

H2IntraDrive - Einsatz einer wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugflotte unter Produktionsbedingungen: Herausforderungen und Nachhaltigkeit

R. Micheli M.Sc., fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München;
Dipl.-Ing. **M. Hanke**, Linde Material Handling GmbH, Aschaffenburg
Prof. Dr.-Ing. **W. A. Günthner**, fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

1. Kurzfassung

Aufgrund von kurzen Betankungszeiten und der Vermeidung von Batteriewechseln bieten mit Wasserstoffbrennstoffzellen betriebene Flurförderzeuge (H2-Flurförderzeuge) bereits heute eine Reihe von Vorteilen gegenüber konventionellen Flurförderzeugen. In diesem Beitrag werden Herausforderungen im Bereich Flurförderzeugentwicklung, Wasserstoffinfrastrukturaufbau sowie Betrieb der Fahrzeuge identifiziert und konkrete Lösungsvorschläge aufgezeigt. Abschließend wird die ökologische Nachhaltigkeit der Fahrzeuge mit Hilfe von Ökobilanzen und einer Gegenüberstellung mit batteriebetriebenen Flurförderzeugen bewertet.

2. Forschungsvorhaben H2IntraDrive

Batteriebetriebene Flurförderzeuge werden seit vielen Jahren in der Intralogistik eingesetzt. Lange Batterielade- und Abkühlzeiten führen zu zeit- und damit ressourcenaufwendigen Batteriewechseln sowie zu einer verminderten nutzbaren Betriebszeit der Fahrzeuge durch die Standzeiten während des Batteriewechsels. Ferner werden für die Batterieladung separate Laderäume mit Kranen bzw. Hubeinrichtungen, Lüftungssystemen, Schutzwannen und Notfallduschen benötigt. Diese befinden sich innerhalb der Fertigungshallen und belegen dadurch meist wertvolle Produktionsflächen. Zudem entstehen während der Ladung der mit Schwefelsäure gefüllten Bleiakkumulatoren ätzende und für den Menschen gesundheitsschädliche Dämpfe. Folglich existieren bis heute Defizite im Umgang mit batteriebetriebenen Flurförderzeugen. Hinsichtlich der dargestellten Aspekte bieten H2-Flurförderzeuge im Vergleich zu Bleiakku-Flurförderzeugen mehrere Vorteile. Zunächst können sie innerhalb weniger Minuten mit Wasserstoff befüllt werden – ein deutlicher Anstieg der nutzbaren Betriebszeit der Fahrzeuge ist die Folge. Da sich lediglich die Befüllanlage (sogenannte Dispenser) in der Fertigungshalle befinden muss, kann der Großteil der benötigten Wasserstoffinfrastruktur (H2-Infrastruktur) ins Freie verlagert werden. Ungeachtet

dieser und weiterer Vorteile von Brennstoffzellensystemen waren zu Beginn des Projekts H2IntraDrive in Europa lediglich einzelne prototypenhafte Anwendungen bekannt. Der Einsatz einer H2-Flurförderzeugflotte unter realen Produktionsbedingungen und die daraus resultierenden Potenzialnachweise fehlten gänzlich.

Aus diesem Grund wird im vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geförderten Forschungsprojekt H2IntraDrive das Potenzial einer Produktionsversorgung mit ausschließlich H2-Gabelstaplern und H2-Routenzugschleppern untersucht. Ziel ist zum einen die Industrialisierung der Wasserstofftechnologie bei Flurförderzeugen und zum anderen die Grundsteinlegung für einen flächendeckenden Einsatz von brennstoffzellenbetriebenen Flurförderfahrzeugen in Deutschland und Europa. Hierfür wurden von Linde Material Handling (LindeMH) insgesamt fünf Gabelstapler und sechs Routenzugschlepper mit Brennstoffzellenantrieben umgerüstet. Diese befinden sich seit Dezember 2013 in der Langzeiterprobung beim Projektpartner BMW im CFK-Karosseriebau der BMWi Fahrzeuge (i3 und i8). Für den Betrieb der Flurförderzeuge musste bei BMW die erste Wasserstoffinfrastruktur inkl. Indoor-Dispenser für Flurförderzeuge in Deutschland aufgebaut und zugelassen werden. Diese stellt in Kombination mit den H2-Flurförderzeugen die Basis für Untersuchungen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit und ökologische Nachhaltigkeit von H2-Flurförderzeugen im Serienbetrieb dar. Welche vom Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der TUM wissenschaftlich begleitet werden.

