaslager ist außerhalb der Werkshalle errichtet worden.

UAP 7.2: Planung des BZ-Prüfstand mit Lieferanten und Werksplanung

In Abstimmung mit Werksplanung, Lieferanten und dem Projektteam wurde das neue Wasserstofflabor incl. BZ-Prüfstand geplant. Folgende Pläne und Darstellungen sollen das Vorhaben veranschaulichen.

UAP 7.3: Erstellen der HazOP-Studie/Risikomanagement in Zusammenarbeit mit TÜV Süd

In Zusammenarbeit mit dem TÜV Süd und dem Prüfstandsbauer wurde eine HazOp-Studie (Hazard and Operability) als Gefährdungsanalyseverfahren durchgeführt. Diese sollte frühzeitig Gefährdungen zu erkennen und diese vermeiden. Ausgangspunkt waren die Planungen, die in Kapitel 7.2 dargelegt wurden.

Ergebnis dieser HazOp-Studie waren u.a. die SIL-Klassifizierungen der Gaswarnanlage sowie der Lüftungsüberwachung. Außerdem wurde in diesem Zusammenhang die C&E-Matrix (Cause & Effect) erstellt. Weiterhin wurden die Gefährdungsbeurteilungen hinsichtlich der Druckgeräterichtlinie sowie des Explosionsschutzes erstellt. Aus diesen Dokumenten wurde des Explosionsschutzdokument wiederum erstellt.

UAP 7.4: Bauliche Vorbereitungen für Prüfkabine

Die bauliche Vorbereitung für die Prüfkabine war am gewählten Standort im Linde Werk notwendig. Hierzu wurde ein Raum von einem bestehenden Raum mit Mauerwerk abgetrennt und die Vorbereitung der Medienzu- und Abfuhr erstellt. Im Außenbereich wurden die baulichen Vorbereitungen des Gas Lager vorbereitet. Hierzu mussten Mauern und einen Anfahrtschutz errichtet werden. In den nachfolgenden Bildern ist zuerst das Gasaußenlager und auf der zweiten Abbildung die Prüfkabine mit Wasserstoffstruktur erkennen.



Abbildung 20: links Außengaslager / rechts Prüfkabine

UAP 7.5: Einbau Prüfkabine und Gaslager durch Lieferanten

Die Prüfkabine inklusive Verrohrung, Armaturen und Steuerungen wurde von Prüfstandsbauer aus Deutschland nach der Bauvorbereitung eingebaut. In den Abbildung 21 ist diese zu sehen. Der Prüfstandsbauer war auch an unterstützend bei der Abnahme durch den TÜV SÜD tätig.

UAP 7.6: Einbau elektrische Last und Messtechnik

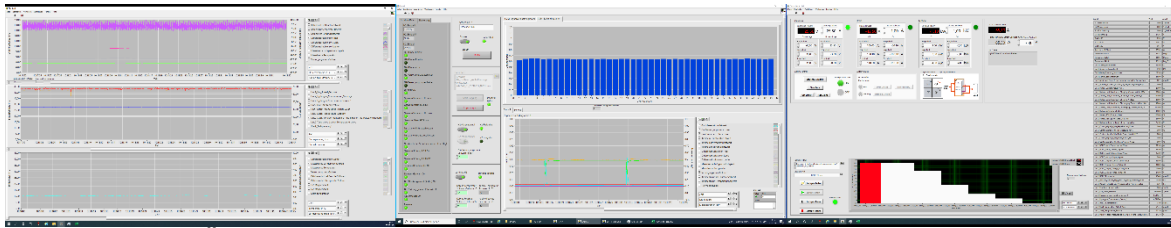


Abbildung 21:Übersicht LabView Oberfläche Prüfstand

Seitens Messtechnik wurde das ein Labview System installiert (Abbildung 22). Dieses System wurde anforderungsspezifisch für Linde MH angepasst. Eine Quelle Senke wurde installiert in Betrieb genommen. Die elektrische Quelle Senke simuliert die Fahrzeuglasten. Überschüssiger Strom im Testbetrieb durch Rekuperation wird umweltschonend wieder in das Stromnetz rückgespeist.

UAP 7.7: Inbetriebnahme und Abnahme des Prüfplatzes

Die Inbetriebnahme und zusätzliche Abnahme, wie z.B. Ex-Schutz und Dichtigkeit nach Druckgeräterichtlinie wurden von dem TÜV SÜD durchgeführt. Die Anlage ist seit 03/2021 zu den Entwicklungsarbeiten für das KION HyPower 24V Projekt freigegeben und in Betrieb. Zusätzlich mussten noch Schulungen/Trainings und Unterweisungen der Mitarbeiter durchgeführt werden, um ein sicheres Arbeiten am Prüfstand zu gewährleisten.

Inhalte und Ergebnisse von AP8 (Erstellung FMEA/Risikomanagement für BZ-System)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP8 (Erstellung FMEA/Risikomanagement für BZ-System)

Das Risikomanagement bestehend aus einer Design FMEA, um Risiken auf Ausfall und deren Folgen auf Bauteilebene zu berücksichtigen. Parallel wird zusätzlich eine Risikobeurteilung nach ISO 12100 durchgeführt die Gefährdungen durch eine Maschine bewertet. Diese wird dann nochmal weiter detailliert mit der DIN EN ISO 13849-1, welche sich auf die Steuerung der Maschine bezieht. Aus der Risikobeurteilung werden für die funktionale Sicherheit auch Sicherheitsfunktionen und Performance Level der Sicherheitsfunktionen definiert.

Dieses Risikomanagement ist entwicklungsbegleitend. Für einen späteren Montageprozess muss zusätzlich eine Prozess FMEA für die Montage durchgeführt werden, um Montagerisiken zu identifizieren und zu eliminieren.

UAP 8.1: Abstimmung Aufbau der FEMA

Im ersten Schritt wurde eine Design FMEA auf Basis des PID-Diagramms des 24V Brennstoffzellensystems durchgeführt. Für die FMEA wurde ein interner Manager Technical Risk Assessment genutzt, der die FMEA-Methodik im Detail kennt und die FMEA moderiert und dokumentiert hat. Zur Dokumentation wurde die Software PLATO E1ns eingesetzt, die bei allen Linde FMEAs aktuell genutzt wird.

UAP 8.2: Durchführung und Dokumentation der FMEA Risikobeurteilung Gesamtsystem

Hierbei handelt es sich nicht um eine FMEA, sondern um eine Risikobeurteilung zur Festlegung der sicherheitsrelevanten Funktionen. Die Risikobeurteilung wurde begleitet mithilfe eines Mitarbeiters aus internen Bereich Functional Safety & Security.

Es wurden insgesamt 8 Sicherheitsfunktionen für das Brennstoffzellensystem definiert. Diese wurden bei der Entwicklung durch Auswahl der Komponenten bzw. in der Softwareentwicklung berücksichtigt. Auch dieser Prozess ist analog der Design FMEA entwicklungsbegleitend.

UAP 8.3: Durchführung und Dokumentation der FMEA Subsystem Wasserstoff

Im ersten Schritt wird bei der Design FMEA das Wasserstoffsystem betrachtet, d.h. vom Betankungsstutzen über den Wasserstofftank bis zum Stack Auslassventil. Die Dokumentation wird wie in UAP8.1 beschrieben in PLATO E1ns durchgeführt. Aus der FMEA ergaben sich noch weitere Aufgabenpakete, welche zu großen Teilen mit Versuchen durchgeführt bestätigt wurden. Der Subsystem Bereich wurde bei der Risikoanalyse unabhängig von Experten vom TÜV SÜD gegengeprüft.

UPA 8.4 --> Durchführung und Dokumentation der FMEA Subsystem Hybrid/Elektrik

Eine FMEA für das Hybrid/Elektrik war Bestandteil der Gesamt FMEA. Bedingt durch die Übernahme des Batteriemoduls aus dem KION-Konzern, konnte die FMEA der Li-Ionen Batterie mit in die FMEA des Gesamtsystems verknüpft werden.

UAP 8.5: Review der offenen Punkte aus FEMA

Die offenen Punkte aus UAP8.3 und UAP8.4 wurden regelmäßig, d.h. alle 3 Monate in einem Regeltermin über den Fortschritt verfolgt. Bei Änderungen innerhalb der Architektur oder der Konstruktion wurde die Risikobeurteilung und FMEA iterativ angepasst und neu bewertet.

Inhalte und Ergebnisse von AP9 (Softwareentwicklung Steuerung)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP9 (Softwareentwicklung Steuerung)

Die Software ist das Kernkomponente des Brennstoffzellensystems, da hier sämtliche Steuerungs- und Regelungsstrategien sowie Überwachungs- und Sicherheitsfunktionen hinterlegt sind. Diese haben Einfluss auf die Performance, die Lebensdauer sowie die Sicherheit des Brennstoffzellensystems. Die Hauptaufwände für die Entwicklung eines neuen Brennstoffzellen-systems lagen in diesem Arbeitspaket.

UAP 9.1: Auswahl und Prüfung der Hardware aus Konzernsteuerungen

Im ersten Schritt wurde auf Basis der vorhandenen Hardware LINC2 eine erste Regelungs-Software für das Brennstoffzellensystem entwickelt. Die LINC2 Steuerung ist eine bewährte, universelle Steuerung, die bei Linde vielfältig zum Einsatz kommt und kam.

Die LINC2 wurde für die funktionalen Prototypen verwendet. Parallel wurde die Software bis zur Vorserie auf eine leistungsfähigere Steuerung, dem KION Motion Controller (KMC), portiert. Der KMC-Controller ist zukunftsgerichtet und wird bei zahlreichen neuen Fahrzeugbaureihen eingesetzt. Diese Steuerung soll die Basis aller Brennstoffzellensysteme bei KION sein und heißt nach der Anpassung für das Brennstoffzellensystem nun KION Fuel Cell Controller (KFC).

UAP 9.2: Festlegen Coding Guidelines, Arbeitsweise Softwareentwicklung definiert

Es wurde die agile Arbeitsweise unter Nutzung eines Scrum-Boards für die Entwicklung des Brennstoffzellensystems und der Software gewählt. Hierzu wurden u.a. Dailys und Sprint-Reviews eingeführt.

Als Programmiersprache wurde C gewählt und zur Softwareablage dienten GIT sowie PTC-Source. Weiterhin wurden umfangreiche Coding-Guidelines festgelegt, um eine hohe Wartbarkeit und Wiederverwendbarkeit des Quell-Codes sicher zu stellen.

Speziell für die sicherheitskritischen Anteil wurden zusätzliche Maßnahmen, wie verschärfte Coding-Regeln, Reviews und Unit-Tests, definiert, um die Qualität und Ausfallsicherheit der Software zu gewährleisten.

UAP 9.3: Erstellung der Softwarearchitektur

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde die grundlegende Software-Architektur des Brennstoffzellensystems auf Basis des KFC erstellt.

Zunächst wurde eine Unterscheidung zwischen funktionalen sowie sicherheitskritischen Funktionalitäten der Software getroffen. Anschließend wurden für beide Teile notwendige Zustandsautomaten (Statemachines) entworfen. Abschließend wurden sämtliche Regelungs- und Überwachungsfunktionen definiert sowie deren Aufrufe an die korrekten Positionen verankert.

UAP 9.4: Inbetriebnahme SW für das Hybridsystem: Software auf funktionalen elektrischen Brettaufbau

Zunächst wurden alle Komponenten einzeln über die LINC2 angesteuert und auf Funktion getestet.

Dann erfolgte zunächst eine Inbetriebnahme des Hybridsystem ohne elektrische Last, die das Fahrzeug repräsentiert würde. Es wurde versucht aus dem Stack die Pufferbatterie auf einem bestimmten SOC mit Hilfe des DCDC-Wandlers zu laden. Die Regelung erfolgt hierbei über die LINC2. Anschließend wurde versucht, ob dies auch möglich ist, wenn ein 2-Quadranten Netzteil, welches das Fahrzeug mit Energieentnahme sowie Rekuperation simuliert, angeschlossen ist.

Weiterhin wurden Untersuchungen hinsichtlich der Temperaturregelung bzw. Kühlleistung des DCDC-Wandlers durchgeführt.

UAP 9.5: Inbetriebnahme SW für Wasserstoff Prüfstand

Die Entwicklung einer Prüfstandsteuerung incl. deren Inbetriebnahme auf Basis von LabView wurde durchgeführt. Deren Aufgabe ist die Druckregelung der Prozessgase, die Erfassung von Massenströmen, die Klimatisierung und Kühlung der Prüfkammer, Erfassung des Gaslagers sowie Erfassung von Stack-Temperaturen, Zellspannungen, Drücken und vielen weiteren Größen.

Alle notwendigen Bedienungen und Einstellungen des Prüfstandes können über die LabView-Oberfläche vorgenommen werden (vgl. Abb.22). Elektrische Lastspiele, die ein Fahrzeugeinsatz simulieren, können abgespielt werden. Außerdem können alle erforderlichen Daten und Messgrößen visualisiert und in Dateien zur Auswertung geloggt werden.

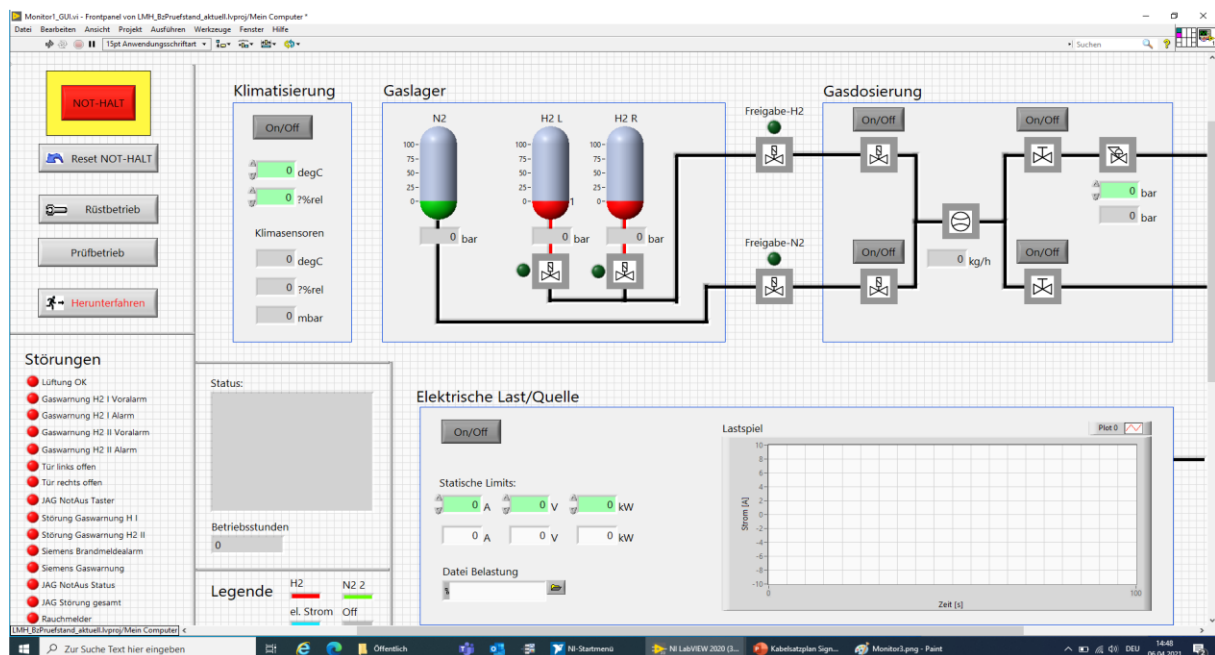


Abbildung 22: Benutzeroberfläche der Prüfstandssteuerung

Eine Scriptsprache zur Automatisierung auf Basis XML wurde definiert (Syntax). Ein Parser zur automatisierten Abarbeitung dieser Prüfskripte wurde erstellt.

