

Technische Hochschule Wildau [FH]

## 2.1 Ermittlung des „State of the Art“ der Fahrzeugtechnik

AP 2 – Anforderungsdefinition Fahrzeugtechnik für eMobilität  
Verteilerfahrzeug im Kombinierten Verkehr

**Zur Vertraulichen Behandlung**

Martin Jung, M. Eng.  
Dipl.-Verk.wirtsch. Conrad Schmidt  
24.10.2014

**Gefördert durch:**



## Inhalt

1.	Ausgangssituation und Zielsetzung .....	2
2.	Funktionsprinzip Brennstoffzelle .....	3
3.	Brennstoffzellen-Technologien.....	4
4.	Funktionsprinzip Lithium-Ionen-Batterie.....	6
5.	Praxisbeispiele des emissionsfreien Güterverkehrs .....	7
6.	Anforderung der Logistikprozesse an den E-LKW.....	9
6.1	Funktionale Anforderungen .....	9
6.2	Nicht-funktionale Anforderungen .....	10
7.	Technologiebewertung für den Güterverkehr .....	11
8.	Exkurs: Beschreibung der Einsatzzeichnung von Photovoltaik-Systemen in Fahrzeugen .....	15

### Gefördert durch:



## 1. Ausgangssituation und Zielsetzung

Als eines der größten Hemmnisse bei der Marktdurchdringung der Elektromobilität gilt, zum heutigen Stand der Technik, die stark beschränkte Reichweite der Elektrofahrzeuge. Für den Straßengüterverkehr kommt erschwerend hinzu, dass das Gewicht der Batterie einen wesentlichen Einfluss auf das Eigengewicht eines E-LKW und somit auf die Nutzlast des Fahrzeuges ausübt.

Für den Güterverkehr mit schweren Elektro-LKW bedeutet dies, dass die Akkus zugunsten der Nutzlast ein relativ geringeres Gewicht aufweisen müssen. In Abhängigkeit von der Energiedichte wird die Akkukapazität dadurch stark beschränkt, so dass die maximale Reichweite von elektrisch betriebenen LKW zumeist nur den Einsatz im Nahverkehr ermöglicht.

Eine Möglichkeit, um dieser Problematik entgegenzuwirken, besteht im Einsatz so genannter „Range Extender“ für Elektrofahrzeuge. Mit deren Hilfe kann die Reichweite und somit die Zeit zwischen zwei Ladezyklen verlängert werden. Erstrebenswert ist dabei, dass die Vorteile der Elektromobilität durch den Range Extender beibehalten werden.

Zur Gewährleistung der emissionsfreien und vollständig elektrifizierten Lieferkette sollte das System zur Reichweitenverlängerung demnach ähnliche umweltrelevante Eigenschaften wie die Akkus aufweisen. Dazu gehören die Vermeidung von direkten Schadstoffemissionen und der Einsatz eines geräuscharmen Systems. Eine Möglichkeit besteht im Einsatz von Brennstoffzellen als ergänzender Hilfsgenerator zum elektrischen Antriebsmotor oder als Primärenergiewandler mit Speicherung in einer kleinen Batterie.

Mit dem generellen Ziel der Reduktion von Emissionen hin zu einer Null-Emissions-Strategie kann die Entwicklung in der Antriebstechnik mit Abbildung 1 zusammengefasst werden.

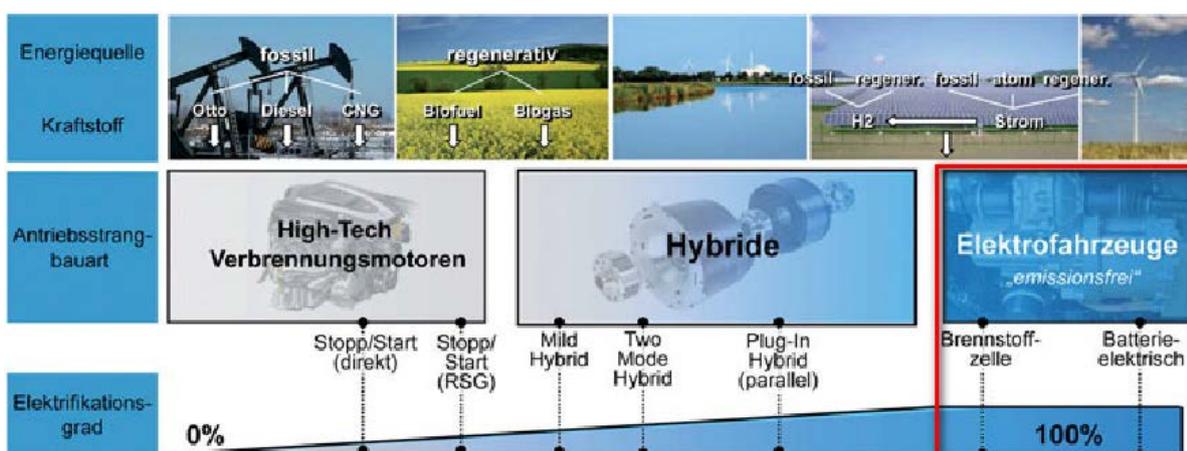


Abbildung 1: Elektrifizierung des Antriebsstrangs (Bildquelle: Hüttl et al., 2010)

Gefördert durch:



## 2. Funktionsprinzip Brennstoffzelle

Bei einer Brennstoffzelle wird die gespeicherte chemische in elektrische und thermische Energie umgewandelt. Prinzipiell besteht eine Brennstoffzelle aus nur fünf Teilen: Zwei Gehäusehälften, einer Membran-Elektroden-Einheit und zwei Gasdiffusionsschichten. In den Gehäusehälften befinden sich zwei Elektroden (Anode und Kathode), die durch einen Elektrolyten mit einer ionendurchlässigen, gasdichten Membran voneinander getrennt sind. Die Erzeugung von Energie erfolgt mit der Reaktion von Sauerstoff (oder sauerstoffreiches Gas, wie z.B. Luft) mit dem Brennstoff (z.B. Wasserstoff, Methan, Methanol) wird Energie erzeugt.