3. Entwicklung und Betrieb von H2-Flurförderzeugen

Konstruktive Änderungen

Die Brennstoffzelle erzeugt im Betrieb neben elektrischer Energie und Wasser auch Wärme, die in Form von warmer Abluft aus dem System abgeführt werden muss. Zu diesem Zweck verfügt die Brennstoffzelle über einen Lüfter, der an einer Seite der Zelle kühle Luft einsaugt und die erwärmte Luft an der gegenüberliegenden Seite wieder ausbläst. Das erfordert seitliche Öffnungen im Chassis des Flurförderzeugs. Bei kleineren Lagertechnikgeräten oder Schleppern existiert keine Seitenverkleidung, so dass hier keine Maßnahmen getroffen werden müssen. Bei den betroffenen Gabelstaplern vom Typ E25FC bzw. E35FC war eine Anpassung der Rahmenstruktur inkl. FEM-Berechnung notwendig, um die erforderlichen Lüftungsquerschnitte zu realisieren und gleichzeitig die Festigkeit des Chassis zu gewährleisten (Abbildung 1 sind die modifizierten Teile des Brennstoffchassis farblich hervorgehoben). Gleichzeitig musste die Verlegung des Hauptkabelsatzes sowie mehrerer Hydraulikleitungen geändert werden, um die notwendigen Lufteintrittsöffnungen zu

realisieren. Zudem wurden Form, Orientierung und Position der Lüftungsöffnungen in das Styling des Gesamtfahrzeugs integriert.

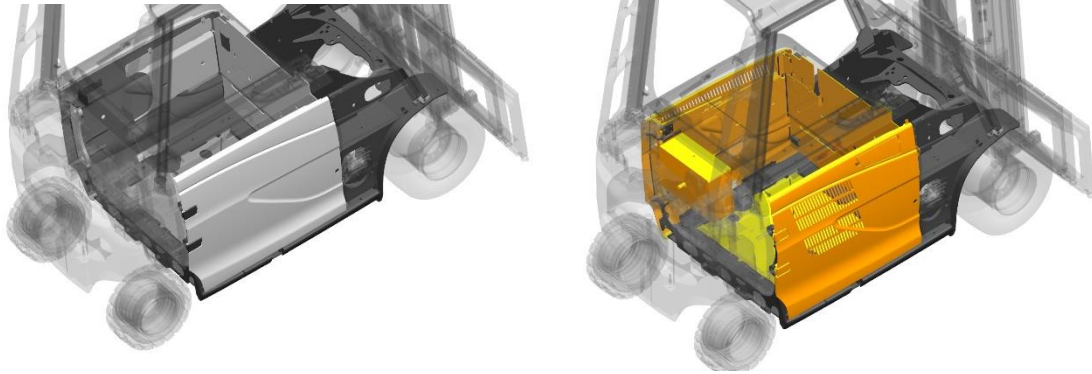


Abbildung 1: Fahrzeugrahmen „Standard“ (links) bzw. „Brennstoffzelle“ (rechts)

Weiterhin wurden an den höchsten Punkten des Fahrerschutzdachs Entlüftungsöffnungen eingebracht. Diese gewährleisten, im Falle einer Leckage, dass austretender Wasserstoff nach außen abgeleitet werden kann und sich nicht innerhalb des Fahrerschutzdachs sammelt und konzentriert.

Eine weitere Anpassung musste für den Gegengewichtsstapler E35FC und den Schlepper P30FC vorgenommen werden, weil die verwendete Brennstoffzelle eine geringere Masse hatte, als die sonst in diesen Fahrzeugen eingesetzte Batterie. Im E35FC wurde ein zusätzliches Gewicht am Stapler angebracht, um die gleiche Standsicherheit wie die eines Batterie-betriebenen Fahrzeugs zu gewährleisten. Beim Schlepper P30FC wurde dagegen ein Zusatzgewicht installiert, um auch bei großen Zuglasten genügend Traktion zu haben, so dass die erforderliche Antriebsleistung bzw. Zugkraft zu Verfügung steht.

Ein weiteres neues Ausstattungsmerkmal ist die in der rechten Staplerseite integrierte Tankklappe. Sie ermöglicht schnellen Zugang zum Wasserstofftankstutzen, Kondensatabsaugstutzen sowie zur Diagnoseschnittstelle der Brennstoffzelle. Die Stellung der Tankklappe wird durch einen Sensor überwacht, so dass die Gabelstaplersteuerung verhindern kann, dass der Stapler mit geöffneter Klappe und möglicherweise angekuppeltem Tankstutzen losfährt. So werden Beschädigungen an Brennstoffzelle und Wasserstoffinfrastruktur vermieden. Für die Schlepper P30FC wurde eine vergleichbare Tankklappe konstruiert, so dass eine einheitliche Sicherheitsstrategie für sämtliche zum Einsatz kommende Fahrzeuge gewährleistet ist.

Umgang mit Spitzenbelastungen

Zu Beginn des Projekts wurde im Rahmen der Spezifikation des Brennstoffzellenantriebs ein für den späteren Einsatz typisches Arbeitsspiel bei BMW protokolliert und ausgewertet. Da die Fahrzeuge in diesem Fall nicht Maximallast heben und zudem eine Geschwindigkeitsbegrenzung besteht war offensichtlich, dass die Leistung der Brennstoffzellen hier ausreichend sein würde.

So zeigten sich die Grenzen des Brennstoffzellenantriebs vor allem im Testbetrieb bei LindeMH im anspruchsvollen Linde-Arbeitsspiel mit Maximallast. Dabei konnte die Brennstoffzelle den Energiebedarf des Staplers nicht dauerhaft decken, die interne Lithium-Ionen-Batterie konnte nicht mehr aufgeladen werden und das Brennstoffzellensystem schaltete sich nach einer gewissen Belastungsdauer ab. In diesem Fall fällt die automatische Parkbremse des Staplers ein und bringt das Fahrzeug mit reduzierter Verzögerung zum Stillstand. Da diese Situation, aufgrund der geringeren Belastungen, nicht bei BMW zu erwarten war, wurden diesbezüglich keine Anpassungen an Fahrzeug oder Brennstoffzelle vorgenommen.