UAP 9.6: Modulentwicklung funktionale Software: Brennstoffzellenregelung

Die Funktionen zum Starten des Brennstoffzellensystems wurden implementiert. Diese beinhalten u.a. die Durchführung des initialen Leckage-Tests, des Startup-Purges sowie die Umsetzung aller weiteren sicherheitsrelevanten Prüfungen.

Eine Funktion zum kontinuierlichen Betrieb des Brennstoffzellen-Stacks wurde entwickelt. Hierbei war insbesondere eine genaue Temperaturregelung zu erstellen, die es ermöglicht, den Stack in einem optimalen Temperaturbereich zu betreiben. Dies ist insbesondere für eine minimale Degradation des Stack von Bedeutung. Hierzu musste eine Regelung entwickelt werden, die neben der Kühlung auch die ausreichende Versorgung des Stack mit Luftsauerstoff sicherstellt.

Für den sicheren, kontinuierlichen Betrieb wurden zusätzliche Temperatur- und Drucküberwachungen implementiert. Weitere Plausibilisierungen auf Basis unterschiedlicher Sensorsignale wurden realisiert, um einen zuverlässigen sowie sicheren Betrieb des Stack zu gewährleisten.

Um den Brennstoffzellen-Stack sicher und geregelt herunterzufahren, musste ebenfalls ein neuer Zustandsautomat entworfen und programmatisch umgesetzt werden.

Folgende zusätzliche Optimierungen wurden umgesetzt:

- Optimierung der Temperaturregelung hinsichtlich der Geräuscentwicklung. Durch verbesserte Algorithmen konnten die Lüfterdrehzahlgradienten reduziert werden.
- Startup-Pulsen, welches zur Erhöhung der Stack-Lebensdauer beiträgt.
- Implementierung einer Drehzahlerhöhung beim Runtime-Purge.

All diese Funktionalitäten wurde auf Basis der bisherigen Steuerung (LINC2) implementiert und erfolgreich getestet.

Weiterhin mussten zahlreiche Fehler- und Diagnosemeldungen implementiert werden.

UAP 9.7: Modulentwicklung funktionale Software: Hybridregelung

Zur Regelung des Hybridsystems wurden die zuvor in Matlab/Simulink simulierten Regelungsstrategien in numerische Algorithmen portiert (programmiert) und am Benchtop-System validiert. Ein Hauptaugenmerk wurde auf die optimierte Nutzung des Hybridspeichers (LIB) gelegt, um diesen mit einer möglichst geringen Anzahl an Vollzyklen zu betreiben.

Außerdem wurde eine umfassende Parametrierung eingerichtet, um das System detailliert und zielgerichtet optimieren zu können.

UAP 9.8: Modulentwicklung funktionale Software: Schnittstellenmodule

Modul zur Kommunikation mit der Prüfstands-Software

Ein Modul zur Kommunikation mit der Prüfstands-Software wurde entwickelt. Dieses wird insbesondere benötigt, um detaillierte Einblicke in die Steuerung-Algorithmen zu erhalten

sowie um gezielte Manipulationen an den Regelfunktionen sowie Zustandsautomaten vornehmen zu können.

UAP 9.10: Modulentwicklung funktionale Software: weitere Komponenten)

Modul zur Kommunikation mit der Lithium-Ionen-Batterie (LIB)

Ein Zustandsautomat (auf Basis CANopen) zur vollständigen Kommunikation mit der Lithium-Ionen-Batterie wurde umgesetzt. Zur Optimierung der Hybridregelung wurden die Messintervalle von wichtigen Prozessgrößen erhöht.

Modul zur Kommunikation mit dem DCDC-Wandler

Der DCDC-Wandler stellt ein zentrales Stellglied im Rahmen der Hybridregelung dar, welcher die Ströme vom Stack in Richtung LIB einstellt. Das Protokoll zur Kommunikation mit dem DCDC-Wandler wurde im Rahmen dieses Arbeitspaketes komplettiert.

Modul zur Kommunikation mit dem Wasserstoffsensor

Das Modul zur Kommunikation mit dem Wasserstoffsensor wurde implementiert. Die Kommunikation über den CAN-Bus wird durch eine CRC-Prüfsumme abgesichert, welche beim Empfang der Nachricht geprüft werden muss.

UAP 9.10.1.1: Externes Laden bei Tiefenentladung der Li-Batterie

Die Hybrid-Batterie (LIB) ist Tiefenentladen, wenn die verbleibende Energie nicht mehr zum Starten des Brennstoffzellensystems ausreicht. Das Batterie-Management-System (BMS) der LIB befindet sich dann zum Schutz der Lithium-Ionen-Zellen ebenfalls im Tiefschlafmodus.

Um das Brennstoffzellensystem aus diesem Zustand wieder in den Betriebszustand versetzen zu können, wurde ein Lademodus implementiert, um mit Hilfe eines externen Ladegerätes die Hybrid-Batterie wieder aufladen zu können.

UAP 9.10.1.2: Aufwach- und Einschlafverhalten des FC-Systems

Um eine Tiefenentladung der Li-Ion Hybrid Batterie nahezu ausschließen zu können, wird das Einschlaf- und Aufwachverhalten des FC-Systems abhängig von Komponentenzuständen (Lade- und Fehlerzustand der Li-Ion Hybrid Batterie) gesteuert. Die Komponentenzustände werden zyklisch auch im inaktiven Zustand des Brennstoffzellensystems ausgewertet und führen bei Erreichen von kritischen Schwellwerten zum vorzeitigen Tiefschlaf des FC-Systems (geringe Leistungsentnahme). Das System lässt sich aus dem Tiefschlaf nur noch manuell aufwecken. Hierfür wurden alle notwendigen Implementierungen in Software umgesetzt und getestet.

UAP 9.10.1.3: Erhöhung der Verfügbarkeit im Leistungsbereich der Li-Ion

Hybridbatterie

Anhand der Zustandssignale, die das BMS der Li-Ion Hybrid Batterie liefert, konnte eine Steigerung der Verfügbarkeit des Systems durch eine optimierte Signalauswertung erreicht werden.

UAP 9.11: Anpassung der Bestückung (Hardware-Modifikation, für KFC)

Wir ursprünglich in Punkt UAP 9.1 beschrieben wurde, ist die Verwendung einer modernen, leistungsfähigen und zukunftssicheren Konzernsteuerung für das Brennstoffzellensystem unabdingbar. Hierfür wurde eine geeignete Konzernsteuerung (interne Bezeichnung KMC --> KION Motion Controller) identifiziert.

Um diese für das Brennstoffzellensystem nutzbar zu machen, waren diverse Hardware-Anpassungen (Umbestückungen) notwendig. Dieses Derivat wird künftig intern als KFC (KION Fuel Cell Controller) bezeichnet.

UAP 9.12: Anpassung des Bootladers & Neutralsoftware der KFC

Um den KFC künftig über die Konzerndiagnose programmieren (flashen) zu können, war eine Anpassung und Validierung des Bootladers erforderlich.

Die Anpassung der Neutralsoftware steht noch aus.

UAP 9.13: Modifikation der Steuerungsarchitektur der KFC

Durch Anpassung der Systemsoftware wurden separate Funktions- und Sicherheitspartitionen geschaffen. Diese stellen die Basis zur späteren Implementierung von Funktions- und Sicherheitssoftware dar. Diese getrennten Partitionen isolieren den funktionalen vom sicherheitsrelevanten Teil der Software (Freedom from Interference), was grundlegende Voraussetzung zum Erreichen, der aus der Risikobeurteilung geforderten, Performance-Levels (PLr) ist.

UAP 9.14: Anpassung der Basis-Software der KFC (Zwischenschicht zwischen BIOS und Applikation)

Um eine möglichst kompatible und somit einfache Portierung der Applikations-Software aus der zuvor genutzten LINC2 zu ermöglichen, sind zahlreiche Erweiterungen in der Zwischenschicht der KFC notwendig:

1. Schaffung von erweiterten Parametrierungsmöglichkeiten.
2. Zugriff auf diese Parametrierung über ein Entwickler-Interface.
3. Absicherung der Parametrierung über gespiegelte Speicherbereiche.
4. Absicherung der Parametrierung mit CRC-Prüfsummen notwendig, welche sowohl innerhalb der Kommunikationswege als auch im nichtflüchtigen Speicher verwendet werden.
5. Portierung und Implementierung der zuvor in der LINC2 benutzten Fehlerverwaltung.

UAP 9.15: Anbindung aller notwendigen analogen/digitalen Ein- und Ausgänge der KFC

Ziel dies Arbeitspaketes war es alle notwendigen digitalen und analogen Signale (Ein- und Ausgänge) für die künftige Funktions- und Sicherheitssoftware zur Verfügung zu stellen.

UAP 9.16: Durchführung einer Risikobeurteilung

Eine erste Risikobeurteilung für das Brennstoffzellensystem wurde durchgeführt und weitestgehend abgeschlossen. Alle relevanten Sicherheitsfunktionen wurden identifiziert und deren notwendigen Performance-Levels (PLr) festgelegt.

UAP 9.17: Inbetriebnahme der angepassten Applikations-Software auf dem neuen Steuergerät (KFC)

Die Portierung der Applikations-Software zur Steuerung und Regelung des gesamten Brennstoffzellensystems stand im Fokus dieses Arbeitspaketes und konnte erfolgreich umgesetzt werden.

Das neue Steuergerät (KFC) löst damit das bisherige Steuergerät LINC2 ab.

UAP 9.18: Durchführung einer Risikobeurteilung (Review)

Die Risikobeurteilung für das Brennstoffzellensystem wurde zusammen mit dem Functional-Safety-Manager überarbeitet. Eine unabhängige Zertifizierungsstelle (TÜV) bestätigte die Richtigkeit sowie Vollständigkeit dieser Risikobeurteilung (Review).

Alle relevanten Sicherheitsfunktionen wurden identifiziert und deren notwendigen Performance-Levels festgelegt.

Außerdem wurden eine Differenzierung des Umfangs der funktionalen Sicherheit für Feldtest (Kompensation durch erhöhten Wartungs-/Service-Aufwand) sowie Serien-Produkt vorgenommen.

UAP 9.19: Formulieren der Anforderungen an die funktionale Sicherheit

Auf Basis der zuvor durchgeführten Risikobeurteilung wurden in diesem Arbeitspaket die Anforderungen an die entsprechenden Sicherheitsfunktionen definiert. Gemäß dem Entwicklungsprozess für sicherheitsrelevante Software wurden diese Anforderungen in PTC-Integrity gemäß dem V-Modell dokumentiert.

Auch hier wurde eine Differenzierung des Umfangs der funktionalen Sicherheit für Feldtest (Kompensation durch erhöhten Wartungs-/Service-Aufwand) sowie Serien-Produkt vorgenommen.

UAP 9.20: Programmierung der funktionalen Sicherheitsfunktionen

Auf Basis des zuvor erstellten Lastenheftes bzgl. wurden die funktionalen Sicherheitsfunktionen für den Vorserienstand (Feldtest) in der Programmiersprache C für das neue Steuergerät (KFC) programmiert. Anschließend erfolgten entwicklungsbegleitende Tests auf Sicherheit und Verfügbarkeit. Alle erforderlichen Sicherheitsfunktionen konnten erfolgreich realisiert werden.

Im nächsten Schritt wurde nun die Sicherheitssoftware für den Serienstand erstellt. Um in der Serie die Wartungsintervalle ausdehnen zu können, wurden weitere Überwachungsfunktionen bzgl. der Wasserstoffsicherheit (diverse Drucktests, neuer H2-Sensor) implementiert.

UAP 9.21: Inbetriebnahme der funktionalen Sicherheitsfunktionen

Es wurden Integrations- und Softwaretests zu den sicherheitsrelevanten Teilen am HIL-Prüfstand implementiert. Anschließend wurden automatisierte Tests durchgeführt. Die Testergebnisse wurden analysiert und Testreports erstellt.

UAP 9.22: Erstellung der Test-Fälle für den bevorstehenden Unit-Test

Der Software-Entwicklungsprozess (V-Modell) für sicherheitsrelevante Software schreibt u.a. die Durchführung von Unit-/Modul-Tests vor. Hierfür müssen zunächst für alle relevanten Sicherheitsfunktionen die Testfälle in Form einer Matrix (Äquivalenzklassentabelle) ausführlich beschrieben werden.

Die Durchführung der Unit-Tests erfolgte automatisiert. Abweichungen vom geforderten Verhalten erforderten eine Quelltextanpassung und ein wiederholtes Testen, so lange bis die gewünschte Sollfunktionalität erreicht wurde. Die finalen Unit-Testreports wurden in PTC-Source als Teil Dokumentation der Sicherheitssoftware abgelegt.

UAP 9.23: Definition des CAN-Protokolls für das Display

Das CAN-Protokoll zur Kommunikation mit einem externen Display wurde definiert und kann im nächsten Arbeitspaket programmatisch umgesetzt werden.

UAP 9.24: Implementierung der CAN-Kommunikation für das Display

Der Treiber, um mit dem Display zu kommunizieren, wurde erstellt und auf BUS-Ebene getestet.