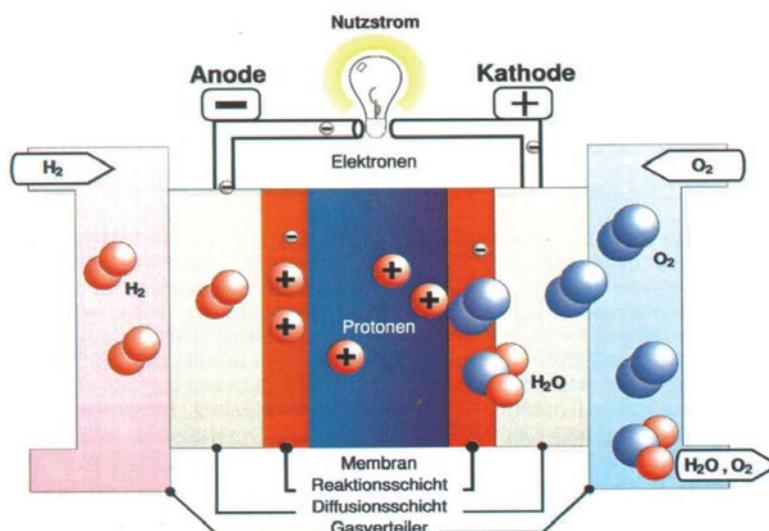


Abbildung 2: Funktionsprinzip H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>- Brennstoffzelle (Bildquelle: DLR)

Im Falle der sogenannten Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (PEFC, auch: Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle PEMFC) ist der Brennstoff reiner Wasserstoff. Zwischen den beiden Gasräumen befindet sich die Membran mit einem protonenleitenden Elektrolyten. Dem Gasraum der katalytischen Anode wird Wasserstoff zugeführt, der sich in Elektronen und Protonen teilt. Die frei gewordenen Wasserstoff-Protonen diffundieren durch die Membran in den Kathodenraum. Für die Elektronen ist die Membran nicht durchlässig, weshalb sie sich auf der Anodenseite sammeln. Im Kathodenraum wird Sauerstoff zugeführt, der an den Kathodenkatalysatoren in Ionen zerlegt wird. Über eine elektronenleitende Verbindung zwischen den Elektroden können die Wasserstoff-Elektronen von der Anode zur Kathode fließen und in Verbindung mit den eingedrungenen Wasserstoff-Protonen und den Sauerstoffionen zu Wasser reagieren. Der Fluss der Elektronen erzeugt durch die Verbindung mit einer elektrischen Last eine elektrische Leistung.

Gefördert durch:

Die Spannung, die eine einzelne Zelle erzeugt, ist für die meisten praktischen Anwendungsfälle zu gering. Deshalb sind die Zellen in Stapeln angeordnet und werden von zwei Endplatten verschlossen. Das gesamte System bezeichnet man auch als Brennstoffzellenstack. Über je einen Ein- und Auslass in den Endplatten werden die Reaktionsgase zugeführt und die Reaktion läuft in allen Zellen des Stacks gleichzeitig ab.<sup>1</sup>



Abbildung 3: Brennstoffzellen- Stack mit drei Modulen zu je 10 Brennstoffzellen PEFC  
(Bildquelle: Forschungszentrum Jülich)

### 3. Brennstoffzellen- Technologien

Die verschiedenen Typen von Brennstoffzellentechnologien unterscheiden sich generell im Aufbau der Membran-Elektroden-Einheit. Je nach Typ kann die Transportrichtung der Ionen durch die Membran und die Art der Ionen variieren. Aus den unterschiedlichen Betriebstemperaturen und verschiedenartigem Brennstoffeinsatz ergeben sich außerdem Einschränkungen hinsichtlich des Einsatzzwecks.

Im Fahrzeugeinsatz wurden bislang die folgenden Typen getestet:

- **AFC** (Alkaline Fuel Cell): Diese Niedrigtemperatur-Brennstoffzelle war mit ihrer Verwendung auf der Apollo-Mission der erste Brennstoffzellentyp für den technischen Einsatz. Der Elektrolyt ist eine wässrige Kaliumhydroxid-Lösung. Für den Betrieb benötigt dieser Typ jedoch Reinst-Wasserstoff und Reinst-Sauerstoff. Für den Einsatz im Automotive-Bereich ist die AFC eher ungeeignet, da bei einer CO<sub>2</sub>-Verunreinigung das ausfallende Kaliumcarbonat die porösen Elektroden verstopfen könnte und zu einem Leistungsabfall führen würde. Für den Fahrzeugeinsatz in Serie stellt sich dieses System daher als eher ungeeignet dar.
- **DMFC** (Direct Methanol Fuel Cell): Die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle funktioniert über die direkte katalytische Zerlegung von flüssigem Methanol. An der Anode wird eine Betriebstemperatur von ca. 110°C

<sup>1</sup> REXEL (2012)

<http://www.erdgas.info/erdgasheizung/brennstoffzelle/funktionsprinzip/>

Gefördert durch:

erreicht. Vorteilhaft an diesem Typen sind die einfache Handhabung und das problemlose Nachfüllen des Brennstoffs. Als problematisch stellt sich heraus, dass das Methanol durch die Polymermembran von der Anode zur Kathode wandert. Zum einen tritt dabei ein Verlust des Brennstoffes auf, zum anderen kann eine Blockierung der Kathoden-Katalysatoren zu geringeren Wirkungsgraden führen. Für den Einsatz als Range Extender von Elektro-Fahrzeugen ist dieser Brennstoffzellentyp zum heutigen Tage noch ungeeignet, da der erreichte Leistungsbereich zu gering ausfällt.<sup>2</sup>