Eine weitere kritische Belastung kann erreicht werden, wenn die Brennstoffzelle bei sommerlichen Temperaturen im harten Einsatz genutzt wird. Im Grenzfall können die Komponenten der Brennstoffzelle mit der angesaugten Umgebungsluft nicht mehr ausreichend gekühlt werden, so dass sich die Brennstoffzelle auch hier abschaltet. Deshalb wurde eine optimierte Luftführung konzipiert, die bei Einsatzfällen mit erhöhter Temperaturbelastung dafür sorgt, dass die warme Abluft besser aus Brennstoffzelle und Gabelstapler abgeführt werden kann.

Dauererprobungstests

Vor Auslieferung wurde jedes Fahrzeug intensiv getestet, um Probleme bei BMW zu verhindern. Dabei mussten die Gabelstapler 40h Arbeitsspiel ohne Fehlermeldung der Brennstoffzelle auf dem Testparcours bei LindeMH absolvieren, die Schlepper sogar 50h. Das Testarbeitsspiel beinhaltete u.a. Ein- und Ausstapeln von Last sowie Rampenfahrt. Insgesamt wurden dabei alleine für die Gabelstapler weit über 1.000 Teststunden absolviert und dabei etliche Kilometer gefahren.

Voraussetzung für derartige Tests ist allerdings eine gewisse Wasserstoffinfrastruktur auf dem Werksgelände. Deshalb wurde ein temporärer Wasserstoffhochdruckspeicher inkl. Befüllanlage bei LindeMH installiert. Hierfür waren zunächst Tiefbauarbeiten nötig, zudem wurde ein Blitzschutzkonzept ausgearbeitet und umgesetzt und schließlich erstellte die

Dekra eine gutachtliche Stellungnahme zum Explosionsschutz. Außerdem wurde die Genehmigung der Gewerbeaufsicht eingeholt, bevor der Testbetrieb starten konnte.

Eine weitere Herausforderung bestand darin, einen frostsicheren, aber auch den Sicherheitsrichtlinien entsprechenden Abstellplatz für die zu testenden Fahrzeuge zu finden.

Zuverlässigkeit

Mittlerweile haben die Fahrzeuge im BMW Werk Leipzig insgesamt 9.000 (Gabelstapler) bzw. 7.500 Betriebsstunden (Schlepper) absolviert. Dabei wurden in Summe 3.600kg Wasserstoff verbraucht.

Die Zuverlässigkeitsbetrachtung der eingesetzten Brennstoffzellen ergibt ein differenziertes Bild. Das komplett neu entwickelte 80V-System, das in den Gegengewichtstaplern zum Einsatz kommt, weist weiterhin Optimierungsbedarf auf. Zwar verbesserte sich die Mean Time Between Failures (MTBF) auf mittlerweile 55h, allerdings liegen die Werte damit noch deutlich unter denen der 24V-Systeme (die in den Schleppern eingesetzt werden), deren MTBF bei über hundert Stunden liegt.

4. Wasserstoffinfrastruktur für H₂-Flurförderzeuge

Eine Infrastruktur für die Betankung von H₂-Flurförderzeugen besteht im Wesentlichen aus den drei in Abbildung 2 dargestellten und miteinander verbundenen Komponenten Wasserstoffspeicher, Betankungsanlage und Dispenser (auch Befüllanlage genannt). Der Wasserstoffspeicher wird durch Trileranlieferungen mit Wasserstoff versorgt. Anschließend wird dieser durch die Betankungsanlage verdichtet und in einem Hochdruckspeicher (HD-Speicher) zwischengespeichert. Nachdem ein Flurförderzeug am Dispenser angekoppelt und der Befüllvorgang gestartet wird (z.B. durch Drücken eines Knopfes), strömt der Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Flurförderzeuges. Infolgedessen findet ein Druckausgleich bis zu einem vorher definierten Zieldruck statt. Parallel zum Befüllen des Flurförderzeuges wird das Kondensatwasser, welches bei der chemischen Reaktion des Wasserstoffes mit dem in der Umgebungsluft enthaltenen Sauerstoff entsteht, durch die Befüllanlage aus dem Flurförderzeug abgesaugt. Werden Flurförderzeuge in Gebäuden befüllt, muss lediglich der Dispenser in der Werkshalle errichtet werden. Wasserstoffspeicher und Betankungsanlage können im Freien bis zu mehreren hundert Metern entfernt aufgebaut werden.