UAP 9.25: Anpassung der funktionalen Statemachine an die Bedienung über das Display sowie Ausgabe wichtiger Informationen über das Display

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgten die Implementierungen zur Anzeige der Betriebsmodi in die Hauptablaufsteuerung (Statemachine) des Programms. Außerdem wurden Funktionen zum Starten und Herunterfahren über das Display implementiert. Weiterhin wurde der bislang enthaltene Notausschalter durch Display-Funktionen ersetzt. Auch das Anzeigen wichtiger Informationen bzgl. Tankfüllstand, Fehlercodes, Betriebsmodi, etc. wurden implementiert.

Eine Zustandsanzeige für den elektrischen Ladezustand und der Temperaturüberwachung der Batterie ist auf dem Display zusätzlich implementiert worden. Abschließend wurden alle Erweiterungen bzgl. des Displays getestet.

UAP 9.26: Durchführung des Unit-Tests der funktionalen Sicherheitsfunktionen

Auf Basis der zuvor erstellten Testfälle wurde ein umfassender Unit-Test der gesamten Sicherheitssoftware (für beide Varianten: Feldtest und SOP) gestartet.

Die Unit-Tests der Sicherheitssoftware Variante Feldtest wurden abgeschlossen und die Ergebnisse dokumentiert.

Die Unit-Tests der Sicherheitssoftware Variante SOP wurden anschließend abgeschlossen und die Ergebnisse dokumentiert.

Zum Projektabschluss lagen keine Auffälligkeiten vor.

UAP 9.27: Durchführung von Integrations-/Reaktions-Tests bzgl. der Sicherheitsfunktionen

Auf einem HIL-System (Hardware-In-The-Loop) wurde die zuvor entwickelte Sicherheitssoftware auf der Zielhardware getestet. Hierbei wurde insbesondere geprüft, ob alle Sicherheitsfunktionen, wie zuvor spezifiziert, reagieren und zuverlässig das Brennstoffzellensystem bei kritischen Situationen/Fehlern in einen sicheren Zustand versetzen. Am Ende dieser Projektphase ist dieser Test für die Variante Feldtest erfolgreich abgeschlossen. Für die Variante SOP erfolgte eine vorläufige Freigabe.

UAP 9.28: Vervollständigen der Dokumentation bzgl. der funktionalen Sicherheit

Die Dokumentation, welche für die funktionale Sicherheit relevant ist, wurde weiter vervollständigt (betrifft Variante „Feldtest“ sowie Variante „SOP“). Es wurden zahlreiche Anforderungen, Systemschaubilder und Ablaufdiagramme dokumentiert/erstellt.

Eine Anpassung der Dokumentation an einen alternativen H2-Sensor mit optimierter Ausfallrate wurde durchgeführt.

Ein Review dieser Dokumente auf Richtigkeit und Vollständigkeit muss noch durchgeführt werden.

UAP 9.29: Erweiterung und Inbetriebnahme der Applikationssoftware; Betrieb eines Fahrzeugs

Die Applikationssoftware wurde auf das neue Steuergerät angepasst und mit diesem erfolgreich in Betrieb genommen. Hierzu waren zunächst umfangreiche Tests des Systems auf dem Wasserstoffprüfstand notwendig, um eine optimale Parametrierung zu ermitteln. Anschließend konnten die ersten Systeme erfolgreich in einem Fahrzeug betrieben werden. Es waren weitere Anpassungen der Software notwendig um die geforderten Leistungsverläufe (Lastzyklen) bereit-zustellen.

Inhalte und Ergebnisse von AP10 (Aufbau und Inbetriebnahme erster funktionaler Prototyp)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP10 (Aufbau und Inbetriebnahme erster funktionaler Prototyp)

Die Funktionalen Prototypen dienen zur ersten Erprobung und Abstimmung des Gesamtsystems. Bei den funktionalen Prototypen liegt der Fokus auf der Funktion des Systems und nicht auf dem finalen Aufbau. D.h. viele Komponenten haben noch nicht einen finalen Vorserienstand und sind meistens aus prototypischen Verfahren hergestellt worden. Weiter müssen die Teile noch nicht alle Bauraumrestriktionen einhalten und sind nicht final qualifiziert. Mit den aufgebauten funktionalen Prototypen wurde erstmalig alle Komponenten, welche vorher auf einem Brett Aufbau betrieben, wurde, in die Zielgeometrie des Brennstoffzellensystems zusammengefügt und in Betrieb genommen.

UAP 10.1: Optimierung der CAD-Modelle



Abbildung 23: CAD-Modell funktionaler Prototyp

Die CAD-Konstruktion musste iterativ immer wieder auf Basis neuer Wissensstände angepasst werden. Hierbei standen Funktionalität aber auch Montierbarkeit und Servicebarkeit im Fokus. Abbildung 11 zeigt einen ersten Stand der Konstruktion für einen funktionalen Prototypen. Abbildung 24 zeigt den finalen Stand, der sich in vielen Bereichen stark verändert hat. Die Herausforderung lag darin, alle Komponenten in einem sehr begrenzten Bauraum unterzubringen zusätzlich musste dann noch auf Verschlauchung und Verkabelung geachtet werden.

Optimierungen erfolgten u.a. beifolgenden Komponenten:

- Tankstützen und Tankklappe
- Luftöffnungen nach Außen
- Hochdruckverrohrung
- Gussteilen
- Kabelsätzen

UAP 10.2: Zeichnungserstellung aus CAD-Modellen bis zu Anfragezeichnungen

Auf der Basis der Abbildung 11 wurden die Fertigungszeichnungen für den ersten funktionalen Prototypen erstellt. Insgesamt mussten über 120 Einzelteilzeichnungen erstellt werden. Die Anfragezeichnungen folgten erst, wenn der erste funktionale Prototyp gebaut und das Konzept bestätigt wurde.

Da der Konstruktionsprozess immer iterativ ist, wurden die CAD-Modelle und Zeichnungen immer wieder angepasst, sobald es neue Erkenntnisse gab.

UAP 10.3: Teilebeschaffung funktionale Prototypen

Die Teilebeschaffung für den ersten funktionalen Prototypen wurde zielgerecht durchgeführt. Bedingt durch die weltweiten Probleme bei Lieferketten mussten z.B. im Bereich Kabelsatz und Stecker Änderungen für den ersten funktionalen Prototypen umgesetzt werden.

Bedingt durch die COVID-19 Pandemie gab es bei der Beschaffung von Elektronik und elektrischen Komponenten Lieferschwierigkeiten und dadurch Verzögerungen. Die Lieferketten waren während der Pandemie teilweise nur rudimentär mit langen Lieferzeiten verfügbar. Preise für Komponenten waren an den Weltmärkten durch die geringe Verfügbarkeit ebenfalls signifikant gestiegen und mussten bei der Auswahl des Lieferanten berücksichtigt werden. Beim Lieferanten für Wasserstoffsensoren musste auch noch ein Lieferantenwechsel vorgenommen werden, da der ausgewählte Lieferant seine Entwicklungs- und Vertriebstätigkeiten auf diesem Gebiet eingestellt hatte.

UAP 10.4: mech. Montage funktionale Prototypen

Die mechanische Montage der ersten funktionalen Prototypen erfolgte bei Linde Material Handling in Aschaffenburg. Bei der ersten Mustermontage fielen Punkte auf, die konstruktiv noch geändert werden mussten. Hierzu gab es Konstruktionsänderungslisten, die dann mit dem mech. Konstrukteur besprochen wurden, um neue Lösungen zu erarbeiten. Ein Beispiel war die Fixierung des Luftfilters über dem Stack. Hier waren die Fixierungen des Luftfilters nicht ausreichend. Auch würde im Servicefall eine einfache Zugänglichkeit des Luftfilters nicht gewährleistet. Ein weiteres Beispiel sind die Außenabdeckungen, die seitens Gesamttoleranz noch nicht das geforderte Abmaß erreicht haben.

Die Montage des FP2 und FP3 sind in Aschaffenburg erfolgt. Im folgenden Schritt wurde die Phase der industrialisierten Prototypen gestartet.

-vertraulich-

Abbildung 24: FP2 Montage

[UAP 10.5: elektrische Montage funktionaler Prototyp](#)

Die elektrische Montage wurde auch intern von Linde Material Handling durchgeführt. Hierzu musste aus der elektrischen Architektur zuerst ein E3 (CAD-Software) Stromlaufplan und Kabelsatzzeichnungen erstellt werden. Mit diesen wurde dann verschiedene Kabelsätze gefertigt und in ersten funktionalen Prototypen montiert. Auch bei der Kabelsatzkonstruktion handelt es sich um einen iterativen Prozess. Die Erkenntnisse aus dem ersten Kabelsatz, wie z.B. falsche Kabellängen oder Steckeränderungen werden in der nächsten Version abgeändert. Auch mussten im Laufe des Prozesses noch Schnittstellen (Stecker) geändert werden, weil sich die Komponenten noch geändert hatten. Die elektrische Montage des FP2 und FP3 wurde auch in Aschaffenburg durchgeführt. Im nächsten Schritt wird jetzt die Phase der industrialisierten Prototypen gestartet. Die Bemusterung der Kabelsätze wurde iterativ fortgesetzt. Hierbei werden noch Kabellängen, Stecker sowie Fixierungspunkte optimiert.

[UAP 10.6: Inbetriebnahme funktionaler Prototyp auf KION-Prüffeld](#)

In Abbildung 26 ist der erste funktionale Prototyp in der Linde Prüfkabine zu sehen. Bei der Erstinbetriebnahme war die Li-Ionen Batterie noch am Anfang demontiert neben dem Brennstoffzellensystem. Diese wurde im Laufe der Inbetriebnahme aber in das Gesamtsystem integriert. Die Inbetriebnahme verlief mit Anpassungen der Software erfolgreich, da viele Funktionen schon auf dem Brett Aufbau Wasserstoffsystem umgesetzt wurden.

Alle weiteren FPs wurden auch erfolgreich auf dem KION-Prüffeld in Betrieb genommen

-vertraulich-

Abbildung 25: erster Funktionaler Prototyp (FP1)

[UAP 10.7: erste Funktionstests mit funktionalem Prototyp](#)

Der erste funktionale Prototyp bildet den CAD-Konstruktionsentwurf in der Realität ab. Folgende Tests wurden mit dem ersten funktionalen Prototyp auf dem Linde MH Prüfstand durchgeführt:

- Inbetriebnahme Gesamtsystem im Package
- Software-Entwicklung, d.h. Anpassung der Software der LINC2 an die neuen Gegebenheiten
- Untersuchung Stack Kühlungskonzept – Absicherung Lüfterperformance
- Untersuchung von real aufgezeichneten Fahrzeug-Lastzyklen
- Untersuchung Kühlungskonzept Li-Ion-Batterie
- EMV-Voruntersuchung

Neben den Tests aus dem letzten Zwischenbericht wurden auch erste Fahrttests in einem Linde Routenzugschlepper P30C durchgeführt. Zur Inbetriebnahme im Fahrzeug musste auch eine Erstbetankung mit dem Überströmpanel durchgeführt werden (Abbildung 27)

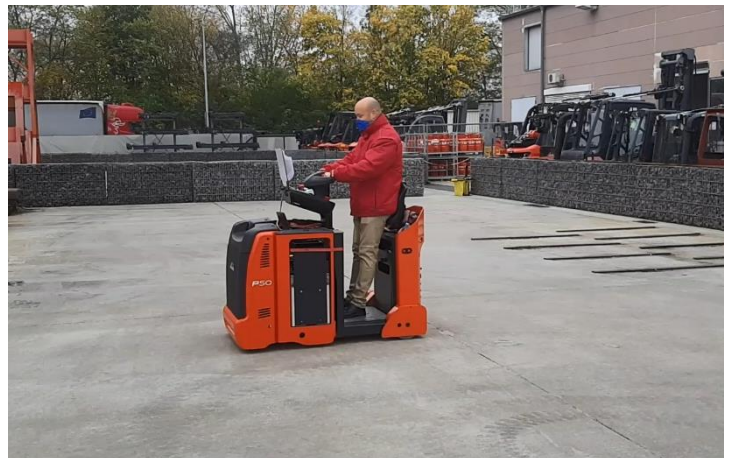


Abbildung 26: links Initial Betankung FP2; rechts erster Fahrttest FP1

Inhalte und Ergebnisse von AP11 (Aufbau und Inbetriebnahme industrialisierte Prototypen)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP11 (Aufbau und Inbetriebnahme industrialisierte Prototypen)

Industrialisierte Prototypen sind die Weiterentwicklung des funktionalen Prototyps. Hierbei liegt der Fokus auf einer optimierten Konstruktion, unter den Gesichtspunkten Montage und Service. Die einzelnen Bauteile haben einen höheren Reifegrad, welche Anfragen an potenziellen Lieferanten zulässt. Bei den Einzelteilen sind die Zeichnungen fertigungsgerecht erstellt und das richtige Fertigungsverfahren ausgewählt. Der industrialisierte Prototyp wird auch dann u.a. für Feldtesteinsätze genutzt.

UAP 11.1: Umsetzung des optimierten Designs/Package aus Ergebnissen von Funktionsprototypen

Wie schon in UPA 10.4/10.5/10.6 erwähnt, flossen alle Erkenntnisse aus Musteraufbauten und Tests kontinuierlich in die CAD-Konstruktion ein. Hierbei wurden u.a. auch Zwischenstände generiert, die teilweise mech. an einem funktionalen Prototyp ausprobiert werden.

Der Montageworkshop fand in 08/2022. mit Mitarbeitern aus dem Bereich Produktion statt. Hierbei wurde ein System in einer Mustermontage montiert. Bei der Mustermontage wurden Erkenntnisse über:

- Montagereihenfolgen
- Vormontageeinheiten
- Zugänglichkeiten von Werkzeugen

ermittelt. Ebenfalls gibt eine solcher Workshop Aufschluss, welche Hilfsmittel für eine Montage notwendig sind, wie Transportwagen, Hebezeuge und Vorrichtungen.



Abbildung 27: Montageworkshop IP1

Aus dem Workshop sind noch kleine Konstruktionsänderungen hervorgegangen. Z.B. hatte noch viele Fixierungspunkte für den Kabelsatz gefehlt oder ein definierter Anschlag für den Brennstoffzellenstack. Diese Änderungspunkte sind in die Einzelteile der Konstruktion eingeflossen.