- **SOFC** (Solid Oxid Fuel Cell): Bei der Festoxid-Brennstoffzelle kommt als Elektrolyt eine ionenleitende Keramik zum Einsatz. Dadurch können hohe Betriebstemperaturen von 750 – 1.000°C erreicht werden, welche für die Leitfähigkeit der Sauerstoffionen Voraussetzung sind (d.h. die Transportrichtung der Ionen erfolgt anders als bei PEFC und DMFC von der Kathode zur Anode). Neben Wasserstoff kann die SOFC auch mit anderen Brennstoffen wie Erdgas, Biogas oder Kohlendioxid betrieben werden. Für den Einsatz im automobilen Bereich stellen die erforderlichen Betriebstemperaturen aufgrund der Anforderungen an die Isolierung und der langen Aufheizzeiten jedoch ein Hindernis dar. Darüber hinaus muss der Elektrolyt aus Keramik sehr dünn ausgeführt sein, was ihn empfindlicher gegenüber Erschütterungen macht. Aus diesem Grund konnte sich die SOFC bis heute nicht für den Einsatz in Fahrzeugen durchsetzen.
- **NT-PEFC** (Nieder Temperatur Polymer Electrolyte Fuel Cell): Das Funktionsprinzip dieses Typen wird bereits in Abschnitt 2 erläutert. Die Betriebstemperaturen dieses Typs liegen durch den benötigten Wassergehalt in der Kunststoffmembran bei maximal 80°C. Außerdem kommt Platin als Katalysator zum Einsatz, welches CO-empfindlich ist. Durch die Katalysatorvergiftung mit CO kann eine Zersetzung der Brennstoffzellen erfolgen. Die Entwicklungstendenz geht daher in Richtung Hochtemperatur-PEFC (120°-200°C), bei denen der Wirkungsgrad verbessert, das Wärmemanagement vereinfacht und die CO-Empfindlichkeit der Katalysatoren verringert werden kann. Generell zeichnet sich dieser Brennstoffzellentyp durch seine Schnellstartfähigkeit und eine gute Dynamik aus, weshalb er für die Verwendung im Automobilbereich prädestiniert ist. Außerdem ist diese Brennstoffzelle Gegenstand einer Vielzahl von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Die aussichtsreichste Technologie für den Einsatz in Fahrzeugen stellt demnach die PEFC dar. Zur Optimierung des Systems ist jedoch weiterer Entwicklungsaufwand notwendig, der sich in sämtliche Bereiche des Produktlebenszyklus' erstreckt.

<sup>2</sup> Vgl. [http://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/Forschung/DMFC/\\_node.html](http://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/Forschung/DMFC/_node.html)

**Gefördert durch:**



## 4. Funktionsprinzip Lithium- Ionen- Batterie

Grundsätzlich unterscheiden sich Akkumulatoren in Primärbatterien (nach Entladung keine Aufladung möglich) und Sekundärbatterien (nach Entladung Aufladung möglich). Wieder aufladbare Lithium-Ionen (Li-Ion) Batterien wurden erstmals 1991 von Sony auf den Markt gebracht. Durch ihre hohe Energiedichte kommt dieser Batterietyp vor allem in Mobiltelefonen, Notebooks und Werkzeugen zum Einsatz. In der heutigen Zeit finden Li-Ion Batterien auch zunehmend Einzug in die Elektromobilität, wie z.B. in Pedelecs, Elektrorollern, Hybridfahrzeugen und vollelektrischen Fahrzeugen.<sup>3</sup>

Eine Li-Ion Batterie besitzt folgende Komponenten:

- positive Elektrode aus Lithium-Metall-Oxid
- negative Elektrode aus Kohlenstoff (z.B. Graphit)
- Elektrolytlösung
- Separator (poröse Membran)

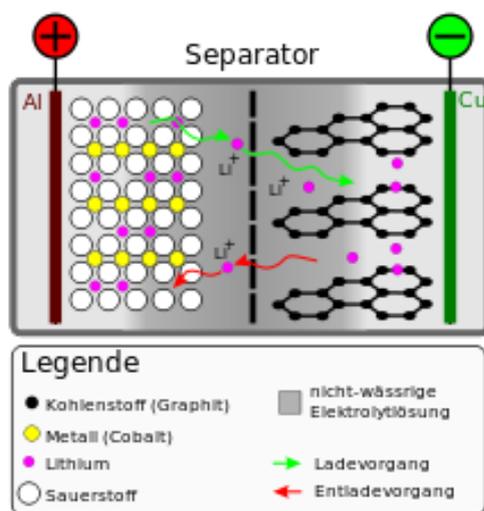


Abbildung 4

Beide Elektroden können in ihre atomare Gitterstruktur Lithium-Ionen einladen. Beim Lade- und Entladevorgang wandern einzelne Lithium-Ionen zwischen den Elektroden hin und her und werden in den Aktivmaterialien eingelagert.<sup>4</sup>

Vorteile	Nachteile
Hohe Energiedichte	Relativ geringe Lebensdauer
Hoher Wirkungsgrad	Temperaturempfindlich
Geringe Selbstentladung	Hohe Herstellungskosten
Hohe Zyklenfestigkeit	Relativ Hohes Leistungsgewicht

Tabelle 1: Vor- und Nachteile einer Lithium- Ionen Batterie

<sup>3</sup> Vgl. Korthauer (2013): Handbuch Lithium-Ionen Batterien

<sup>4</sup> Vgl. Borgeest (2014): Elektronik in der Fahrzeugtechnik

**Gefördert durch:**

## 5. Praxisbeispiele des emissionsfreien Güterverkehrs

Die Entwicklung und Demonstration der Brennstoffzellentechnologie ist vor allem in portablen (APU, Ladegeräte für Mobiltelefone), stationären und Fahrzeugtechnologien des Personenverkehrs verbreitet. Im Güterverkehr hat zum Berichtszeitpunkt ein Großteil der Fahrzeuge noch Prototypcharakter oder bestenfalls Kleinseriencharakter. Für den Null-Emissionsbetrieb kann zwischen den folgenden verschiedenen Formen der Elektromobilität unterschieden werden:

- rein Batterie-elektrische Fahrzeuge (BEV)
- Batterie-elektrische Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Range Extender (REEV) und
- Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzellen (FCEV).

Zum Zeitpunkt des Auswahlprozesses gab es nur ein sehr geringes Angebot von mittelschweren und schweren LKWs. Ein Teil der betrachteten Fahrzeuge hatte noch Prototypcharakter, bestenfalls Kleinseriencharakter. Eine Auswahl rein Batterie-elektrisch angetriebener Fahrzeuge (BEV) des Güterverkehrs ist in nachfolgender Tabelle 2 dargestellt.