Abbildung 2: Schematische Darstellung der Wasserstoffversorgung im Projekt H2IntraDrive

Herausforderungen im Bereich Wasserstoffinfrastruktur

Für den Betrieb von H₂-Flurförderzeugen sind der Aufbau sowie die Inbetriebnahme einer H₂-Infrastruktur zwingend erforderlich, womit v.a. die folgenden Herausforderungen einhergehen:

- Aufbau von umfangreichem Wissen auf Seiten des Flurförderzeug-Anwenders
- Identifikation und Umsetzung von Sicherheitsmaßnahmen
- Erstellung von Gutachten sowie Anträge für die behördliche Genehmigung

Aufbau von umfangreichem Wissen auf Seiten des Flurförderzeug-Anwenders

Die Wasserstoffinfrastruktur unterscheidet sich in ihrer Funktionsweise fundamental von der Batterieladetechnologie. Infolgedessen müssen neue Anforderungen definiert und Spezifikationen angepasst werden. Als Beispiel hierfür kann die Auslegung des HD-Speichers genannt werden. Bei der aufeinanderfolgenden Betankung zweier Flurförderzeuge in Kombination mit einem unterdimensionierten HD-Speicher liegt der erreichte Druck im Flurförderzeug nach dem Druckausgleich zwischen HD-Speicher und Tank unterhalb des definierten Zieldrucks. Das Fahrzeug wird somit nicht vollständig befüllt oder die Betankungsdauer steigt deutlich an. Notwendiges Wissen zur Identifikation und Abstimmung der neuen Spezifikationen liegt aufgrund des Neuheitsgrades der Wasserstofftechnologie im Bereich der Logistik meist nicht vor. Jedoch kann das notwendige Wissen in enger Abstimmung und Gesprächen mit mehreren Lieferanten gewonnen werden.

Identifikation und Umsetzung von Sicherheitsmaßnahmen

Nur durch eine frühzeitige Identifikation von notwendigen Sicherheitsmaßnahmen im Bereich der Wasserstoffinfrastruktur können diese zeitnah umgesetzt, die notwendigen behördlichen Genehmigungen erteilt und somit eine Verzögerung der Inbetriebnahme verhindert werden. Größte Herausforderungen hierbei sind aktuell noch fehlende Standards bzw. Richtlinien im

Bereich Flurförderzeuge. Infolgedessen können von der zugelassenen Überwachungsstelle (ZÜS) bzw. Behörde eventuell nicht berücksichtigte Sicherheitsmaßnahmen gefordert werden. Die frühzeitige Integration einer ZÜS mit hoher Expertise im Bereich Wasserstoffbetankung bei Flurförderzeugen kann an dieser Stelle unterstützend wirken.

Erstellung von Gutachten sowie Anträge für die behördliche Genehmigung

Für die nötige behördlichen Genehmigung des Aufbaus und Betriebs der Wasserstoffinfrastruktur sowie der H₂-Flurförderzeuge müssen zu Beginn des Vorhabens zunächst die notwendigen Anträge sowie hierfür erforderliche Gutachten identifiziert werden. Hierzu empfiehlt sich die frühzeitige Abstimmung mit der zuständigen Behörde auf Basis einer sogenannten „Tischvorlage“ (2-3 Seite Zusammenfassung des geplanten Vorhabens). Als weitere Herausforderungen ergibt sich die Erstellung der Gutachten sowie behördlichen Anträge, da sich diese im Vergleich zu konventionellen Flurförderzeugen anhand der zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen unterscheiden. Ferner sind zusätzliche Genehmigungsverfahren (z.B. Erlaubnis nach §13 der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)) notwendig. Die Vergabe der Erstellung aller benötigten Anträge sowie Unterlagen an ein externes Planungsbüro oder an die Lieferanten kann hierbei den Aufwand deutlich reduzieren und somit als wesentliche Hilfestellung fungieren.

Leitfaden für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen

Aufgrund der oben genannten Herausforderungen bzgl. Wissen, Sicherheitsmaßnahmen und behördlichen Genehmigungen entstand im Projekt H₂IntraDrive ein „Leitfaden für den Einsatz von H₂-Flurförderzeugen“. Dieser soll in erster Linie eine Unterstützung für eine schnelle und kostengünstige Inbetriebnahme von H₂- Flurförderzeugen sein. Hierfür wurden Instrumente wie Terminpläne, Checklisten, informative Ratschläge und Ablaufbeschreibungen entwickelt. Zudem gibt der Leitfaden einen Überblick über verschiedene Wasserstoffinfrastrukturkonzepte und deren Funktionsweise. Dieses Wissen erleichtert die Diskussion mit den einzelnen Lieferanten. Der Leitfaden steht u.a. als freier Download auf www.h2intradrive.de und der Homepage des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik der TUM zur Verfügung. [1]

5. Ökologische Nachhaltigkeit von H₂-Flurförderzeugen

Die ökologische Nachhaltigkeit kann mit Hilfe der Ökobilanz-Methodik bewertet werden. Hierbei werden Umweltaspekte und -auswirkungen von Produktsystemen, ausgehend von der Rohstoffgewinnung bis zur endgültigen Beseitigung, systematisch abgeschätzt [2]. Im