UAP 11.2: Optimierung der CAD-Modelle

Die CAD-Modelle wurden kontinuierlich aktualisiert. Ein Beispiel für einen Entwicklungsschritt ist die Tankklappe (Abbildung 6). Zuerst sollte ein Tankstutzenkonzept von einem Lieferanten genutzt werden, das aber nicht alle H2 Tankkupplungen von Tankstellen abdeckt. Es gab Tankkupplungen von verschiedenen Herstellern mit verschiedenen Außenabmaßen und mit bzw. ohne Kommunikationseinheit. Z.B. werden Tankkupplungen mit Kommunikationseinheit bei Nutzfahrzeugen genutzt. Diese Tankkupplungen werden u.a. bei der Betankung von Bussen und LKW genutzt. Mit diesen Erkenntnissen wurde eine Tankklappe entwickelt, die diese Anforderung berücksichtigt. Der Vorteil besteht darin, dass ggf. eine gemeinsame Infrastruktur z.B. für LKW genutzt werden kann



Abbildung 28: links 1. Tankklappenkonzept / rechts KION-Tankklappenkonzept

Im Zuge mit der Fahrzeugintegration wurden die mech. Schnittstellen, d.h. wie wird das Brennstoffzellensystem im Fahrzeug fixiert, wo/wie wird das externe Display montiert oder wie kann der Potenzialausgleich erfolgen mit den Fahrzeugkonstruktionen, mit den Konstruktionsstandorten der Fahrzeuge Chatelleraut und Luzzara diskutiert und abgestimmt.

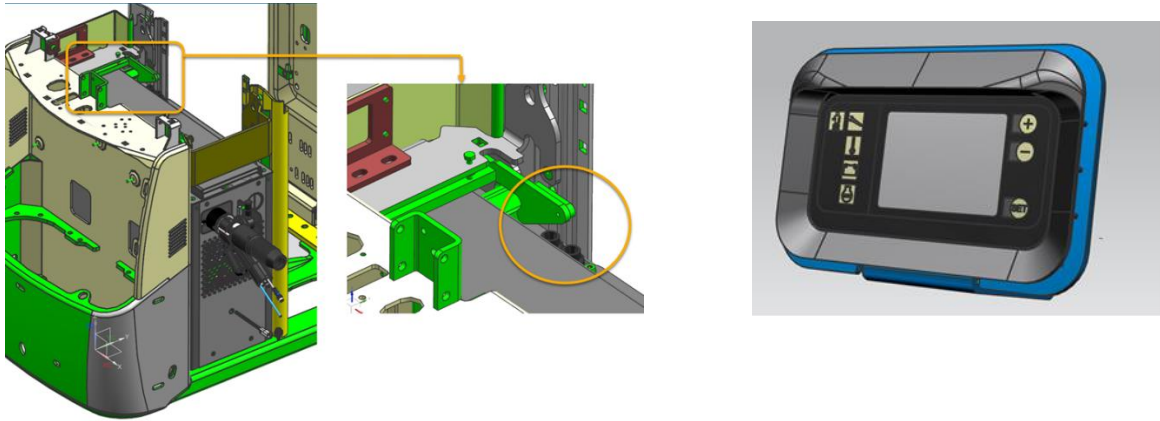


Abbildung 29: mech. Integration in ein Fahrzeug und Displayfixierungskonzept

Ein weiteres Beispiel waren Gussteile, welche in Zusammenarbeit mit dem internen Cost Engineering optimiert wurden, um Kosten bei der Fertigung zu verringern. Aus den Erkenntnissen der Mustermontagen

UAP 11.3: Zeichnungserstellung/Optimierung aus CAD-Modellen

Die Zeichnungserstellung/Optimierung war auch ein kontinuierlicher Prozess. Hierzu wurden die Zeichnungen nach der Erstellung zusätzlich von Produktion, Logistik und Qualität Mitarbeitern geprüft, um Anforderungen aus diesen Fachbereichen an die Komponenten zu berücksichtigen. So sind z.B. Oberflächenbeschichtungen oder Aufnahmen für spätere Betriebsmittel seitens Produktion und Qualität relevant.

Jede Änderung einer CAD-Komponenten und die damit verbundene Zeichnung muss entweder mit einer neuen Version oder einer neuen Teilenummer nachvollziehbar sein. Dies ist ein Standardprozess bei Linde Material Handling. Zusätzlich wurde der Auslieferungszustand der Feldtestsysteme, d.h. Software, Zeichnungen und Stückliste prozessual in ECTR und SAP freigegeben. Dieser Stand diente zur Dokumentation und kann nicht mehr geändert werden.



Abbildung 30: CAD-Modell 24V Brennstoffzellensystem aktueller Stand

UAP 11.4: Anfrage von seriengerichteten Teilen/Aufbau eines Lieferantennetzwerks

Der Neuteileumfang des 24V Brennstoffzellsystems beträgt über 100 Neuteile. Bei Teilen mit langen Lieferzeiten wie z.B. Werkzeugfallende-, Guss- oder Elektrokomponenten wurde sukzessiv bei Lieferanten bezüglich Fertigung und Kosten angefragt. Bedingt durch die für Linde MH neue Brennstoffzellentechnologie waren gerade beim Bereich Wasserstoff viele neue Lieferanten zu identifizieren und zu qualifizieren. Hierzu musste das Linde MH Lieferantennetzwerk erweitert werden. Potenzielle Lieferanten wurden u.a. über Messebesuche, Netzwerkarbeit, CIN-Arbeitskreis identifiziert.

Anbei eine Liste der größten Neukomponenten im Bereich Wasserstoff:

Tabelle 3: Übersicht der relevantesten Neukomponenten

| ID | Komponente |
|----|----------------------------------|
| 1 | H2 Tank |
| 2 | H2 Tankventil |
| 3 | Druckminder |
| 4 | H2 Verrohrung und Verschlauchung |
| 5 | Überdruckventile |
| 6 | H2 Betankungsstutzen |
| 7 | H2 Sensor |
| 8 | Drucksensoren für H2 |
| 9 | Spülventil |

Für die jeweilige Komponente war Linde MH im Austausch mit mehreren Lieferanten, um Anforderungen seitens Linde MH zu klären.

Um gerade bei Neuteilen eine bessere Plausibilität der Kosten zu erhalten, wurde z.B. vom Linde Cost Engineering in Zusammenarbeit mit einem externen Dienstleister eine Kostenanalyse des Stacks durchgeführt.

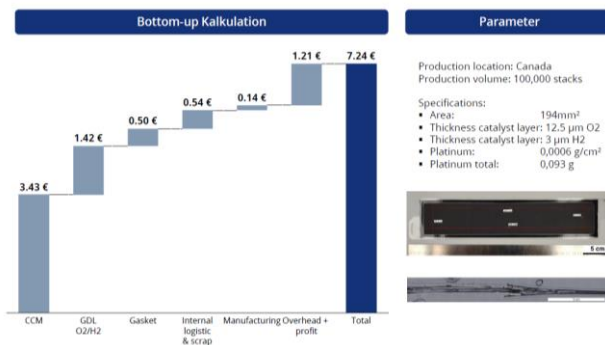


Abbildung 31: exemplarische Kostenkalkulation für die MEA des XXXXX Stacks

Diese soll helfen, ein besseres Verständnis über das Material und Fertigungskosten zu erhalten, um die teuersten Komponenten im Brennstoffzellensystem ökonomisch einzukaufen. Mittelfristig können mit dem Know-How Aufbau weitere Stacklieferanten besser bezüglich Technologie und Kosten bewertet werden.

Der Anfrageprozess wurde erfolgreich abgeschlossen. Für alle Komponenten liegen Lieferanten vor. Bei einigen Lieferanten liegt bedingt durch die Anforderungen nur eine „Single Source“ vor. Dieses muss mit dem Einkauf weiter analysiert werden, um eine breitere Lieferantenbasis aufzubauen.

Single Source Komponenten:

- H2 Stack luftgekühlt
- H2 Tank (Typ I – Stahl)
- Überdruckventile

[UAP 11.5: Teilebeschaffung von seriengerichteten Vorserienteilen \(finales Design\)](#)

Von den Herausforderungen der Covid-19-Pandemie waren auch die Lieferketten und somit die Teilebeschaffung betroffen. Die Aktivitäten sind in Zusammenarbeit mit den Linde Einkauf durchgeführt worden. Auf Basis der Brennstoffzellenstückliste wurde jedes Einzelteil über den dafür vorgesehenen Einkäufer bei verschiedenen Unternehmen angefragt. Hierfür wurde der Linde E-Source Prozess genutzt. Bezüglich elektronischer und elektrischer Komponenten waren viele Abstimmungen mit Lieferanten notwendig, da teilweise Kleinteile wie Stecker nicht oder nur mit sehr langen Lieferzeiten am verfügbar sind. Die kritischsten Bauteile waren werkzeugfallende Teile wie Gussteile, Kabelsätze und Wasserstoffsensoren. Bei Wasserstoffsensoren sind aktuell nur serialisierte Produkte aus Japan und Korea erhältlich. Es ist nach Gesprächen mit deutschen Herstellern davon auszugehen, dass 2025 bis 2026 auch industrialisierte Wasserstoffsensoren von europäischen oder deutschen Herstellern zur Verfügung stehen.

In Bereich Wasserstofftanks Typ I (Stahl) sind leider auf dem deutschen oder europäischen Markt auch nur sehr wenige Hersteller zu finden, welche die Anforderungen von Linde-MH erfüllen können.

Im Gesamten ist zu sehen, dass bei dem Linde Brennstoffzellensystem fast alle Komponenten aus Deutschland und Europa bezogen wurden.

Außennahmen sind folgende:

- Stack (CA)
- Überdruckventile (US)
- H2 Sensor (J)

[UAP 11.6: mech. Montage industrialisierter Prototypen](#)

Im August 2022 ist im Zuge des Montageworkshops der erst industrialisierte Prototyp montiert worden. Durch die Erkenntnisse aus diesem Workshop und aus Versuchsergebnissen wurden einigen Komponenten nochmals konstruktiv überarbeitet. Die Beschaffung wurde dazu angestoßen. Im Februar 2023 wurden 5 weitere industrialisierte Prototypen gebaut. Dieses wird in Kooperation mit Mitarbeitern aus der Montage erfolgen, um hier eine enge Abstimmung zu gewährleisten.

Bei den Mustermontagen waren immer wieder noch Optimierungsbedarf bei der Verlegung der Kabelsätze zu sehen. Iterativ hat sich aber bei jeder Montageschleife die Montage des Systems verbessert und Montagefragen und Reihenfolgen konnten geklärt werden. Mit dem letzten Konstruktionsstand wurden die Feldtestsysteme aufgebaut. Auch konnte mit diesen Erfahrungen eine erste Abschätzung der Montagezeit erfolgen, die wesentlich höher ist als bei der ersten Mustermontage.



Abbildung 32: Montage Industrialisierte Prototypen

[UAP 11.7: Inbetriebnahme industrieller Prototyp auf KION-Prüffeld](#)

Alle industriellen Prototypen wurden in dem Wasserstoffprüfstand in Betrieb genommen. Folgende Tests wurden an allen Systemen bei der Erstinbetriebnahme durchgeführt:

- Flashen des aktuellen Softwarestands
- Fehlerprüfung der Software am System
- Prüfung ob alle Komponenten richtig verschaltet sind
- Drucktest des Drucksystems
- Erstellung einer Leistungskennlinie (UI-Kennlinie) und Vergleich zu weiteren Systemen

Zum Ausliefern der Systeme ist noch eine Prüfung des Druckgeräts nach Modul F notwendig. Die Prüfung beinhaltet eine Druckhalteprüfung bei 350bar. Da dieses nicht am Prüfstand in Aschaffenburg durchgeführt werden konnte, ist dieses bei dem Lieferanten in Großburgwedel in 07.2023 erfolgreich durchgeführt worden. Die Prüfung wurde durch den TÜV SÜD begleitet.



Abbildung 33: Prüfanlage bei JAG



Abbildung 34: IP1 bei Druckhalteprüfung

[UAP 11.8: erste Funktionstests mit IP](#)

Das Brennstoffzellensystem wurde u.a. folgenden Testszenarien unterzogen:

- Leistungsabgabe und Leistungsaufnahme
- Sicherheitsfunktionen

Diese wurde erfolgreich bestanden.

UAP 11.9: erweiterte Funktions- und Leistungstests mit IP

Das Brennstoffzellensystem wurde nach Vorgaben der Fahrzeugkonstruktion getestet. Hierbei muss das Brennstoffzellensystem u.a. einem Leistungstest von 1h mit 6t Last unterzogen werden. Der Test bildet nicht den realen Einsatz ab, sondern ist ein Belastungstest. Dieser Test wird auch bei den Freigaben mit Li-Ionen oder Bleisäurebatterien verwendet. Das Linde Brennstoffzellensystem entspricht den Anforderung der Linde MH Fahrzeugkonstruktion und kann in jeglichen Kundeneinsatz, der für Brennstoffzellen geeignet ist, ohne Einschränkungen eingesetzt werden.



Abbildung 35: Leistungstests im Fahrzeug

Inhalte und Ergebnisse von AP12 (Test/Validierung inklusive CE-Konformität)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP12 (Test/Validierung inklusive CE-Konformität)

Für die Brennstoffzellensysteme wurde eine Normprüfung vorgenommen, welche Normen und Richtlinien für das Brennstoffzellensystem relevant sind. U.a. sind folgende Normen für das Brennstoffzellensystem in Flurförderzeugen relevant:

| | |
|-----------------------|--|
| Richtlinie 2014/68/EU | Druckgeräterichtlinie |
| Richtlinie 2014/30/EU | Elektromagnetische Verträglichkeit |
| IEC EN 62282-4-101 | Brennstoffzellen-Energiesysteme für elektrisch betriebene Flurförderzeuge - Sicherheit |
| IEC EN 62282-4-102 | Brennstoffzellen-Energiesysteme für elektrisch betriebene Flurförderzeuge – Leistungskennwerteproofverfahren |
| ISO 19881:2018-10 | Gasförmiger Wasserstoff - Kraftstofftanks für Landfahrzeuge |
| ISO 19882:2018-11 | Gasförmiger Wasserstoff - Thermisch auslösende Druckmindereinrichtungen für Fahrzeugtanks für verdichteten Wasserstoff |
| EN 12895:2015+A2019 | Flurförderzeuge – Elektromagnetische Verträglichkeit |
| EN 1175:2020 | Sicherheit von Flurförderzeugen – Elektrische/elektronische Anforderungen |

Nach diesen Richtlinien wird die Konformitätserklärung erstellt. Alle Systeme (auch Feldtestsysteme), welche das Linde Werk verlassen, besitzen eine gültige Konformitätserklärung. Zusätzlich muss das Brennstoffzellensystem auch einen Integrationstest im Fahrzeug durchlaufen, bei dem am Ende die CE-Konformität für das Gesamtsystem bestehend aus Fahrzeug inklusive Brennstoffzelle bestätigt wird.