Hersteller	Smith	Renault	E- Force	Terberg
Modell	Newton	Midlum Electric		YT-202 EV
zGG [t]	12,0	16,0	18,0	40,0
Nutzlast	6,9	5,2	10,0	34,0
Batterietyp	Lithium-Ion	Lithium-Ion	Li-Eisenphosphat	Li-Eisenphosphat
Batteriekapazität [kWh]	80-120	170	240	206
Leistung [kW]	120	103	300	138

Tabelle 2: Vergleich auf dem Markt erhältlicher E- LKW

Im Segment der Batterie-elektrischen LKW mit Reichweitenverlängerer stellte die Proton Motor Fuel Cell GmbH im Jahr 2013 das erste mit Batterie und Brennstoffzelle betriebene elektrische Nutzfahrzeug in der Gewichtsklasse von 7,5 bis 12 Tonnen vor. Dafür wurde in den von Smith Electric Vehicles gebauten Transporter ein Brennstoffzellen-System mit einer Leistung von 8 kW integriert, welches die Batterie mit elektrischer Energie versorgt.

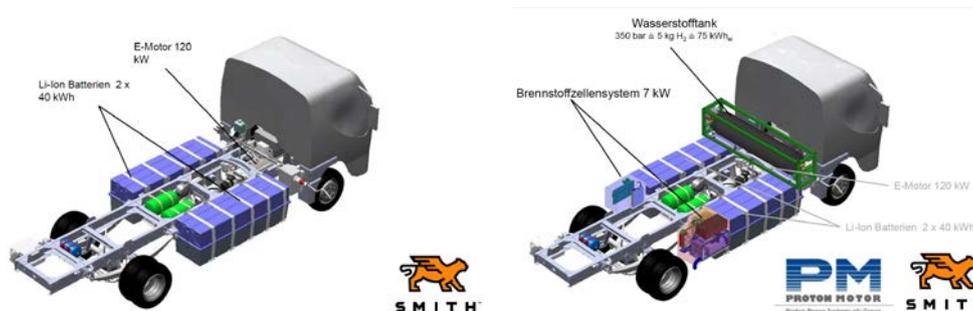


Abbildung 5: Smith EV Newton Elektro- LKW ohne (links) und mit Brennstoffzelle (rechts)  
(Bildquelle: Proton Motor Fuel Cell GmbH)

Gefördert durch:



Im Straßentest ist der Prototyp mit zwei Lithium-Ionen-Batterien mit je 40 kWh und einem Brennstoffzellen-Range Extender mit 7 kW Leistung im Münchener Stadtgebiet erprobt worden. Die ersten Testergebnisse ergaben, dass unter urbanen, städtischen Bedingungen eine Reduktion der Batterieentladung von bis zu etwa 50 % erreicht werden kann, womit die Reichweite des Fahrzeuges um bis zu 100 % gesteigert werden konnte.<sup>5</sup> Aktuell erprobt der KEP-Dienstleister Hermes den 7,5-Tonner mit Range Extender von Smith Newton in Hamburg für den Paketdienst und bei der Zustellung von Möbeln und Großgeräten.<sup>6</sup>

In der Kategorie der Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzellen als Hauptenergeträger befindet sich aktuell ein Fahrzeug der niederländischen Firma Hytruck auf dem Markt. Der C8HE mit 3,4 Tonnen Nutzlast basiert auf einem umgebauten Mitsubishi Canter, bei dem Dieselmotor, Getriebe, Differential und Dieseltank entfernt wurden. An deren Stelle wurde ein Wasserstofftank mit einem Fassungsvermögen von 5,8 kg und eine NT-PEFC mit einer Leistung von 15 kW eingebaut. Die gewonnene Energie wird an die beiden Lithium-Ionen-Batterien mit einer Kapazität von 25 kWh übertragen, die die elektrischen Motoren an den Hinterrädern antreiben. Mit diesem System ermöglicht das Fahrzeug eine Reichweite von 350-400 km.



Abbildung 6: Hytruck C8HE Brennstoffzellenfahrzeug (Bildquelle: Hytruck)

Eine weitere Anwendung findet sich im Hafen von Los Angeles. Der Tyrano von der Vision Motor Corp. ist der weltweit erste Wasserstoff-Brennstoffzellentruck der Klasse 8.<sup>7</sup> Der 400 kW starke Elektromotor wird von Lithium-Ionen-Batterien versorgt, die Brennstoffzellen liefern eine Leistung von bis zu 65 kW. Der für Umfuhren im Hafen eingesetzte LKW verfügt über eine Reichweite von 322 km in der Standardkonfiguration.<sup>8</sup>



Abbildung 7: Vision Tyrano (Bildquelle: Vision Motor Corp.)

<sup>5</sup> Vgl. Birk (2012): Brennstoffzellen Range Extender für e-LKW

<sup>6</sup> Vgl. <http://www.grueneautos.com/2014/02/hermes-paketdienst-testet-elektro-lkw-mit-hyrange-extender-von-proton-motor/>

<sup>7</sup> Klasse 8-Trucks bezeichnen alle Fahrzeuge des Güterverkehrs mit einer zulässigen Gesamtmasse von über 14.969 kg.

<sup>8</sup> Vgl. CE Delft, DLR (2013): Zero emission trucks

**Gefördert durch:**

## 6. Anforderung der Logistikprozesse an den E- LKW

### 6.1 Funktionale Anforderungen

Das Fahrzeug ist für die Verwendung auf der „letzten Meile“ vorgesehen. Grundsätzlich soll der zu beschaffende E-LKW vom Westhafen Berlin aus Belieferungen im Güternahverkehr durchführen. Somit kommt das gesamte Berliner Stadtgebiet als Zielgebiet in Frage. Durch die Einbindung in eine Transportkette des kombinierten Verkehrs soll das Fahrzeug beim Handling von Wechselbrücken und Containern mit eingebunden werden. Zusammen mit den Projektpartnern wurden drei mögliche Betriebsszenarien definiert:

#### Betriebsszenario 1 „Kaffee- Zug“

Die Firma Gebr. Westhoff GmbH + Co. Roh + Röstkaffee KG verarbeitet Rohkaffee in einer Kaffeerösterei für diverse Handelsunternehmen. Die Rösterei befindet sich nördlich des Westhafens im Bezirk Reinickendorf. Einmal täglich erfolgt eine Rohkaffeelieferung per Containerzug (20' Container) aus Hamburg in den Westhafen (betrieben durch Zippel). Nach Umschlag und Entladung des Kaffees im Westhafen beliefern Sattelzüge die Kaffeerösterei bedarfsgerecht. Die Straßentransporte werden aktuell von konventionell getriebenen Sattelzugmaschinen mit Kippaufliegern durchgeführt. Die Kippauflieger erreichen eine Gesamtmasse von bis zu 27 t, so dass der Sattelzugverband in aller Regel für eine zulässig Gesamtmasse von 40 t zugelassen sein muss. Eine Tour (Hin und Rückfahrt) ist etwa 20 km lang. Zusätzlich finden sogenannte Umfuhren auf dem Terminalgelände statt. Dabei werden die Container auf einem geeigneten Kipp-Container-Auflieger-Chassis vom Terminal zum etwa 300 m entfernten Silo gefahren. Die für die Umfuhren eingesetzte Zugmaschine benötigt ebenfalls eine ausreichend hohe Lastkapazität um die bis zu 25 t schweren Container und das Chassis ziehen zu können. Für die Kippfunktion des Chassis muss die Zugmaschine außerdem eine entsprechende Hydraulikpumpe und einen ausreichend dimensionierten Hydraulikbehälter mitführen und einsetzen können.

#### Betriebsszenario 2 „Kakao- Zug“

Vom Seehafen Amsterdam aus verkehrt einmal wöchentlich ein Ganzzug der Cargill GmbH Schokoladen zum Westhafen. Der Containerzug befördert Kakaobohnen an den Berliner Standort in Reinickendorf. Im Westhafen werden die Kakaobohnen umgeschlagen und in Nachlauf mit dem LKW in das Werk geliefert.

#### Betriebsszenario 3 „KARSTADT- Zug“

Zur Belieferung seiner Filialen in Berlin setzt Karstadt auf den Transport von Wechselbrücken mit der Bahn. Vom Logistikzentrum in Unna aus fährt drei Mal wöchentlich ein Ganzzug (betrieben durch die DHL) zum Westhafen. Die Wechselbrücken werden umgeschlagen und weiter durch Rhenus gehandelt. Die Artikel in den Wechselbehältern sind in der Regel sortenrein bzw. vorkommissioniert geladen. Per Cross-Docking werden die entsprechenden

#### Gefördert durch:



Artikel für die einzelnen Filialen auf Rollencontainern zusammengestellt. Der Weitertransport der Wechselbrücken erfolgt durch unterschiedliche LKW-Typen – 18t, Sattelzug, Hängerzug – zu den Karstadt-Filialen im Berliner Stadtgebiet.

Aus den beschriebenen Szenarien ergeben sich folgende Mindestanforderungen an das zu beschaffende Fahrzeug:

- Die Batteriekapazität muss eine Reichweite von mindestens 20 km gewährleisten, um einen vollen Umlauf zu ermöglichen
- Die zulässige Nutzlast liegt bei mindestens 12t (für das Szenario „Karstadt-Zug“), bzw. 27t für das Szenario „Kaffee-Zug“, um den Transport von Wechselbrücken oder Containern im Nachlauf des kombinierten Verkehrs zu ermöglichen.
- Eine Hydraulikpumpe, ein Hydraulikbehälter und ein entsprechender Anschluss für den Betrieb eines Kippaufliegers müssen mitgeführt und eingesetzt werden können. Die Pumpe muss dabei von der Zugmaschine mit Energie versorgt werden können.
- Da die BEHALA als Operateur in der Lage sein muss das Fahrzeug kurzfristig für andere Aufträge zu disponieren, muss es ohne Einschränkungen für den Straßenverkehr zugelassen sein. Die Alternative, etwa einer Sondergenehmigung für den Werksverkehr, entfällt.

## 6.2 Nicht- funktionale Anforderungen

Die Beschreibung der nicht-funktionalen Anforderungen an das Fahrzeug wird anhand des FURPS-Modells erläutert.

### Zweckmäßigkeit:

Der E-LKW soll wie der konventionell getriebene LKW eingesetzt werden. Alle bisherigen Prozesse müssen beherrscht werden. Im Hinblick auf den täglichen Einsatz soll er ohne Einschränkungen in die aktuellen Geschäfts- und Logistikprozesse der BEHALA eingebunden werden können.

### Benutzbarkeit:

Das Fahrzeug muss einfach und problemlos von den Mitarbeitern eingesetzt werden können. Nach einer entsprechenden Einweisung durch den Hersteller sollen die Logistik-Mitarbeiter die Technik beherrschen können.

### Zuverlässigkeit:

Das Fahrzeug soll einen möglichst störungsfreien Betrieb gewährleisten. Die vorhandene Batteriekapazität bietet eine möglichst konstante Leistung, um eine gewisse Planbarkeit und Vorhersehbarkeit der Prozesse zu sichern (Stichwort: vorhandene Reichweite).

### **Gefördert durch:**



**Effizienz:**

Die verwendeten Fahrzeug-Akkus müssen innerhalb von max. 8 Stunden wieder vollgeladen werden können.

**Wartbarkeit:**

Die Wartungszyklen sollen nach Möglichkeit, die der derzeitigen Fahrzeuge entsprechen. Idealerweise sinkt der Wartungs- und Reparaturaufwand. Ein erhöhter Verschleiß der Räder ist zu vermeiden.

## 7. Technologiebewertung für den Güterverkehr

Der wesentliche Vorteil des Einsatzes einer Brennstoffzelle, als Erweiterung im elektrisch angetriebenen Güterverkehr, liegt in der erhöhten Flexibilität. Einerseits vergrößern sich die Einsatzdauer des Elektro-LKW, und damit auch der Aktionsradius, andererseits ist das Fahren sowohl mit als auch ohne Range Extender möglich. Dies hat zur Folge, dass sich auch die Lebensdauer der Batterien verlängert, da die mittlere DOD (Depth of Discharge; Entladungstiefe) besser in Richtung des optimalen Ladezeitpunktes gesteuert werden kann. Außerdem wird durch die Kombination aus Akku und Brennstoffzelle der lokal emissionsfreie Betrieb beibehalten und es entsteht lediglich ein niedriger Geräuschpegel.