Rahmen der durchgeführten Bewertung wurden mit der Ökobilanzierungssoftware „thinkstep GaBi“ Ökobilanzen für verschiedene Flurförderzeuge der Firma Linde Material Handling erstellt. Im Speziellen wurden die Umweltauswirkungen eines batteriebetriebenen 24V-Routenzugschleppers (E-RZS), eines mit Wasserstoffbrennstoffzellen betriebenen 24V-Routenzugschleppers (FC-RZS), eines batteriebetriebenen 80V-Gabelstaplers (E-GS) und eines mit Wasserstoffbrennstoffzellen betriebenen 80V-Gabelstaplers (FC-GS) bewertet. Die batteriebetriebenen Fahrzeuge werden dabei von Standard-Panzerplattenbatterien, sogenannten PzS-Batterien, angetrieben. Das Vorgehen bei der Bewertung richtete sich nach ISO 14040, wobei alle Lebensphasen des Produktlebenszyklus in Form einer „Cradle to Grave“-Untersuchung berücksichtigt wurden. Als funktionelle Einheit der Ökobilanzierung wird die jeweilige Lebensdauer (in Betriebsstunden) des untersuchten Flurförderzeugs gewählt, weshalb alle Angaben und Ergebnisse auf diese bezogen sind. Prozessdaten zu Wasserstoff- und Stromerzeugung, Rohstoffbereitstellung sowie Transport wurden der verfügbaren GaBi-Professional-Datenbank sowie weiteren GaBi-Zusatzdatenbanken entnommen. Daten für die Produktion und das Recycling von Flurförderzeugen, Brennstoffzellen sowie Blei-Säure-Batterien stammen aus der Literatur. Die Daten für die Nutzungsphase beruhen im Bereich von Service und Wartung auf Erfahrungswerten der Projektpartner und wurden mit Literaturdaten ergänzt. Die elektrischen Energiebedarfe der Fahrzeuge wurden von Linde Material Handling auf Basis eines VDI-Arbeitsspiels ermittelt [3] bzw. stammt aus den Typenblattangaben der Flurförderzeuge. Als geografische Lage der Flurförderzeugherstellung, -anwendung und des Recyclings wurde Deutschland angenommen.

Betriebsdaten und Materialmix

Im Betrieb werden PzS-Batterien mit Elektrolytumwälzung verwendet, welche mit Hilfe von energieeffizienten Ladegeräten mit primär getakteter Technik (Hochfrequenzladegeräte) geladen werden. Infolgedessen kann während der Batterieladung von einem „Best-Case-Szenario“ mit den geringsten Energieverlusten gesprochen werden. Der Gesamtwirkungsgrad beläuft sich dabei auf 84% [4]. Energieverluste in der Batterie und im Ladegerät werden infolgedessen berücksichtigt und für die Batterieladung der deutsche Strommix verwendet. Der verwendete Wasserstoff wird durch Dampf-Reforming von Erdgas hergestellt und zudem der Energiebedarf für das Verdichten des Wasserstoffes auf 350bar von 1,58kWh pro Kilogramm Wasserstoff (Messwert aus H2IntraDrive) berücksichtigt. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzellen ist auf den unteren Heizwert von Wasserstoff bezogen

und wurde anhand der Herstellerangaben aus den Betriebsanleitungen bestimmt. In Tabelle 1 sind weitere relevante Betriebsdaten dargestellt.

Tabelle 1: Betriebsdaten Flurförderzeuge

Betriebsdaten				
	E-RZS	FC-RZS	E-GS	FC-GS
Lebensdauer Flurförderzeug [h]	10.000	10.000	20.000	20.000
Lebensdauer Batterie bzw. Brennstoffzelle [h]	6.000	10.000	6.000	20.000
Wirkungsgrad Batterieladung bzw. Brennstoffzelle [%]	84	45	84	45
VDI-Verbrauch Flurförderzeug [kWh/h]	1,16	1,16	9,8	9,8

Die Materialzusammensetzung der untersuchten Flurförderzeuge ist in Tabelle 2 dargestellt. Aufgrund der geringfügigen Auswirkungen auf die Gesamtmasse des Schleppers bei der Fahrzeuganpassung von Batterie- hin zu Brennstoffzellenbetrieb wurden diese vernachlässigt. Beim Gabelstapler wurden hingegen ein Zusatzgewicht und ein zusätzlicher Brennstoffzellensystemtrag berücksichtigt.

Tabelle 2: Materialmix der Flurförderzeuge (Quelle: Linde Material Handling)

Materialmix Flurförderzeuge				
	E-RZS	FC-RZS	E-GS	FC-GS
	Massen- anteile [%]	Massen- anteile [%]	Massen- anteile [%]	Massen- anteile [%]
Stahl	56%	58%	33%	33%
Guss	6%	6%	28%	29%
Bunt/Leichtmetalle	2%	2%	1%	1%
Kunststoffe	5%	5%	4%	4%
Batterie	31%	0%	33%	0%
Brennstoffzellensystem	0%	29%	0%	28%
Betriebsstoffe	0,3%	0,3%	0,9%	1%
H2-Fahrzeuganpassung	0%	0%	0%	4%
Summe	100%	100%	100%	100%

Die in den H2-Flurförderzeugen eingesetzten Brennstoffzellen bestehen aus den in Tabelle 3 aufgeführten Komponenten. Den prozentual größten Massenanteil bilden der Wasserstofftank, die Gehäuseteile und die Aufhängungen mit insgesamt 82-86% der Gesamtmasse. Der Anteil der für die Energiebereitstellung verantwortlichen Komponenten (Zellstapel und Li-Ionen Batterie) ist mit 6-8% vergleichsweise gering. Materialmix und Masseanteile der PzS-Batterien stammen aus Literaturquellen [5], [6], [7].