UAP 12.1: Notwendige Tests aus Ergebnissen der FMEA (können noch nicht weiter spezifiziert werden)

Diese Tests wurden aus der FMEA-Betrachtung identifiziert und dann geplant und durchgeführt. Mit den Testergebnissen konnte die FMEA dann wiederbewertet werden.

Im Zuge der Fahrzeugintegration wurde mit den Konstruktionsverantwortlichen der Fahrzeuge in Châtelleraut (FR) und Luzzara (IT) die notwendigen Tests zur Freigabe in den verschiedenen Fahrzeugbaureihen abgestimmt. Da die Brennstoffzelle ein 1:1 Ersatz für eine Bleisäure Batterie ist, müssen alle Anforderungen sowohl auf elektrischer als auch auf mechanischer Seite analog erfüllt werden. Dies wurde im Rahmen unterschiedlichster Untersuchungen auf Komponenten, System und Fahrzeugebene nachgewiesen.

Zum einen musste die geforderte Leistungsfähigkeit des Energiesystems nachgewiesen werden. Dies erfolgt sowohl auf Systemebene am Brennstoffzellenprüfstand, indem die notwendigen Lastzyklen nachgefahren werden (siehe Abbildung 36), als auch in Fahrtests im Fahrzeug.

Neben der Bereitstellung der notwendigen Leistungswerte war ein Nachweis über die Robustheit und Lebensdauer erforderlich, welche über diverse Umwelt (Temperaturvariation, etc.), EMV-Untersuchungen (Störfestigkeit, Störaussendung, etc.) und mechanische Belastungstests (Schock und Vibration) erbracht wird.

Eine sehr zentrale Rolle bei der Absicherung und Validierung nahm die Überprüfung des erarbeiteten H₂-Sicherheitskonzeptes ein. Hierbei war es wichtig, die gesetzten Ziele und Anforderung mit geeigneten Mitteln messtechnisch nachzuweisen.

Als Beispiel sei hier die Untersuchung der maximal auftretenden Wasserstoffkonzentrationen während dem Spülvorgang des Brennstoffzellenstacks erwähnt. Die maximal erlaubten Wasserstoffkonzentrationen werden durch die Risikobeurteilung sowie die anwendbaren Normen (IEC-62282-4-101) definiert. Bei den Untersuchungen wurden mittels eines Massenspektrometers die auftretenden Wasserstoffkonzentrationen an definierten Stellen im Brennstoffzellensystem erfasst. Im Zuge der Untersuchungen wurden unterschiedlichste Varianten der Prallblech- und Abluftkanalgeometrie vorgenommen, um die Wasserstoffkonzentrationen auf die geforderten Maximalwerte zu reduzieren. In Abbildung 37 ist der Messaufbau dargestellt.

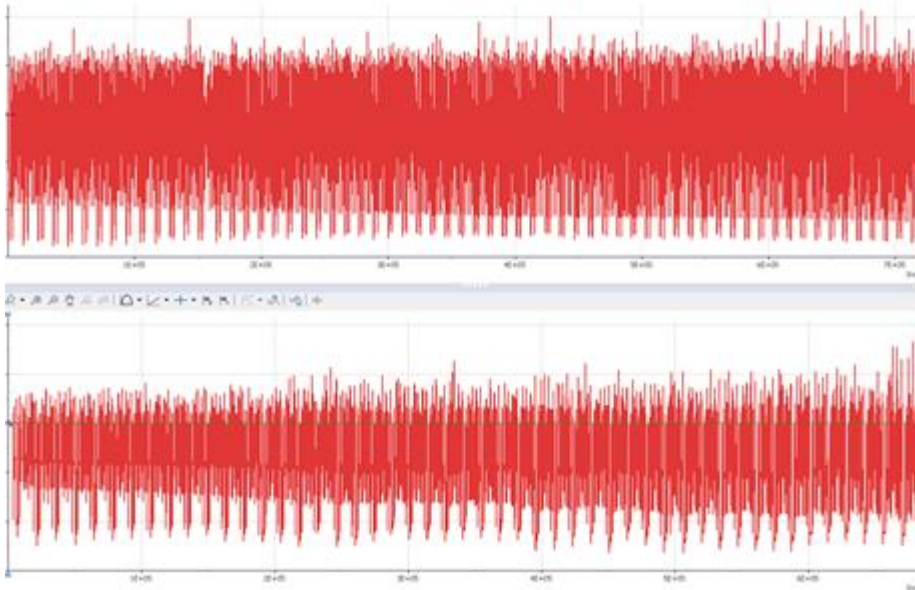


Abbildung 36: Leistungsarbeitsspiele Strom über Zeit



Abbildung 37: Messung Massenspektrometers H-Sense

[UAP 12.2: Tests nach Norm IEC 62282-4-101 / IEC 62282-4-102 / ggf. UL2267](#)

Folgende Tests wurden nach IEC-Anforderung durchgeführt:

- Lebensdauertest 720h
- Temperaturtests
- Durchgangstest (elektrisch)
- Nominelle Dauerleistungstest
- Gehäusebelastungstest
- Test der Tankbefestigung

Zusätzlich wurde mit der Dokumentation zur Erfüllung der IEC 62282-4-101 durchgeführt. Die Dokumentation wird aus Versuchs-/Prüfberichten sowie Komponentendokumenten, -zeichnungen und CAD-Bildern bestehen. Mit der Dokumentation wird nachgewiesen, dass alle Anforderungen der IEC-Norm und damit der Stand der Technik erfüllt wurden.

[UAP 12.3: EMV-Test nach EN 12895](#)

Alle im Brennstoffzellensystem verwendeten Komponenten (z.B. Lüfter, DCDC-Wandler, Power-Distribution-Unit (PDU), Drucksensoren, etc.) wurden hinsichtlich ihrer elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) untersucht. Auf Komponenten-Ebene wurden hierbei deutlich höhere Anforderungen zugrunde gelegt, als dies normativ (EN 12895) gefordert ist, um später im Gesamtsystem alle normativen und regulatorischen Anforderungen zu erfüllen.

Der EMV-Test wurde im Juni 2023 an einem externen akkreditierten Prüflabor durchgeführt. Das Brennstoffzellensystem erfüllt die EN 12895 und die internen Linde Anforderungen, welche wesentlich höher sind. Die erhöhten Anforderungen garantieren, dass das Brennstoffzellensystem auch in Kombination mit dem Fahrzeug die regulatorischen Mindestanforderungen erfüllt.



Abbildung 38: EMV-Messung

UAP 12.4: notwendige Tests nach EN 1175

Um die Anforderungen der elektrischen Sicherheit nach EN 1175 auch auf Komponentenebene zu erfüllen, wurde von der internen Versuchsabteilung der KION-Group ein Versuchsplan nach einem Versuchshandbuch für Komponenten erstellt. Dieses enthält alle Untersuchungen und Validierungs-Tests, die durchgeführt werden müssen, um alle sicherheitsrelevanten Normen und Richtlinien zu erfüllen. Dieses Versuchshandbuch dient ebenfalls als Vorlage um alle im Brennstoffzellensystem verwendeten Komponenten hinsichtlich der EN 1175 zu validieren. Getestet wurde u.a. folgende Komponenten: DCDC-Wandler, Lüfter, Switchboard, Drucksensoren, Purgeventil, H2-Sensoren, etc.

UAP 12.5: Zertifizierung nach Druckgeräte Richtlinie 2014/68/EU

Die notwendigen Schritte, um eine Zertifizierung nach Druckgeräterichtlinie (DGRL) erreichen zu können, wurde mit beratender Unterstützung des TÜV SÜD definiert. Hierbei lag der Fokus auf der Einordnung der Einzelkomponenten in die Kategorie nach DGRL und deren Zertifizierungsnachweis.

Tabelle 4: Übersicht Kategorisierung nach DGRL

| Komponente | Kategorie |
|--|---|
| Wasserstoff Tank, Tankventil (TPRD) | 4 |
| Tankstutzen und Befüllleitung | Auslegung nach guter Ingenieurspraxis (Artikel 4, Absatz 3) |
| Druckminderungsstufen, Überdruckventile | |
| Versorgungs-/Spülventil und Niederdruckschläuche | |

Der Tank in Kombination mit dem TPRD (Thermal Pressure Relief Device), welches im Tankventil verbaut ist und im Falle einer zu hohen Tanktemperatur (bspw. im Falle eines Brandes), den Tank-Druck reduziert und den Wasserstoff gezielt freisetzt, stellt hierbei eine Komponente nach Kategorie 4 dar. Um diese zu erfüllen war eine gesonderte Zertifizierung und Bestätigung der Konformität notwendig. Dieser Nachweis wurde vom Zulieferer des Tankventils durchgeführt, welches somit als Komponente mit einem CE-Zeichen nach DGRL ausgeliefert wird.

Final wird das Brennstoffzellensystem dann von der notifizierten Stelle (TÜV-Süd) im Jahr 2023 bezüglich Druckgeräterichtlinie bewertet (Modul B) und alle Systeme einzeln abgenommen (Modul F).

Weiterhin wurde unter Beratung des TÜV-Süd definiert, welche Prüfungen an einem Band-Ende in der Montage erfolgen müssen. Hier ist bspw. ein Drucktest der Betankungsleitung mit 350bar notwendig, da dieser Druck im Normalbetrieb auftreten kann. Der Feldtest wurde durch Einzelabnahmen nach Modul F durchgeführt. Bei der Serialisierung wird eine Modul D Prüfung mit Baumuster angestrebt, um Einzelabnahmen zu vermeiden. Dies beinhaltet eine Auditierung und Zertifizierung der Produktion und der Abnahmetests vor Inverkehrbringung des Brennstoffzellensystems.

UAP 12.6: Zertifizierung Maschinenrichtlinie

Nach mehreren internen Abstimmungen wurde die Definition eines Brennstoffzellensystems überarbeitet. Zusammen mit Norm- und Standardisierungs-Experten von Linde MH wurde festgestellt, dass die Anwendung der Maschinenrichtlinie nicht passend ist (analog eines Energiesystem wie einer Li-Ionen Batterie).

Zur Zertifizierung wird eine EU-Konformitätserklärung nach

Richtlinie 2014/68/EU Druckgeräterichtlinie

Richtlinie 2014/30/EU Elektromagnetische Verträglichkeit

erklärt.

Zusätzlich werden folgende Normen erfüllt:

- IEC EN 62282-4-101 Brennstoffzellen-Energiesysteme für elektrisch betriebene Flurförderzeuge - Sicherheit
- ISO 19881:2018-10 Gasförmiger Wasserstoff - Kraftstofftanks für Landfahrzeuge
- ISO 19882:2018-11 Gasförmiger Wasserstoff - Thermisch auslösende Druckmindereinrichtungen für Fahrzeugtanks für verdichteten Wasserstoff
- EN 12895:2015+A2019 Flurförderzeuge – Elektromagnetische Verträglichkeit
- EN 1175:2020 Sicherheit von Flurförderzeugen – Elektrische/elektronische Anforderungen

UAP 12.7: Zertifizierung nach EMV-Richtlinie 2004/108/EC

Siehe UPA 12.3

UAP 12.8: CE-Freigabetests

Neben den Test für die Freigabe des Brennstoffzellensystems selbst, mussten Integrationstests im Fahrzeug durchgeführt werden. Um hier bereits im Vorfeld Erfahrungen zu sammeln wurde ein funktionaler Prototyp in das Schwesterwerk in Châtellerault (Frankreich) geschickt, in dem sich die Entwicklung und Fertigung der Fahrzeuge für die vorliegende Brennstoffzellenklasse befindet.

Mit dem System wurden harte Auslegungsarbeitsspiele, über mehrere Stunden gefahren, um zu prüfen, ob diese Fahrzeugfreigabearbeitsspiele von dem Brennstoffzellensystem abgedeckt werden können. Hierbei konnte das Linde Brennstoffzellensystem bestehen und die notwendige Energie dem Fahrzeug bereitstellen. Auch Standsicherheit und Abbremsverhalten nach gesetzlichen Vorgaben konnten bestätigt werden.

Bei den CE-Freigabetests handelt es sich u.a. um die Norm IEC 622824-101 die ein Brennstoffzellensystem in elektrischen Flurförderzeugen einhalten muss.



Abbildung 39: CE Freigabetests

Die Norm gibt Vorgaben für die maximalen Wasserstoffkonzentration, die in der Abluft eingehalten werden müssen. Um dies zu ermittelt wurde mit einem Massenspektrometer die Abluft nach dem Spülvorgang so optimiert, dass die H2 Konzentration so gering ist, dass auf einen Standard-Lüfter zurückgegriffen werden konnte, der keine zusätzlichen Qualifizierungen hinsichtlich Explosionssicherheit aufweisen muss. Das Messverfahren wird in der Norm nicht detailliert beschrieben. Linde hat sich in Rücksprache mit dem TÜV SÜD ein Messverfahren erarbeitet, dass hier zu Anwendung kam.

Dauerlaufstest

Der Dauerlaufstest ist ebenfalls eine Anforderung der IEC 624482-101, bei dem das Brennstoffzellensystem nach einem gewählten Arbeitsspiel 720h auf einem Prüfstand betrieben werden soll. Das System war auf einem externen Prüfstand in Magdeburg, da die Prüfstands Kapazitäten bei Linde Material Handling nicht ausreichen, um diese Arbeiten termingerecht durchzuführen. Der Prüfstand bei Linde MH war mit weiteren

Freigabepfahrungen und Softwarequalifikationen komplett belegt. Der Dauerlaufstest wurde mit 720h erfolgreich abgeschlossen.

Drucktests

Die hochdruckführenden Teile wurden im ersten Schritt an der hauseigenen H2 Tankstelle (Förderprojekt von NOW LMH-P2 goes green) mit bis zu 350bar abgedrückt und mittels H2-Detektoren die Dichtigkeit festgestellt. Des Weiteren wurden die Systeme auch hier für Erprobungszwecke betankt.



Abbildung 40: Probetankung KION HyPower 24 Fuel Cell an der Tankstelle LMH P2-goes green

Diese Tests dienen zur Vorbereitung und Freigabe der Feldtestfahrzeuge bei externen Kunden.



Abbildung 41: performantes Arbeitsspiel Routenzugschlepper in Chatellerault (FR)

UAP 12.9 Shock- und Vibrationstests

Ein Shock und Vibrationstest in alle 3 Achsen wurde bei einem externen Dienstleister durchgeführt. Hierbei wurden mehrere Optimierungsschleifen durchlaufen, bei denen unterschiedliche Stellen im Bereich der mechanischen Konstruktion und Bauteilfixierungen

optimiert wurden. Auch wurden Scheuerstellen identifiziert und konnten konstruktiv optimiert werden. Die Feldtestergebnisse bestätigen, dass die Optimierungen vorab erfolgreich waren.