Aufgrund der niedrigen Betriebstemperatur einer NT-PEFC kann die Aufwärmzeit des Brennstoffes sehr kurz gehalten werden, was eine gute Schnellstartfähigkeit bewirkt.

Ein Vorteil der Wasserstoff-Brennstoffzelle ggü. dem reinen Batteriesystem besteht im schnellen Nachtanken des Wasserstoffs. Bei Bussen mit Brennstoffzellensystemen werden Auftankzeiten von 7-10 Minuten (bei einer Speicherkapazität von etwa 35 kg H<sub>2</sub>) erreicht, die Aufladung einer Batterie kann in Abhängigkeit der DOD mehrere Stunden andauern. Verglichen mit Auftankzeiten von Dieselfahrzeugen (ca. 3 Minuten) besteht jedoch noch immer Nachholbedarf.

Herausforderungen bestehen weiterhin hinsichtlich der Haltbarkeit der Brennstoffzellen. Unter realen Testbedingungen werden für LKW mit Brennstoffzellenantrieb Betriebszeiten von 2.500 Betriebsstunden erreicht, was verglichen mit Antrieben mit internem Verbrennungsmotor noch einen deutlichen Entwicklungsrückstand darstellt.

Speziell für den Güterverkehr relevant ist die Gestaltung der Speicherung des Wasserstoffs. Durch das zusätzliche Gewicht am Fahrzeug müssen Einbußen hinsichtlich der Nutzlast in Kauf genommen werden, deren Höhe stark von der Speichertechnologie und -dimensionierung abhängig ist. Für die Speicherung ist es prinzipiell denkbar, den Wasserstoff im flüssigen oder gasförmigen Zustand sowie in Form von physikalischer oder chemischer Adsorption zu lagern. Flüssiger Wasserstoff muss jedoch bei einer Temperatur von -253 °C gelagert werden, was neben Verdunstungseffekten

**Gefördert durch:**

zu einem Sicherheitsrisiko im Falle eines Druckanstiegs im Behälter führen kann. Für mobile Applikationen eignet sich deshalb eher der Einsatz von komprimiertem, gasförmigem Wasserstoff, der den verlustfreien Betrieb ermöglicht. Die volumetrische Speicherdichte beträgt bei einer Komprimierung auf 700 bar etwa 23 kg/m<sup>3</sup>. Zur Gewichtsreduzierung der Tankbehälter befinden sich karbonverstärkte Stahlbehälter und Aluminiumbehälter in der Entwicklung.<sup>9</sup>

Ein wesentlicher Betrachtungspunkt bei der Bewertung der Null-Emissionstechnologien ist die Energiedichte der Systeme. Unterschieden werden muss hier hinsichtlich der volumetrischen Energiedichte und der gravimetrischen Energiedichte. Erstere bezeichnet die gespeicherte Energiemenge pro Volumen (z.B. in MJ/l) und beschränkt bei einem Elektrofahrzeug die mitführbare Energiemenge für einen gegebenen maximalen Platzbedarf der Batterien. Gasförmige Brennstoffe erreichen einen wesentlich geringeren Wert als feste und flüssige Brennstoffe. Bei der gravimetrischen Energiedichte (z.B. in J/kg) hingegen erreichen gasförmige Brennstoffe sehr hohe Werte, die jedoch unter Einbezug der Masse des Behälters (bspw. einer Druckgasflasche) wesentlich beeinflusst werden können.

Darüber hinaus kann für den Vergleich von Batterien und Brennstoffzellen die gravimetrische Leistungsdichte als Bemessungsgröße verwendet werden. Sie gibt Aufschluss über die Leistung pro Masseneinheit und wird bspw. in W/kg angegeben. Die Leistungsdichte kann als Maß dienen, wie schnell die Energie wieder entnommen werden kann.

Energieträger/ Antriebssystem	Li- Eisenphosphat- Batterie	Brennstoffzelle (H <sub>2</sub> 700 bar)	Dieselmotor
Volumetrische Energiedichte	0,14-0,3 kWh/l	1,9 kWh/l	10,8 kWh/l
Gravimetrische Energiedichte	0,09-0,11 kWh/kg	33,3 kWh/kg mit Tank:0,4 kWh/kg	12,6 kWh/kg
Gravimetrische Leistungsdichte	0,6-1,5 kW/kg	0,8-1,6 kW/kg	ca. 60 kW/kg <sup>10</sup>

Tabelle 3: Antriebsartenvergleich - Energiedichte

Speziell die gravimetrische Energiedichte von Lithium-Batterien und Brennstoffzellen kann mit jener von Dieselmotoren nicht mithalten. So ist beispielsweise in 10 Litern Diesel ungefähr eine Energiemenge gespeichert, die einer Lithium-Ionen-Batterie von einer Tonne Gesamtgewicht entspricht. Eine Teilkompensation dieses immensen Unterschiedes findet durch den höheren Wirkungsgrad von Elektrofahrzeugen statt. In Abhängigkeit der zugrunde gelegten Energien (fossil/regenerativ) zur Erzeugung des elektrischen Stroms kann ein Elektrofahrzeug einen Well-to-wheel-

<sup>9</sup> Vgl. CE Delft, DLR (2013): Zero emissions trucks

<sup>10</sup> Vgl. [http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2011/5845/pdf/Mock\\_Peter\\_101130.pdf](http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2011/5845/pdf/Mock_Peter_101130.pdf)

**Gefördert durch:**



Wirkungsgrad erreichen, der um das Drei- bis Vierfache über dem eines Dieselfahrzeuges liegt.<sup>11</sup>