Tabelle 3: Bestandteile der Brennstoffzellen (Quelle: Brennstoffzellensystemhersteller)

Materialmix Brennstoffzelle				
	FC-RZS		FC-GS	
	Masse [kg]	Massen-anteile [%]	Masse [kg]	Massen-anteile [%]
Brennstoffzellen-Stapel (Stack)	8	3%	55	4%
Li-Ionen Batterie	8	3%	55	4%
Wasserstofftank	95	36%	207	13%
Elektronik	4	1%	28	2%
Anlagenperipherie (Balance of Plant)	19	7%	138	9%
Gehäuseteile und Aufhängungen (Stahl)	121	45%	966	62%
Gehäuseteile und Aufhängungen (Kunststoff)	13	5%	107	7%
Summe	268	100%	1.558	100%

Tabelle 4 zeigt den Service- und Wartungsaufwand über die gesamte Lebensdauer der Flurförderzeuge. Aufgrund der doppelten Lebensdauer und der höheren Belastung ist dieser für die Gabelstapler deutlich größer. Bei den H₂-Flurförderzeugen entfallen die Wechselbatterien und das Wasser, das in den Blei-Säure Batterien aufgrund von Überladung verdunstet und nachgefüllt werden muss.

Tabelle 4: Service- und Wartungsaufwand

Service- und Wartungsaufwand Flurförderzeuge				
	E-RZS	FC-RZS	E-GS	FC-GS
Vorderreifen [Anzahl]	3	3	12	12
Hinterreifen [Anzahl]	6	6	24	24
Betriebsstoffe [kg]	18	18	64	64
Ersatzbatterien [Anzahl]	0,7	0	2,3	0
Nachfüllwasser [kg]	263	0	3.267	0
Gabelzinken [Anzahl]	0	0	3	3
Servicefahrten [km Gesamt]	630	1.330	1.330	1.330

Ergebnisse Ökobilanzierung

In der Ergebnisdarstellung wird zwischen fünf Phasen unterschieden. In „Herstellung Flurförderzeug“ werden zunächst die Rohstoffgewinnung sowie die Fertigung des Fahrzeuges ohne Batterie bzw. Brennstoffzelle zusammenfassend dargestellt. Zudem werden Emissionen bzw. Emissionsgutschriften aus dem Recyclingprozess berücksichtigt. In der zweiten Phase „Herstellung Power Unit“ fließen alle Emissionen für die Herstellung der Batterien sowie eventueller Ersatzbatterien bzw. die Herstellung des

Brennstoffzellensystems inkl. Recycling mit ein. Unter „Transport“ werden die Emissionen aus allen Material- sowie Fertigprodukttransporten zusammenfassend dargestellt. Hierfür wurde bei allen Transporten eine Entfernung von 1.000 km angenommen (europäisches Lieferanten- und Kundennetz). Im Bereich „Service und Wartung“ sind alle Emissionen im Zusammenhang mit dem Service und der Wartung des Flurförderzeuges sowie der Power Unit dargestellt. Abschließend werden in der Phase „Betrieb“ die Emissionen aus der Erzeugung des im Betrieb verbrauchten Stroms und Wasserstoffs dargelegt.

In Abbildung 3 wird das Treibhauspotenzial (CO₂-Äquivalent) der Routenzugschlepper über den gesamten Produktlebenszyklus aufgezeigt, wobei alle Angaben im relativen Verhältnis zu den Gesamtemissionen des E-RZS dargestellt sind. Hierbei ist ersichtlich, dass die Emissionen für die Herstellung der PzS-Batterien im Vergleich zur Brennstoffzelle mehr als doppelt so hoch sind. Dies ist u.a. auf die höheren Emissionen in der Fertigung und Rohstoffgewinnung sowie die geringere Lebensdauer der Batterie und die damit notwendige Verwendung von 0,7 Ersatzbatterien zurückzuführen. Im Vergleich der Betriebsphasen liegen hingegen die Umweltauswirkungen des brennstoffzellenbetriebenen Schleppers um ca. 2% über denjenigen des batteriebetriebenen. Diese werden jedoch durch die vorher genannten Emissionen bei der Herstellung der Power Unit kompensiert. Infolgedessen liegen die Gesamtemissionen des FC-RZS um ca. 2% unter denen des E-RZS. Betrachtet man beim E-RZS die Verwendung von z. B. gealterten Batterien ohne Elektrolytumwälzung sowie Ladegeräten in unregelmäßiger Technik („Worst-Case-Szenario“ mit Wirkungsgrad von 65%), steigen die Emissionen im Betrieb aufgrund der höheren Energieverluste bei der Batterieladung deutlich an. In diesem Fall beträgt die Differenz der Gesamtemissionen zwischen E-RZS und FZ-RZS deutlich mehr als 2%.