Abbildung 43: Erster Shock- und Vibrationstest

[UAP 12.10: Umwelt, d.h. Temperaturtests nach DIN EN 60068](#)

Das Brennstoffzellensystem wurde unterschiedlichen Temperatur- und Umgebungstest ausgesetzt. Erwähnt seien hierbei die maximalen und minimalen Lagertemperaturen, die Beaufschlagung mit hoher Feuchtigkeit (Test – Feuchte/Wärme zyklisch) sowie die schnelle Veränderung der Umgebungstemperaturen (Temperaturschock) und deren Einfluss auf die Systemkomponenten.

[UAP 12.11: Erstellen der Testdokumentation für die CE-Freigabe](#)

Alle für die Freigabe des Brennstoffzellensystem durchgeführten Versuche und Nachweise, sowie die Dokumentationen der eingesetzten Komponenten und wurden dokumentiert und zentral im PLM-System von Linde abgelegt.

[UAP 12.12 Begleitender Prozess durch TÜV zur Zertifizierung](#)

Der TÜV Süd hat ein Review der Risikoanalyse des Wasserstoffsystems an dem Brennstoffzellensystem durchgeführt. Hierzu wurden bis auf Komponentenebene das System analysiert und bewertet. Zusätzlich wurde das Thema Druckgeräterichtlinie inklusive Zertifizierung besprochen. (siehe auch UAP 12.5)

Der TÜV SÜD hat die Entwicklungsphase des Brennstoffzellensystems bei Linde MH begleitet und bei der Findung der richtigen Definitionen der Bauteile und der Baugruppe im Sinne der Druckgeräterichtlinie unterstützt. Auch wurde nach Hinweisen, die vorläufige Betriebsanleitung nochmals hinsichtlich der Anforderungen der DGRL überarbeitet.

Neben dem Bereich des Druckgeräts hat der TÜV SÜD auch die Risikoanalyse des gesamten Wasserstoffbereichs geprüft und Linde MH hier viele wertvolle Rückmeldungen gegeben. Mit den Rückmeldungen konnte die Risikoanalyse nochmals qualitativ verbessert werden, da eine unabhängige Prüfstelle diese geprüft hat.

Inhalte und Ergebnisse von AP13 (Feldtest)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP13 (Feldtest)

Ziel des Feldtests war die Validierung des Brennstoffzellensystem unter Kundeneinsatzbedingungen. Kunden von Flurförderzeugen haben unterschiedlichste Einsatzbedingungen, die gegenüber einer Pkw oder Lkw-Anwendung stark abweichen. So kommt es auf das Einsatzgebiet an, wie oft ein Fahrzeug beschleunigen und abbremesen muss, wieviel Last bewegt wird, wie die Umweltbedingungen sind und wie viele Schichten am Tag das Fahrzeug genutzt wird.

In einem Feldtest wurden Fehler unter Einsatzbedingungen identifiziert, die nur in Dauertests auftreten können. Diese Fehler z.B. in der Software oder auch in der Konstruktion können vor einer Serienproduktion klassifiziert und mit entsprechender Priorität abgestellt werden.

Zusätzlich wird im Feldtest auch das Bedienverhalten des Kunden festgestellt und die Kunden haben die Möglichkeit ihre Änderungswünsche und Optimierungs-Vorschläge mitzuteilen.

UAP 13.1: Teilebeschaffung Vorserienteile

Bei den Vorserienteilen wurden u.a. die Gussteile aus Vorserienwerkzeugen gefertigt. Das betrifft die Einhausung des H2 Tanks und die Luftführung und gleichzeitige Halterung des Stacks. Die Bauteile haben noch nicht den Serienprozess zur Freigabe inklusive der Werkzeuge durchlaufen.

Zusätzlich mussten auch noch 2 Kunststoffhalter für den Luftfilter durch ein Vacuum Guss Verfahren gefertigt werden. Kosten und terminbedingt kann hier noch auf kein Spritzgusswerkzeug zurückgegriffen werden.

UAP 13.2: Montage der Brennstoffzellenfeldtestsysteme

Die Feldtestsysteme wurden zusammen mit den IP-Systemen gefertigt. Der Unterschied besteht primär in einer weiterentwickelten Software und der Einzelabnahme der Systeme nach Druckgeräterichtlinie. Es wurden aus Komponentenverfügbarkeitsgründen vier Feldtestsysteme gefertigt, da die Lieferzeiten für weitere Wasserstofftanks den Zeitplan des Brennstoffzellenprojekts stark verzögern würden. Die Lieferanten von Wasserstofftanks des Typ I können prozessbedingt nur größere Stückzahlen von Tanks wirtschaftlich fertigen, da die Rüstzeiten der Anlagen sehr hoch sind. Lieferzeiten für einen H2 Tank liegen bei 4-5 Monaten. Für die vier Systeme konnten schon im Vorfeld für die Entwicklung bestellte Tanks verwendet werden, die noch Lagerhaltig waren.

UAP 13.3: Inbetriebnahme und Vorabtests der Brennstoffzellensysteme

Neben den Tests wie im UAP 11.7 wurden weitere Vorabtestes im Fahrzeug durchgeführt. Diese sind notwendig da das Brennstoffzellensystem inklusive Fahrzeug eine Konformität nach Maschinenrichtlinie aufweisen muss. Ein besonderer Fokus wurde auf die

sicherheitskritischen Untersuchungen und damit dem Abbremsverhalten des Fahrzeugs inklusive Brennstoffzellensystems gelegt. Das Brennstoffzellensystem muss auch in einem Notfall die gesamte rekuperierte Energie des Fahrzeugs im Hybridspeicher aufnehmen können. Diese konnte für den Feldtest bestätigt werden.

UAP 13.4: Erstellung einer vorläufigen Feldtest CE Konformität und Betriebsanleitung

Die Durchführung eines Feldtests bei einem externen Kunden ist regulatorisch einem "in Verkehr bringen" des Brennstoffzellensystems gleichzusetzen. Hierfür muss, wie für die finale Serienfreigabe, die Konformität hinsichtlich der anzuwendenden Richtlinien (CE-Konformitätserklärung) erklärt werden. Da im Falle des Brennstoffzellensystems die Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU) eine zentrale Rolle spielt, musste ebenfalls eine Konformitätsprüfung des Drucksystems inkl. der Ausstellung eines Konformitätszertifikats von einer notifizierten Stelle durchgeführt werden. Dies wurde für die Feldtestsysteme wie in UAP11.7 beschrieben vor Start des Feldtests durchgeführt.

UAP 13.5: Betreuung Feldtest bei Kunden

Bei der Übergabe der Feldtestsysteme bei Kunde 1 und Kunde 2 wurde der Kunde grundlegend über das Brennstoffzellensystem informiert. Weiter wurde das Servicekonzept für den Feldtest definiert, damit schnelle Reaktionszeiten bei Fehlern gewährleistet werden können. Die Feldtestsysteme werden von den Linde Händlern vor Ort betreut. In diesem Fall Fa. Günsel Fördertechnik und Linde Rhein Ruhr. Damit die Servicetechniker an dem System arbeiten durften, mussten diese noch eine Schulung für Li Ionen Batterien und eine Grundlagenschulung für Brennstoffzellensysteme absolvieren.

Weiter werden die Brennstoffzellensystem durch das Entwicklungsteam in Aschaffenburg betreut. In jedem Brennstoffzellensystem ist eine Kommunikationseinheit (KION Communication Unit) verbaut, welche Daten z.B. über das Mobilfunknetz an das Entwicklungsteam senden kann.

UAP 13.6: Analyse Feldtestsysteme

Der interne Feldtest in Hamburg wurde bedingt durch Zulassungsschwierigkeiten der Wasserstoffüberströmeinrichtung, durch die lokalen Behörden, nicht durchgeführt. Alternativ soll eine Kompressorbetankungsanlage der Fa. XXXXX in Zukunft eine Erprobung in Hamburg ermöglichen.

Im August 2023 wurde ein Feldtestsystem an Kunde 1 ausgeliefert. Dieser Kunde hat schon über 100 Flurförderzeuge mit Wasserstoffbrennstoffzellen im Einsatz, die alle von Marktbegleitern ausgestattet sind. Diese Systeme zeigen im täglichen Einsatz eine geringe Zuverlässigkeit, können die geforderte Leistung nicht erbringen und weisen einen erhöhten Wartungsaufwand auf.

Der Routenzugschlepper Linde P60C ist seit August 2023 bei Kunde 1 im Zweischichteinsatz. Das Brennstoffzellensystem beinhaltet eine Kommunikationseinheit zur

Datenverarbeitung, mittels derer alle Betriebsparameter der Brennstoffzelle zur weiteren Analyse zur Verfügung gestellt werden.

Die Brennstoffzelle ist aktuell bereits über 2.500 Betriebsstunden im Einsatz. Alle 200 Betriebsstunden wird ein Service durchgeführt, um festzustellen, ob sich etwas am System und deren Komponenten verändert hat. Die Betriebsparameter werden auch regelmäßig von Linde MH analysiert, um weitere Ergebnisse aus dem Betrieb zu gewinnen.

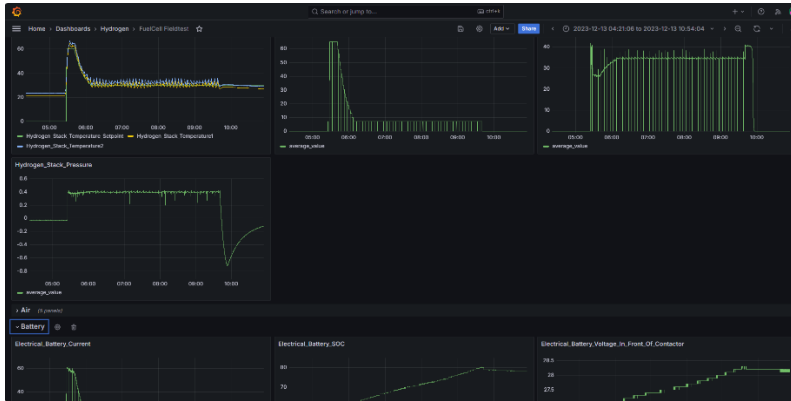


Abbildung 44: Datenanalyse eines Feldtestsystems



Abbildung 45: Service



Abbildung 46: Auslieferung Feldtest

Größere Probleme sind bis jetzt im Feldtest bei Kunde 1 nicht aufgetreten. Allerdings konnten einige Parameter identifiziert werden, die für eine Steigerung der Robustheit hin zur Serie optimiert werden müssen.

Im November 2023 wurde in weiteres Fahrzeug (Linde P60C) an einen Kunden in XXXXX als Feldtest ausgeliefert. Das System ist seit 04/2024 im Einsatz verhält sich stabil und weist eine ausreichende Performance auf.

Im gesamten hat sich die Auslegung des Brennstoffzellensystem durch die Betriebsstunden beim Feldtest bestätigt. Innerhalb des Berichtszeitraum wurden mit dem Brennstoffzellensystem insgesamt 4761 Stunden Feldtest durchgeführt, 2106 Stunden mit dem H2-System und 2655 Stunden mit dem Batterie-System. Nach Ende des Berichtszeitraumes erhöht sich die Gesamtdauer des Feldtests fortlaufen, Stand 12.09.24 wurden bereits über 7000 h insgesamt durchgeführt. Die Kunden waren sehr zufrieden mit dem Brennstoffzellengesamtsystem.

Inhalte und Ergebnisse von AP14 (Produktionskonzepterstellung)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP14 (Produktionskonzepterstellung)

Ein Konzept zur Produktion von Brennstoffzellensystemen ist schon in der Entwicklungsphase notwendig, um die Konstruktion des Brennstoffzellensystem so zu gestalten, dass es unter ergonomischen und ökonomischen Gesichtspunkten berücksichtigt werden. Für Linde MH ist muss auch in diesem Bereich Wissen aufgebaut werden, da die Produktion eines Brennstoffzellensystems auch mit Montage und Prüfmaßnahmen verbunden ist, welche die Qualität des Produktes absichern. Durch die Komplexität des Produkts wird bei einer Montagelinie auch eine Bandendepfstand benötigt, welcher alle Funktionen und die Leistung des Systems prüfen. Neben all diesen Aspekten müssen auch das Thema Druckgeräterichtlinie in der Montage berücksichtigt werden.

UAP 14.1: Prüfung des Montagekonzepts des Produktionsstandorts durch Mustermontagen und CAD

Mit dem Montageworkshop im August 2022, wurde ein erster erfolgreicher Schritt für die Produktionskonzepterstellung durchgeführt. Mit dem Workshop wurden die Montageinhalte sichtbar. Diese Informationen sind die Basis für das UAP 14.2, im Jahr 2023 durchgeführt wurde. Auch konnte die Konstruktion im gesamten bestätigt werden. Im Detail müssen noch kleine konstruktive Anpassungen durchgeführt werden, um alle Anforderungen an eine Montage zu erfüllen.

Die Mustermontagen wurden bei dem Linde Schwesterunternehmen Still GmbH in Hamburg durchgeführt. Die Marken Linde MH und Still teilen sich im KION Konzern Produktionsstandorte, um Synergien zu generieren. Hier wurde auch das Produktionskonzept erstellt. Bei dem Schwesterunternehmen gibt es eine Fertigung für mechatronische Systeme wie z.B. elektrische Lenkungen, Leistungsumrichtern etc... Die Montagemitarbeiter sind mit komplexen elektromechanischen Systemen gut vertraut, und könnten die Montage mit ergänzenden Schulungen durchführen. Für die Montage wurden Montageschritte mit Montageplanern diskutiert. Neben vielen Vormontagen soll eine Hauptmontagelinie entstehen, bei der am Ende der Line der Bandendepfstand das Brennstoffzellensystem prüft.