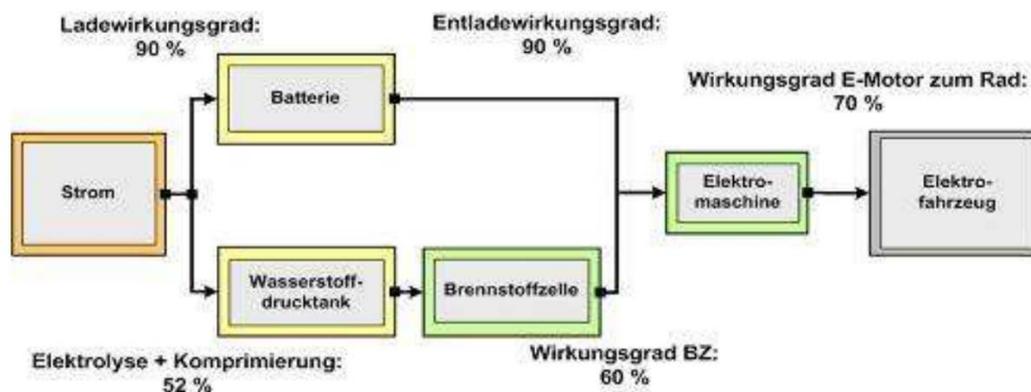


Abbildung 8: Wirkungsgrad Batterie- elektrisches und Brennstoffzellen- Fahrzeug  
(Bildquelle: FH Landshut)

Der Energie wird aus der Batterie mit einem Wirkungsgrad von etwa 63 % in Antriebsenergie gewandelt. Nimmt man die Verluste aus dem Laden der Batterie hinzu, erreicht man einen Gesamtwirkungsgrad von 57 %. Beim Brennstoffzellenfahrzeug muss zusätzlich zu den Verlusten beim Betrieb der Brennstoffzelle die Bereitstellung und Komprimierung des Wasserstoffs in die Bilanzierung einfließen. Der Gesamtwirkungsgrad weist somit lediglich 22 % auf.

Ein weiteres Bewertungskriterium ist die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Antriebssysteme, die gravierende Unterschiede bereithält. Während im Falle des Elektroantriebes (mit und ohne H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle) keine lokalen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verzeichnen sind und die Tank-to-wheel-Bilanz somit Null aufweist, muss hinsichtlich der Well-to-tank-Betrachtung deutlich differenziert werden. Bei der Produktion bzw. Umwandlung der Primärenergieträger in den Energieträger, der im Fahrzeug verwendet wird, fallen Emissionen an. Im europäischen Verbrauchszyklus (NEDC) und unter Verwendung des europäischen Strommixes zur Bereitstellung des Wasserstoffes liegen diese (in Abhängigkeit des H<sub>2</sub>-Speichermediums) nur knapp unter oder gar über den Emissionen des konventionellen Antriebs.<sup>12</sup>

<sup>11</sup>Vgl.

<http://www.jdzb.de/fileadmin/Redaktion/PDF/veroeffentlichungen/tagungsbaende/D63/18%20p1409%20peters.pdf>

<sup>12</sup> Referenzfahrzeug ist ein Fahrzeug der Kompaktklasse. Vgl. <https://people.fh-landshut.de/~fprexle/pdf/alternative%20antriebe/allgemein/Antriebstechnologien.pdf>

**Gefördert durch:**

CO <sub>2</sub> - Emissionen im NEDC [g/km]	E- Fahrzeug (Li-Ionen- Batterie) EU- Strommix	BZ- Hybrid (H <sub>2</sub> gasförmig) EU- Strommix	Dieselmotor
Well-to-tank	70	174	29
Tank-to-wheel	0	0	135
<b>Well- to- wheel</b>	<b>70</b>	<b>174</b>	<b>164</b>

Tabelle 4: Antriebsartenvergleich - Emissionen

Möglichkeiten zur Verbesserung der Well-to-wheel-Bilanz alternativer Antriebskonzepte bestehen einerseits in der Verwendung regenerativer Energiequellen (Wind, Wasser, Sonne) und andererseits durch den Einsatz von EE-Gas.

Beim Batterie-elektrischen Fahrzeug ist die kritische Kenngröße die Reichweite. Sie hängt unmittelbar an der Kapazität der Batterien – und damit am Gewicht und Volumen der Batterien. Die Preisentwicklung gestaltet sich im Bereich von Lithium-Ionen-Akkus positiv. Wurden im Jahr 2011 noch 500 Euro pro Kilowattstunde veranschlagt, so kosten die Akkus im Januar 2014 üblicherweise lediglich rund 110 Euro pro kWh.<sup>13</sup>

Bei den Abschätzungen der Kosten für Brennstoffzellensysteme in mobilen Anwendungen ist die Bandbreite hingegen sehr groß. Dieser Umstand ist mitunter dadurch begründet, dass es sich bei den heute zu bewertenden Brennstoffzellen noch nicht um ausgereifte Technologien handelt, wodurch keine belastbaren Kostendaten bekannt sind. Darüber hinaus ist eine direkte Vergleichbarkeit zwischen rein Batterie-elektrischem und Brennstoffzellen-unterstütztem Antrieb schwierig herzustellen. Das Erreichen einer vergleichbar hohen Reichweite würde die Systemkosten für ein rein elektrisches Fahrzeug auf ein unverhältnismäßiges Volumen erhöhen. Die Kosten für ein Brennstoffzellensystem werden nach einer CONCAWE/JRC/EUCAR/WTW-Studie (2007) auf 105 Euro pro Kilowatt und die Kosten für die Druckspeicherung auf 575 Euro pro kg Wasserstoff beziffert. Das IFEU und das Öko-Institut schätzten im Jahr 2006 die Zusatzkosten eines H<sub>2</sub>-Brennstoffzellen-Stranges in einem mittelgroßen PKW auf 10.000 Euro.<sup>14</sup>

Eine Studie von Roland Berger Strategy Consultants vom Januar 2014 schätzt die Mehrkosten für die Ausrüstung mit einem Brennstoffzellensystem auf 45.000 Euro pro Fahrzeug. Die Membran-Elektroden-Einheit ist damit mit bis zu 45 % Anteil an den Gesamtkosten der größte Kostenfaktor. Begründet wird dies mit der Notwendigkeit des teuren Edelmetalls Platin als Katalysator. Ein Forschungsschwerpunkt vieler Automobilhersteller ist daher die Entwicklung nahezu platinfreier Brennstoffzellen.