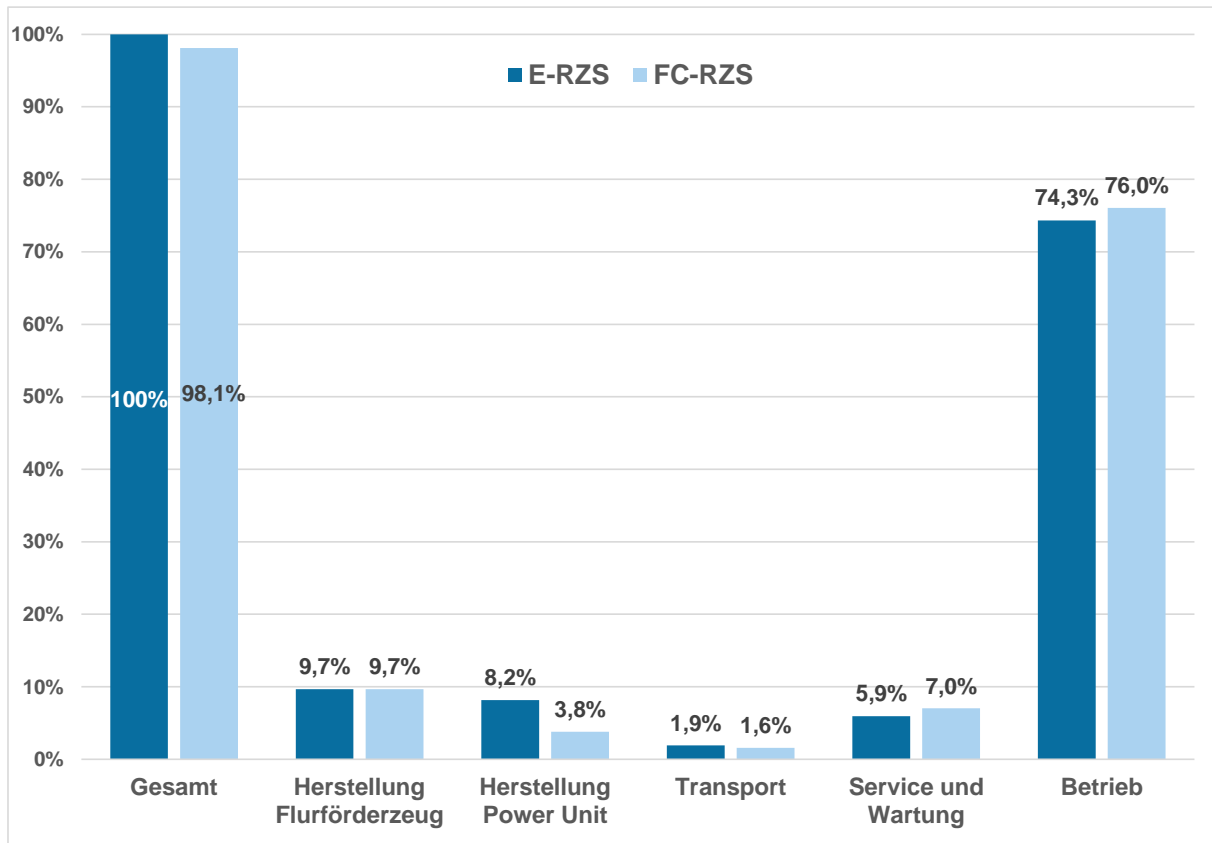


Abbildung 3: Gegenüberstellung Treibhauspotenzial (GWP100) Routenzugschlepper

Eine Betrachtung der Treibhauspotenziale der Gabelstapler in Abbildung 4 zeigt, dass diese analog den Routenzugschleppern bewertet werden können. Aufgrund der höheren Lebensdauer sowie des höheren Energiebedarfs des Gabelstaplers steigt jedoch der Einfluss der Betriebsphase auf die Gesamtemissionen. Im Umkehrschluss sinkt die Einflussnahme der Flurförderzeugherstellung im Vergleich zum Schlepper von ca. 10% auf ca. 5,5%. Folglich rückt bei einer Lebensdauererhöhung des Flurförderzeuges die Energieeffizienz der Antriebstechnologie in den Fokus. Des Weiteren vergrößert die höhere Lebensdauer des Gabelstaplers die Differenz der Emissionen für die Herstellung der Power Unit. Aufgrund der deutlich höheren Batteriemasse und der notwendigen 3,3 Batterien während der Lebenszyklusphase des E-GS betragen diese nun etwas mehr als das Vierfache der Emissionen des FC-GS.