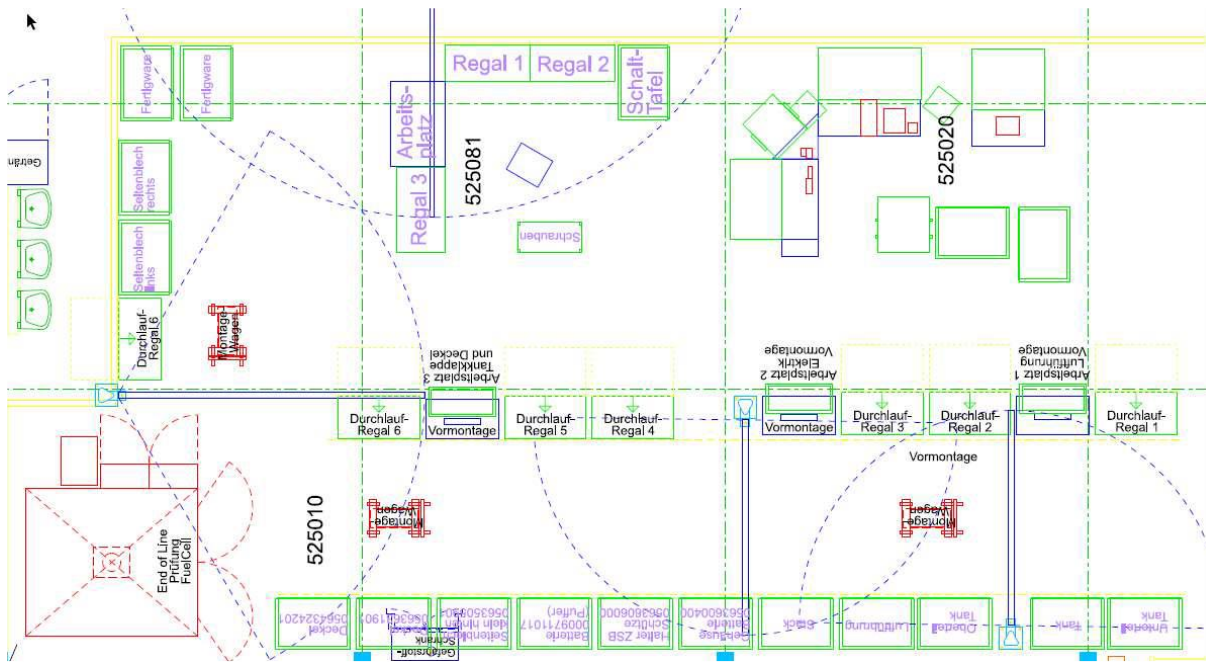


Abbildung 47: Layout für eine Montagelinie

[UAP 14.2: Erstellung eines Montage- und Prüfkonzepts zur Serienfertigung \(--> notwendige H2 Infrastruktur zur Prüfung!\)](#)

Siehe UAP 14.1

[UAP 14.3: Definition und Konzepterstellung von notwendigen Betriebsmitteln für eine Serienfertigung](#)

Bei der Erstellung von primär notwendigen Betriebsmitteln wurde ein Montagewagen entwickelt, der das Brennstoffzellensystem im gesamten Produktionsprozess genutzt wird. Der Montagewagen soll vom ersten Schritt der Gesamtmontage bis zur Bandendprüfung genutzt werden. Vorteil dieses Montagewagens ist es, dass er auch höhenverstellbar ist, sodass der Mitarbeiter am Band von allen Seiten aus Zugang zum Brennstoffzellensystem hat und die Montagehöhe ergonomisch einstellbar ist. Weitere Betriebsmittel waren u.a. kleine Montagevorrichtungen, Kräne und vernetztes Schraubwerkzeug, um Schraubvorgänge dokumentieren zu können.

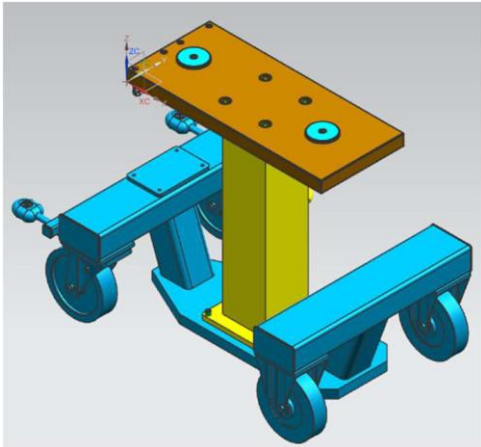


Abbildung 48: Montagewagen Konzept Brennstoffzellensystem

UAP 14.4: Konzepterstellung eines Bandendeprüfstand

Für ein Bandendprüfstand wurden die Anforderungen gesammelt und ein Lastenheft erstellt. Im ersten Schritt musste erst mal definiert werden, welche Prüfungen am Bandende durchgeführt werden sollen und wie der Auslieferungszustand des Systems an die Fahrzeugwerke sein wird.

Mit diesen Erkenntnissen und den Erfahrungen aus dem Bau des Entwicklungsprüfstands in Aschaffenburg wurde das Lastenheft erstellt.

Bei den ersten Rückmeldungen von Prüfstandsherstellern hat sich herausgestellt, dass aktuell am Markt die Lieferzeiten für Prüfstände sehr lange sind bzw. durch die hohe Nachfrage keine Angebote abgegeben werden.

Mit den potenziellen Lieferanten, die Interesse haben, wurden technische Klärungsgespräche geführt, um die Angebote zu detaillieren.

Für den Bandende Prüfstand ist folgender Prüfprozess erarbeitet worden:

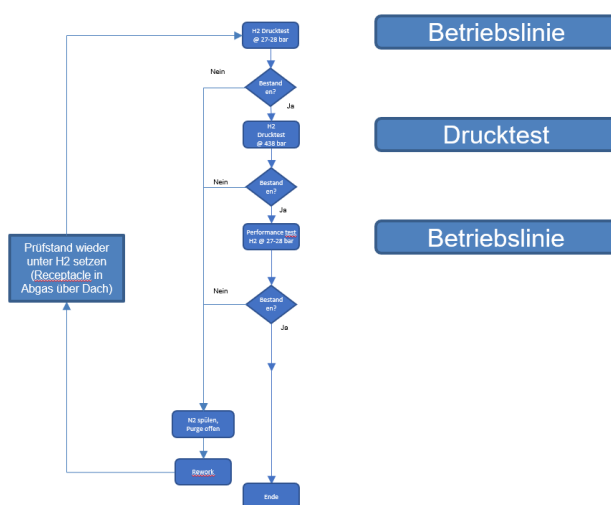


Abbildung 49: Prozessdiagramm des Bandendeprüfstands

Neben den elektrischen (Leistung und Funktion) und Wasserstoffprüfungen (Dichtigkeit) muss am Bandendprüfstand auch noch die Software für das Brennstoffzellensystem Steuergerät und für die Kommunikationseinheit geflashed werden. Dabei müssen auch Seriennummer des gebauten Systems in den Steuergeräten hinterlegt werden. In Abbildung 48 ist ein erster Entwurf einer Prüfkabine für den Bandendprüfstand zu sehen. In einem späteren Serienprozess muss dieser Prüfstand vollautomatisch die Prüfung durchführen.

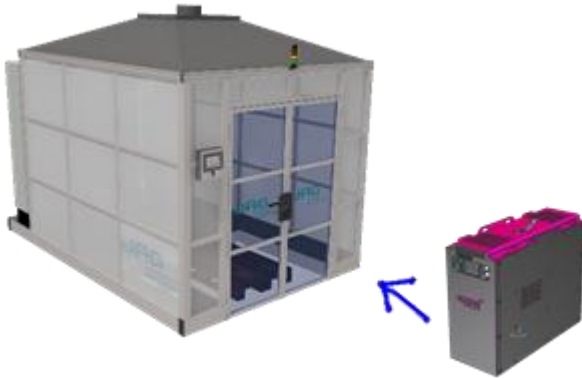


Abbildung 50: Entwurf einer Prüfstandskabine für den Bandendprüfstand

Inhalte und Ergebnisse von AP15 (Servicekonzepterstellung)

Zielsetzung des Arbeitspakets AP15 (Servicekonzepterstellung)

Für den Feldtest des Brennstoffzellensystems wurde ein Service Konzept benötigt. Dieses beinhaltet u.a. die Befähigung der Servicetechniker, Diagnosesoftware, weitere Dokumentation, Schulungen der Servicetechniker und Transportwesen.

UAP 15.1: Erstellung Servicekonzept für Händler z.B. Reparaturlevel (was kann Händler noch reparieren), Serviceteile

CAD-Entwürfe wurde mit dem Serviceverantwortlichen für das Projekt regelmäßig besprochen. Neben der mech. Konstruktion waren auch die elektrische Sicherheit beim Reparatüreinsatz im Fokus.

Bei den Gesprächen wurden die Serviceanforderungen definiert und festgelegt.

Ein Beispiel für eine Serviceanforderungen waren die einfache Erreichbarkeit von Tauschkomponenten und die Nutzung der Konzern Schrauben, um eine zu hohe Schraubenvariant zu vermeiden.

Ein weiterer Punkt ist auch die Qualifikation des Servicetechnikers, welcher ein Brennstoffzellensystem warten soll. Hier wird als Qualifikationsbasis der Linde Service Techniker der Li-Ionen Batterie genutzt. Zusätzlich müssen dann noch weitere Qualifikationen für z.B. das Thema Druckgeräterichtlinie erworben werden. Das Konzept, welche Qualifikationen der Service Techniker benötigt, wird auch auf Basis des Serviceworkshop konkretisiert.

Ein weiteres Thema, ist der Transport von Brennstoffzellensystemen. Im Auslieferungszustand wird davon ausgegangen, dass nur die Li-Ionen Batterie geladen aber der H2 Tank leer ist.

Dieses sieht in einem Reparaturfall bei einem Kunden anders aus. Hier müsste ggf. das System zu einem Linde Händler oder einen zertifizierten Reparaturort transportiert werden. Zu diesem Zeitpunkt ist auch Wasserstoff an Bord des Brennstoffzellensystems. Alle Szenarien müssen durch entsprechende Prozesse definiert werden. Dieses wird in Zusammenarbeit mit dem Service und Logistik als Konzept erarbeitet.

Eine wichtige Frage, die für ein Servicekonzept wichtig ist, ist der Transport des Brennstoffzellensystems z.B. in einem Reparaturfall. Hier steht die Puffer Li Ionen Batterie und der Wasserstoff im Fokus. Für dieses Thema wurde ein Arbeitskreis gegründet, der einen Prozess für den Transport in verschiedenen Fällen entwickelt. Teilnehmer des Arbeitskreises sind Experten aus dem Bereich Transport, Arbeitssicherheit, Service und Entwicklung.

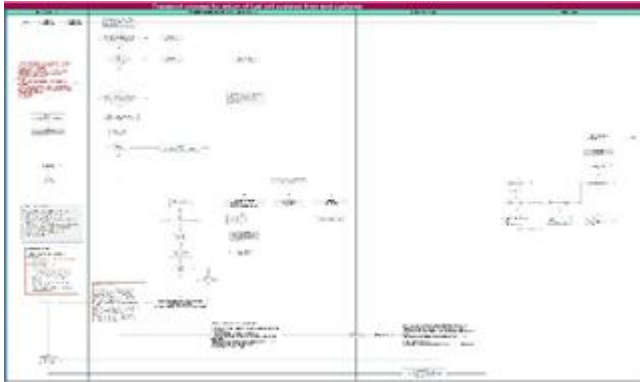


Abbildung 51: Arbeitsstand Prozessdiagramm Brennstoffzellentransport

Dieser Prozess ist für den Service sehr wichtig, um vor Ort beim Kunden entscheiden zu können, wie ein Brennstoffzellensystem transportiert werden soll (Thema Gefahrgut). Dieses Konzept muss auch schon für einen Feldtest bei externen Kunden zur Verfügung stehen.

Als Bewertungsbasis wird ein erstes Konzept zum Transport von Li-Ionen Batterien verwendet, das für das Thema Brennstoffzelle abgeändert und ergänzt wird.

Die Arbeitsgruppe Transport von Brennstoffzellensystemen hat einen Prozessweg, wie ein Brennstoffzellensystem z.B. bei Lebensende oder Reparatur zu transportieren ist, erstellt. Es wurden Fragenkataloge erarbeitet, die vom Kunden und vom Servicetechniker vor Ort Informationen auszufüllen sind, um ein Brennstoffzellensystem bezüglich Transportvorkehrungen einordnen zu können.

In der täglichen Arbeit mit Brennstoffzellensystemen wurde auch mit mehreren Gefahrgutbeauftragten erörtert, wie ein Brennstoffzellensystem als Gefahrgut einzustufen ist. Hierbei gibt es Unterschiede, wenn z.B. kein Wasserstoff oder Wasserstoff im Tank ist.

Ein Brennstoffzellensystem ohne Wasserstoff aber mit Li Ionen Batterie an Bord hat folgende Kennzeichnung:

- UN 3481
- Li Ionen Batterien in Ausrüstung

Ein Brennstoffzellensystem mit Wasserstoff und Li Ionen Batterie an Bord ist aber so zu kennzeichnen:

- Brennstoffzelle mit Wasserstoff im Tank mit UN 3537
- „GEGENSTÄNDE; DIE ENTZÜNDBARES GAS ENTHALTEN, N.A.G.“
- Gefahrzettel nach 5.2.2.1.12 klassifiziert
- Verpackung nach P006

Ist das Brennstoffzellensystem in einem Fahrzeug verbaut, kann es wie ein handelsübliches Gas Fahrzeug definiert werden, und stellt kein Gefahrgut da (UN3166).

Bezüglich des Transports des Brennstoffzellensystem bei einem größeren Defekt wurde ein Prozess entwickelt, wie ein Servicetechniker im Feld das Brennstoffzellensystem neben der Diagnose bewerten kann, bevor er den Transport organisiert. Ebenfalls ist eine Vorab Fragebogen für den Kunden erstellt werden, der eine Erstinformation für den Service darstellt.

Pre-Check für Industrielle Brennstoffzellensysteme mit integrierter Lithium-Ionen-Batterie
Gefahrgut-Transportsicherheit

Für den Transport von Brennstoffzellensystemen mit Lithium-Ionen-Batterien gelten besondere gesetzliche Anforderungen und Regelungen. Anzahl folgende Fragen soll der Zustand des Brennstoffzellensystems und Lithium-Ionen-Batterie bewertet und mögliche Beeinträchtigung festgelegt werden, um die dafür notwendige Transportpackung zu ermitteln. Bitte beachten Sie bei der Bewertung des Brennstoffzellensystems die 1. Funktion der Batterie ist die Bereitstellung von Leistung für den Antrieb der Brennstoffzelle. Speicherfunktion ist nicht vorgesehen.