<sup>13</sup> Vgl. <http://cleantechnica.com/2014/01/07/ev-battery-prices-much-lower-think/>

<sup>14</sup> Vgl. IFEU Heidelberg (2009): Wasserstoff- und Stromspeicher in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien: Analyse der kurz- und mittelfristigen Perspektive

**Gefördert durch:**

## 8. Exkurs: Beschreibung der Einsatzzeignung von Photovoltaik- Systemen in Fahrzeugen

Eine weitere Möglichkeit zur Erweiterung der Reichweite von Elektrofahrzeugen besteht in der Nutzung von Solarenergie. Dafür werden Photovoltaik-Module auf dem Dach von Fahrzeugen oder Anhängern installiert.

In der Studie „Solar in Motion“ von der Wiesbadener Technologieberatungsgesellschaft INVENSITY GmbH wurden die Anforderungen an PV-Systeme auf die unterschiedlichen Transportmittel zu Wasser, zu Luft und zu Land analysiert. Dabei wurden Nutzfahrzeugen und PKW ein ähnliches Anforderungsprofil hinsichtlich der Umweltbedingungen, des Fremdkörperschutzes und der Art der Einbindung in das Bordnetz bescheinigt. Beim Flächenpotenzial, der notwendigen Flächenbelastung und bei nahezu allen finanziellen Aspekten hingegen gibt es erhebliche Abweichungen. Speziell bei Nutzfahrzeugen spielen Ersatzkosten und Amortisierung eine wesentliche Rolle.

Auf LKW und Trailern sind starre und unbiegsame Solarmodule vorstellbar. Das Gewichtsziel der PV-Systeme ist für Nutzfahrzeuge wesentlich niedriger als bei anderen Transportmitteln. Darüber hinaus zählt im Nutzfahrzeugbereich weniger das Design sondern die Reduktion der Betriebskosten.

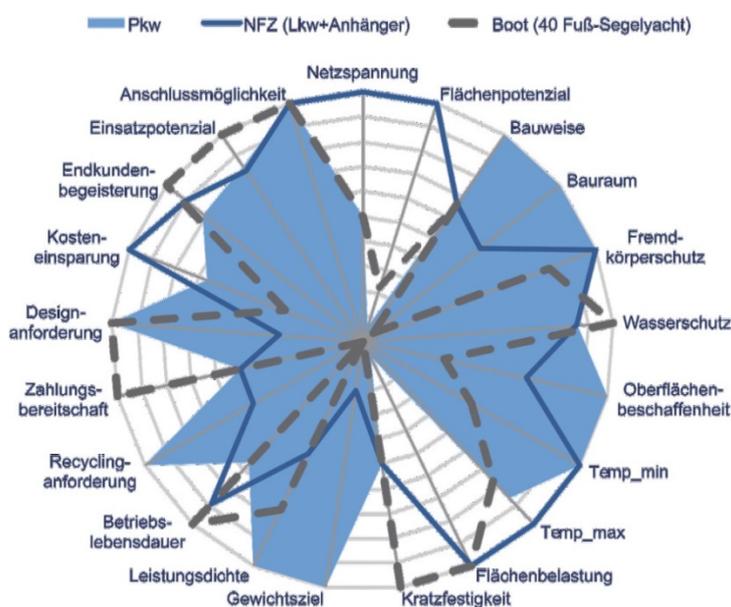


Abbildung 9: Anforderungen an PV- Module nach Transportmittel (Bildquelle: Invensity)

Allgemein wird das Potenzial für den Einsatz von PV-Systemen bei Stadtbussen und Lieferfahrzeugen hoch eingeschätzt, da das Bordnetz durch häufige Stopps und den erhöhten Einsatz von elektrischen Verbrauchern, wie elektrischen Türen, Klimaanlage oder Beleuchtung stärker belastet wird. Das höchste Potenzial sieht die Studie bei Privatbooten und Yachten, da auf

**Gefördert durch:**

offener See die ungestörte Sonneneinstrahlung und der Wunsch der Kunden nach einer autarken Energieversorgung gute Voraussetzungen darstellen.

Im Segment der Nutzfahrzeuge geht man davon aus, dass solargestützte Kühlanhänger für LKW schon in wenigen Jahren zum Standard werden können. Außerdem könnten PV-Anlagen auf den Dächern von Zugmaschinen Schlafkabinen und andere Stromverbraucher mit Energie versorgen.

Ein Praxisbeispiel für den Einsatz einer solchen PV-Anlage bietet die Schweizer Einzelhandelskette Coop. Der rein Batterie-elektrische 18-Tonner „E-Force One“, der auf dem Chassis eines Iveco Stralis basiert, hat zur Reichweitenverlängerung eine PV-Anlage auf dem Dach. Der feste Frische-Aufbau inklusive Kühlgerät wird durch die PV-Folien auf dem Dach mit Strom versorgt, wodurch die Reichweite des Elektro-LKW durch den Stromverbrauch des Kühlgerätes nicht allzu sehr verringert wird. Die zwei Batterien mit einer Kapazität von insgesamt 240 kWh können somit auch während der Fahrt aufgeladen werden.

Für den im Rahmen des Schaufensterprojektes KV-E-Chain modifizierten Elektro-LKW vom Typ Terberg YT202-EV wird der Einsatz von PV-Systemen auf dem Dach als ungeeignet angesehen. Gründe hierfür sind:

- Der Elektro-LKW wird im Rahmen von KV-E-Chain für die Distribution im Nahverkehr eingesetzt. Mit zusätzlichen Energieverbrauchern, wie bspw. einer Schlafkabine, die die PV-Module mit Strom versorgen könnten, ist das Fahrzeug nicht ausgestattet.
- Die Zugmaschine wird u.a. für die Umfuhr von Containern und Wechselbehältern im Hafengebiet eingesetzt. Sie verfügt demnach nicht über einen festen, mit dem Chassis verbundenen Aufbau. Das Flächenpotenzial beschränkt sich aufgrund der Charakteristik der Transportkette somit auf die Zugmaschine.
- Für die Distribution werden z.T. Sattelkipper eingesetzt, die lediglich über eine Rollplane zum Regenschutz verfügen. Die Installation eines PV-Systems würde sich demzufolge sehr kompliziert gestalten.

**Gefördert durch:**