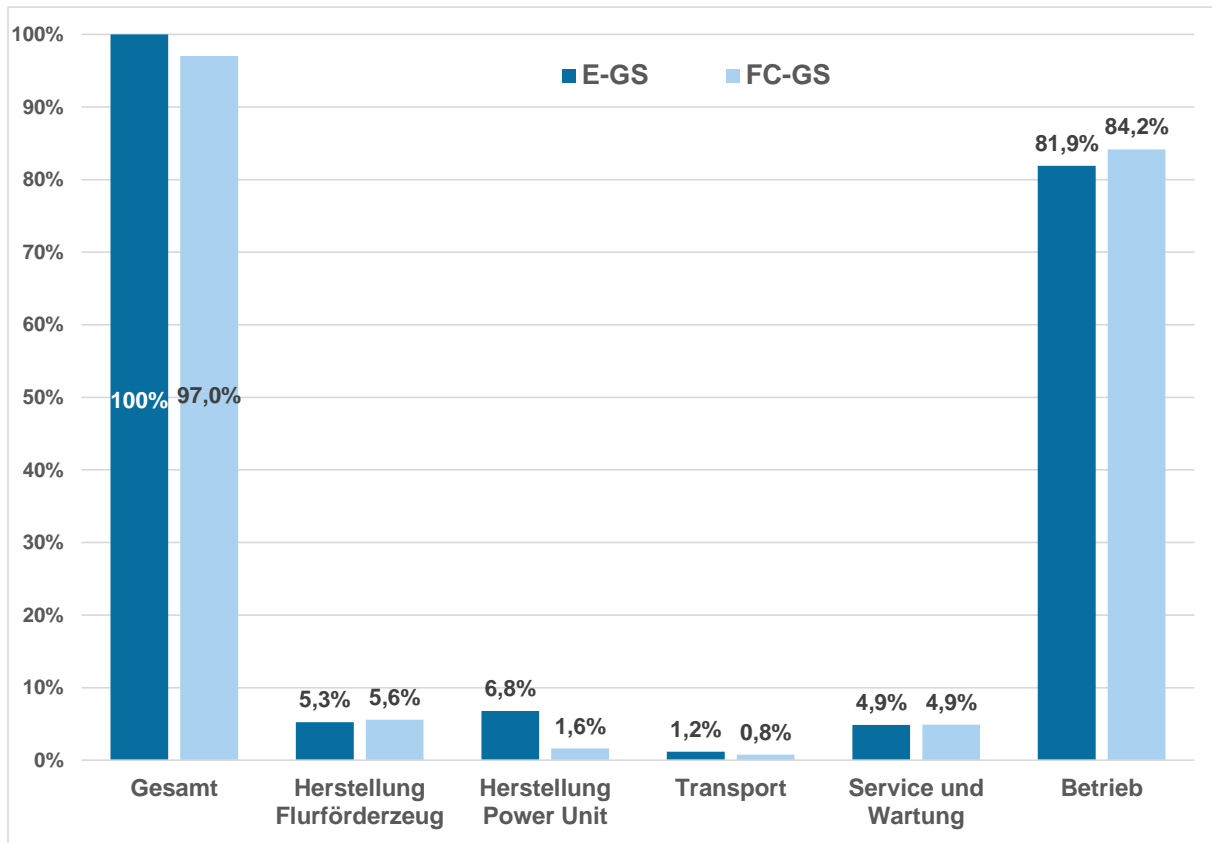


Abbildung 4: Gegenüberstellung Treibhauspotenziale (GWP100) Gabelstapler

Fazit & Ausblick

Bei der Verwendung von konventionellem Strom sowie konventionellem Wasserstoff liegt das Treibhauspotenzial von H₂-Flurförderzeugen unter dem von batteriebetriebenen Flurförderzeugen. Hauptgrund hierfür ist die vollständige Kompensation der höheren Emissionen im Betrieb des brennstoffzellenbetriebenen Flurförderzeuges durch die geringeren Emissionen in der Herstellung der Power Unit. Des Weiteren ist ersichtlich, dass der Großteil der Emissionen in der Betriebsphase anfällt. Infolgedessen sind weitere Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen von alternativen Energiepfaden, z. B. Strom aus erneuerbaren Energiequellen oder grün zertifizierter Wasserstoff (nach TÜV-Süd-Richtlinie [8]), auf die Betriebsphasen notwendig. Nur so kann eine gesamtheitliche Aussage hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit von H₂-Flurförderzeugen getroffen werden. Die Bewertung des Einflusses verschiedener Energiepfade und Ladetechnologien auf das Treibhauspotenzial von wasserstoff- sowie batteriebetriebenen Flurförderzeugen ist Inhalt des Forschungsprojektes H₂IntraDrive.

- [1] Günthner, W.; Micheli, R.: Leitfaden für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen - Am Beispiel H2IntraDrive. München: Lehrstuhl fml 2015
- [2] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth 2006 S. 17
- [3] VDI 2198: Typenblätter für Flurförderzeuge, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2010
- [4] VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik. Braunschweiger Arbeitskreis: Überschlägige Kostenermittlung einer Batterieladung. Infoblätter Nr.2 FA 305, 2012
- [5] Rantik, M.: Life Cycle Assessment of Five Batteries for Electric Vehicles under Different Charging Regimes. Chalmers University of Technology, 1998
- [6] Huy, D. et. al.: Deutschland - Rohstoffsituation 2012, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 2012 S. 39
- [7] Sullivan, J. L.; Gaines, L.: A Review of Battery Life-Cycle Analysis. State of Knowledge and Critical Needs. Argonne National Laboratory, 2012. S. 141
- [8] TÜV SÜD Standard: Erzeugung von grünem Wasserstoff (GreenHydrogen). München 2011