Typ Fahrzeug

Allgemeine Daten zum Brennstoffzellensystem (siehe Typenschild)

Hersteller: Herstellerkennung:

Seriennummer: Nennspannung UDC:

Kachidatum: Produktionsdatum Gasföhrer:

Pre-Check (Bitte pro Frage nur ein Kreuz setzen)

| Frage | Ja | Nein | Unb. |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1. Wurde das Brennstoffzellensystem einer Freizeitzug ausgewertet, welche über den bestimmungsgemäßen Gebrauch im Fahrzeug hinausgeht? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2. Ist am Brennstoffzellensystem eine Funktionseinschränkung bekannt? (Durch alle vorangehenden Leistungsprüfungen und alle Funktionsbeeinträchtigungen vom Fahrzeug) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3. Ist am Brennstoffzellensystem eine Beschädigung erkennbar? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4. Erscheint ein rotes „H2“ und/oder „Batterie“ Warnsymbol im Display? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5. Ist noch Wasserstoff im Tank vorhanden? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6. Lässt sich das manuelle Ventil schließen? (Bitte je Ladeform je Brennstoffzellensystem) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7. Wurden Servicemaßnahmen durch eine nicht von KION autorisierte Person durchgeführt? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Verhaltensregeln: Im Falle, dass das Brennstoffzellensystem mit Lithium-Ionen-Batterie nach Auslagerung (>32°C) ist:
 1. Das System umgehend ins Freie transportieren, wenn das noch gefahrlos möglich ist.
 2. Ohne Kontakt von Strom, Kabeln und Personen arbeiten. Gefahr abgrenzen und sichern.
 3. Persönliche Leucht- / LL-Bestimmungen, Konformitäts- und Anweisungen zum weiteren Vorgehen befolgen.
 Achtung: Sollte das System brennen, umgehend die Rettungsstelle alarmieren und mitteilen, dass es sich um einen Brand eines Brennstoffzellensystems mit Lithium-Ionen-Batterie handelt.

Bitte immer Überprüfen, was über der Lastschleife der Lithium-Ionen-Batterie nach § 11 der GefStoffverordnung (GGSStB), dass die originalen Angaben nach beiden Werten und Daten gemessen wurden und dass die richtig und vollständig sind.

Status: Ort: Unterschrift: Unterschrift:

Hinweise: Bitte achten Sie die vollständig ausgefüllte und unterschriebene Checkliste (Form ST-LL) Rückmeldung / Freim Lichte Plakate
 01: Servicearbeiten ausschließlich zu einer weiteren Befreiung bezüglich der Freisetzung von Wasserstoff Brennstoffzellensystemen

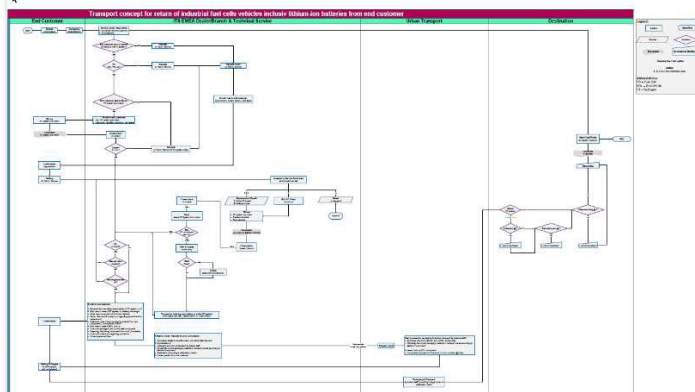


Abbildung 52: Fragebogen für Kunden

UAP 15.2: Servicefähigkeit des Gesamtsystems mitentwickeln

Auf Basis des Montageworkshops im August 2022 wurde anschließend ein Serviceworkshop durchgeführt. Ziel war es hier zusammen mit Service Technikern das System auf Servicearbeiten zu bewerten. Folgende Aspekte wurden bewertet:

- Wie zugänglich sind Bauteile im System
- Wie kann in kürzester Zeit ein Bauteil gewechselt werden
- Welche Werkzeuge sind notwendig
- Sind Sonderwerkzeuge notwendig
- Welche Teile sind Wartungsteile

Im Februar wurde ein nicht funktionsfähiges System aus den Mustermontagen an den Service geliefert. Dieser hat das Brennstoffzellensystem auf Service Zugänglichkeit bewertet und sich mit der Funktion des Brennstoffzellensystems und deren Komponenten auseinandergesetzt.

Neben diesem Thema arbeitet der Service auch an der Entwicklung der Diagnosefähigkeit des Systems mit. D.h. die Daten, welche das Brennstoffzellensystem bereit stellt, müssen in einer Service Software für einen Techniker aufbereitet werden. Hierzu liefen viele Abstimmungen. Im Feldtest wird mit einer Entwicklungsdiagnose gearbeitet, welche die Servicetechniker für den Feldtest noch erlernen mussten



Abbildung 53: Vorbereitung Feldtest Techniker

Ein erster Serviceworkshop mit den Servicetechnikern für den Feldtest hatte im Juni 2022 bei Linde MH stattgefunden. Ziel war es, die Brennstoffzellentechnologie den Servicetechnikern in Theorie und Praxis zu erklären. Vor der Auslieferung hatten die Techniker der Feldtestsysteme noch weitere Schulungen erhalten, um bei einem Feldtest fachgerecht betreuen zu können.

Für den Feldtest wurde ein erster Stand einer Diagnosesoftware entwickelt, damit der Servicetechniker im Feld das System betreuen kann. Die ersten Initialschulungen wurden in Zusammenarbeit mit einem externen Dienstleister detailliert ausgearbeitet unter dem Hintergrund einer rechtssicheren Schulung/Training für Servicemitarbeiter. Hier wurde u.a. auch definiert, welche zusätzlichen Qualifikationen ein Servicemitarbeiter, der am Brennstoffzellensystem arbeitet, benötigt. Eine vorläufige Betriebsanleitung wurde für die Feldtestsystem erstellt. Diese ist Umfang der CE-Konformität.



Abbildung 54: Entwurf der Betriebsanleitung

Wissenschaftlicher Ausblick und Anschlussfähigkeit

Mit den Ergebnissen aus dem KION HyPower24V-Projekt liegt nun eine sehr gute Basis für die Entwicklung weiterer H₂-Brennstoffzellen vor. Die in den beschriebenen Arbeitspaketen erreichten Resultate befähigen Linde MH Brennstoffzellensysteme mit komplexeren Systeminhalt wie z.B. wassergekühlte Brennstoffzellensystem für höhere Leistungsklassen zu entwickeln, obwohl hier auch ein weitere Knowhow Aufbau notwendig sein wird.

Auch wurden in der New Energy Versuchsabteilung von Linde MH viele Erkenntnisse zum Umgang, Validierung und Tests mit Brennstoffzellensystemen gesammelt, angefangen von der Testumgebung (Prüfständen) über Komponententests, Systemtests bis zur Integrationstests im Fahrzeug. So ist im nächsten Schritt zu untersuchen, wie leistungsfähigere Brennstoffzellensysteme für größere Flurförderzeuge zu entwickeln sind.

Des weitem haben auch weitere Fachbereiche wie Einkauf, Qualität, Service und Produktion durch die Konzepterstellung für Brennstoffzellensysteme wichtige Erkenntnisse für eine zukünftige Serienproduktion gewonnen:

- Lieferantennetzwerk für Komponenten
- Fertigung eines Brennstoffzellensystems
- Prüfen eines Brennstoffzellensystems
- Druckgeräterichtlinie für die Freigabe eines Brennstoffzellensystems
- Wartung eines Brennstoffzellensystems
- Ausbildung für Servicetechniker eines Brennstoffzellensystems
- Transport von Brennstoffzellensystemen

Die nächsten Schritte beinhalten die finale Industrialisierung des 24V Brennstoffzellensystems für eine Serie. So kann Linde MH in der Folge ihren Kunden ein Brennstoffzellensystem für Lagertechnikgeräte inklusive Service aus einer Hand anbieten. Zudem kann später auch eine elektrische Integration des externen Displays in das Fahrzeug und eine Kommunikation zwischen Brennstoffzellensystem und Fahrzeug umgesetzt werden.

2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Bislang wurde der Betrieb von wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellensystemen in Lagertechnikgeräten primär mit Systemen aus Nordamerika realisiert. Der Markt an Brennstoffzellensystemen auf dem europäischen Markt waren sehr begrenzt bis nicht verfügbar. Hinzu kamen viele Probleme bei der Verfügbarkeit im Einsatz der Brennstoffzellensysteme und der damit verbundenen hohen Servicekosten. Ein Nachweis für

eine gute Zuverlässigkeit im industriellen Alltag und den Anforderungen an europäische Flurförderzeuge lag noch nicht vor.

Die durchgeführten Arbeiten im Projekt KION HyPower 24V leisten einen großen Beitrag zu den angesprochenen Punkten. Die vielversprechenden und positiven Ergebnisse (siehe Kapitel II) helfen der Marktdurchdringung auf dem Gebiet der H₂-Intralogistik erheblich und stellen einen großen Schritt zur Einführung weiterer H₂-Flotten dar.

Speziell bei Linde MH wurde viel Wissen über die Brennstoffzellen – Technologie aufgebaut, so dass der Einstieg in weitere derartige Projekte nun deutlich einfacher wird.

Allein die 2 Feldtestsysteme absolvierten während des Projekts ohne Probleme in Summe 2.500 Betriebsstunden. So konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Technologie im Bereich Brennstoffzellensystemen in Lagertechniksystemen einen Reifegrad von TR8 erreicht hat, der unter gewissen Voraussetzungen den Einsatz größerer Flotten im realen Produktionseinsatz rechtfertigt und eine Marktdurchdringung erreicht. Zudem wurde durch die erfolgreiche Öffentlichkeitsarbeit eine Erhöhung der öffentlichen Akzeptanz und Beitrag zur Marktdurchdringung der Brennstoffzellentechnologie in Flurförderzeugen erzielt.

3. Voraussichtlicher Nutzen

Im Rahmen des Projekts KION HyPower 24V wurden bei Linde MH signifikante Fortschritte bei der Entwicklung von Brennstoffzellensystemen erzielt. Diese dienen als Basis für weitere Entwicklungen von größeren und leistungsstärkeren Brennstoffzellensystemen und ermöglichen somit in Zukunft die Substitution von extern gekauften Brennstoffzellensystemen im bestehenden Produktportfolios.

Zudem wurde wichtiges Wissen bezüglich der Entwicklung, Validierung, Servicebarkeit und Produktion, der Brennstoffzellen und der dafür erforderlichen Infrastruktur generiert und ein Netzwerk an Lieferanten aufgebaut, das für weitere Serialisierung genutzt werden kann und auch über das Projektende hinaus verfügbar ist.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus KION HyPower 24V ist ein Anschlussprojekt KION HyPower 48V bei Linde Material Handling gestartet worden, das die Entwicklung eines flüssigkeitsgekühlten leistungsstärkeren Brennstoffzellensystems im Fokus hat.

Das 24V Brennstoffzellensystem wird zusätzlich in dem NOW-Förderprojekt 03B10807 bei XXXXX im Produktionswerk XXXXX verwendet. Hier wird ein Vergleich zwischen verschiedenen Brennstoffzellensystemen durchgeführt.

4. Fortschritt bei anderen Stellen

Derzeit entwickeln in Europa außer Linde MH noch XXXXX, XXXXX Brennstoffzellensysteme.

Größere Flotten von Brennstoffzellensystemen in Lagertechnikgeräten sind aktuell in Europa:

- XXXXX
- XXXXX
- XXXXX
- XXXXX
- XXXXX
- XXXXX
- XXXXX

Linde MH hat im Bereich der Intralogistik viele Anfragen von verschiedenen Kunden für das 24V Brennstoffzellensystem erhalten.

5. Veröffentlichungen / Patentrelevante Arbeiten

Es wurden mehrere Erfindungsmeldungen seitens Linde MH erstellt, die durch den internen Patentrat von Linde geprüft werden. Wenn diese dort freigegeben werden, wird eine Erfindungsmeldung durch Patentanwälte erstellt, welche dann beim Deutschen Patentamt eingereicht wird.

- Der Funktionale Prototyp wurde auf einer KION internen Veranstaltung leitenden Angestellten Anfang November 2021 vorgestellt
- Der Funktionale Prototyp (FP1) wurde auf einer KION internen Veranstaltung exklusiv Key Kunden Zwecks der Feldtestplanung vorgestellt:
 - 26.04.2022 XXXXX
 - 28.04.2022 XXXXX
 - 29.04.2022 XXXX
- Der Funktionale Prototyp (FP2 und FP3) wurde im Zuge der hausinternen Messe „World of Material Handling“ von Linde vom 20.06.-01.07.2022 in Mannheim einem ausgewählten Publikum (Key Customer und Vertrieb) vorgestellt. Ziel war es, dass sich die Vertriebsorganisation von Linde mit der Technologie auseinandersetzt und auch Key Customer die Möglichkeit haben, einen ersten Eindruck des Entwicklungsstands zu gewinnen.
- Vorstellung in der CIN Vollversammlung am 07.07.2022
- Vorstellung auf der Logimat 2023
- Prototyp auf dem IFOY Award
- Prototyp bei der H2 Infrastruktur „LMH-P2-goes-green“

- Live Vorstellung durch das KION Group AG Produktmanagement:
 - Driving Days Mendig 11.09-20.09.2023
 - Customer Day STILL 09-11.11.2023
 - Service Event KION 15.05.2024

- Präsentation durch das KION Group AG Produktmanagement:
 - IKA Meeting/Energy Nürnberg 12.09-14.09.2023
 - LMH Core Team Meeting Aschaffenburg 04.10.2023
 - VKT STILL Stuttgart/Freiburg 11.10.2023
 - VKT STILL München 20.10.2023
 - Product Information Week 18.10.2023

Projekt

- [KION HyPower-24V - NOW GmbH \(now-gmbh.de\)](https://www.now-gmbh.de)
- [EnArgus](https://www.enargus.com)
- [Die Wasserstoff-Revolution \(worldofmaterialhandling.com\)](https://www.worldofmaterialhandling.com)
- [Our current press releases | KION GROUP AG flurfoerderzeuge.de](https://www.flurfoerderzeuge.de)
- [Linde wins for Linde HyPower 24V fuel cell system - Forklift News \(forkliftrevolution.net\)](https://www.forkliftrevolution.net) [forkliftaction.com](https://www.forkliftaction.com)
- [forkliftnet.com](https://www.forkliftnet.com)
- [shdlogistics.com](https://www.shdlogistics.com)
- [fuelcellsworks.com](https://www.fuelcellsworks.com)
- [electrive.net](https://www.electrive.net)
- [stefanschroeter.com](https://www.stefanschroeter.com)
- [springerprofessional.de](https://www.springerprofessional.de)
- [globallogisticsmedia.com](https://www.globallogisticsmedia.com)
- [car-it.com](https://www.car-it.com)
- [tandnews.com.au](https://www.tandnews.com.au)
- [logisticsbusiness.com](https://www.logisticsbusiness.com)
- [linde-mh.de](https://www.linde-mh.de)

III. Anlage Erfolgskontrollbericht

Der Erfolgskontrollbericht ist als separates Dokument beigelegt.