



# Brennstoffzellensysteme in der E-Mobilität

Normungslandschaft, Patentsituation  
und Kostenanalyse

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**DKE**

**POLARIX**~~X~~PARTNER

## **Brennstoffzellensysteme in der E-Mobilität**

Normungslandschaft, Patentsituation und Kostenanalyse

### **Initiatoren:**

#### **VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.**

Der VDE, eine der größten Technologie-Organisationen Europas, steht seit mehr als 125 Jahren für Innovation und technologischen Fortschritt. Als einzige Organisation weltweit vereint der VDE dabei Wissenschaft, Standardisierung, Prüfung, Zertifizierung und Anwendungsberatung unter einem Dach. Das VDE Zeichen gilt seit mehr als 100 Jahren als Synonym für höchste Sicherheitsstandards und Verbraucherschutz. Wir setzen uns ein für die Forschungs- und Nachwuchsförderung und für das lebenslange Lernen mit Weiterbildungsangeboten „on the job“. Im VDE Netzwerk engagieren sich über 2.000 Mitarbeiter\*innen an über 60 Standorten weltweit, mehr als 100.000 ehrenamtliche Expert\*innen und rund 1.500 Unternehmen gestalten im Netzwerk VDE eine lebenswerte Zukunft: vernetzt, digital, elektrisch. Wir gestalten die e-diale Zukunft.

#### **DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik**

Die vom VDE getragene DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (DKE) ist die Plattform für rund 9.000 Expert\*innen aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung zur Erarbeitung von Normen, Standards und Sicherheitsbestimmungen für die Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik. Normen unterstützen den weltweiten Handel und dienen u. a. der Sicherheit, Interoperabilität und Funktionalität von Produkten und Anlagen. Als Kompetenzzentrum für elektrotechnische Normung vertritt die DKE die Interessen der deutschen Wirtschaft in europäischen (CENELEC, ETSI) und internationalen Normenorganisationen (IEC). Darüber hinaus erbringt die DKE umfangreiche Dienstleistungen rund um die Normung und das VDE Vorschriftenwerk.

#### **Polarixpartner**

POLARIXPARTNER ist eine führende Managementberatung im Wert- und Kostenmanagement für die fertigende Industrie. Als langjährige Industrie-Insider unterstützt POLARIXPARTNER namhafte Unternehmen der Branchen Automotive, Aerospace, Medizintechnik & Pharmazie sowie Maschinenbau & Energie in allen Fragen der Optimierung der Wertschöpfungskette mit einem ganzheitlichen Ansatz und einer umsetzungsorientierten Philosophie.

### **Herausgeber:**

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.  
Merianstraße 28  
63069 Offenbach  
www.vde.com

Gefördert durch BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz)  
im Rahmen des Verbundprojektes ELSTA („Förderung der Elektromobilität durch  
Normung und Standardisierung“)

### **Autor/-innen:**

VDE: Andrea Appel, Dennis Heusser, Dr. Ralf Petri

DKE: Gürkan Balcioglu, Dr. David Urmann, Marko Kesic

Polarixpartner: Thomas Franz, Dr. Maik Kraus, Dr. Alwin Nagel, Dr. Daniel Wothe

### **Design:**

prinzdesign Berlin, Marc Prinz und Maren Maiwald

### **Titelbild:**

© EZPS /stock.adobe.com

Mai 2022

# Inhaltsverzeichnis

1.	<b>Einführung</b>	4
2.	<b>Zentrale Erkenntnisse</b>	5
3.	<b>Studiendesign</b>	6
4.	<b>Die Brennstoffzelle</b>	7
5.	<b>Patentanalyse und Standardisierungspotentiale</b>	9
6.	<b>Regelwerk- und Normungsanalyse</b>	10
7.	<b>Expert/-innen Befragung</b>	12
8.	<b>Kostenanalyse</b>	14
9.	<b>Handlungsempfehlungen</b>	16
10.	<b>Literatur- und Abbildungsverzeichnis</b>	17
11.	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	18
	<b>Kontakt</b>	19

# 1. Einführung

Wasserstoff beziehungsweise die Brennstoffzelle in automobilen Anwendungen wird künftig notwendig sein, um die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen weiter zu reduzieren. Neue Technologien sind jedoch kostspielig in der Einführung und gerade zu Beginn in der Regel wenig standardisiert. Es gilt, Stärken und Schwächen der Brennstoffzelle zu untersuchen und Kosteneinsparungspotentiale zu identifizieren. Durch Patent-, Regelwerk- und Normungs-Analysen werden die relevanten Bereiche identifiziert, in denen Standardisierung zu Einsparungen bei System- und Entwicklungskosten führen kann. Die vorliegende Studie widmet sich dieser Fragestellung und überprüft, wie durch Normen und Standards Kosteneinsparungspotentiale der Brennstoffzelle in automobilen Anwendungen erzielt werden können.

## Anlass und Hintergrund

Wasserstoff ist eine häufig diskutierte Technologie und bietet viele Anwendungsmöglichkeiten, beispielsweise beim Einsatz in automobilen Anwendungen. Hierfür kann die Brennstoffzelle als eine effiziente Art, den Wasserstoff in Strom für den elektrischen Antrieb umzuwandeln, eingesetzt werden.

Hierbei stellen sich auch einige Hürden und Fragestellungen entlang der gesamten Wasserstoffwertschöpfungskette von der Erzeugung über den Transport bis hin zur Speicherung von Wasserstoff. Die wichtigsten Punkte dabei sind: Langfristige Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit.

Der VDE widmet sich diesen gesellschaftspolitischen Themen als neutrale Plattform und bringt Expert/-innen aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft zusammen. Gemeinsam werden Lösungen in Form von Studien erarbeitet, die beispielsweise verschiedene Antriebstechnologien miteinander vergleichen, um die Ergebnisse dann der Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen und in einen offenen Dialog zu treten.

Bisher wurden zu Antriebstechnologien unter anderem folgende Studien veröffentlicht:

- Im Januar 2022 haben die Fachgesellschaften von VDE ETG und VDI GEU in ihrer Studie zum Thema „Klimafreundliche Nutzfahrzeuge: Vergleich unterschiedlicher Technologiepfade für CO<sub>2</sub>-neutrale und -freie Antriebe“ die Technologien umfassend miteinander verglichen.
- Im April 2021 hat VDE Mobility die Studie „Antriebsportfolio der Zukunft. Ein Meinungsführer/-innen Report aus Politik und Wirtschaft“ veröffentlicht. Für diese Studie wurden Meinungsführer/-innen zu Ihren Einschätzungen, Erwartungen und Vorstellungen zum Antriebsportfolio der Zukunft 2030+ befragt.

Das Fazit aus der Antriebsportfolio Studie lautet: Nur mit einem intelligenten Mix aller verfügbaren klimaneutralen Antriebstechnologien kann das Ziel „Zero Emission“ erreicht werden. Je nach Anwendungsfall werden sowohl Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb im Pkw-Bereich als auch Brennstoffzellenfahrzeuge im Schwerlast- und Langstreckengüterverkehr im Antriebsportfolio 2030+ ihren Anteil haben. Dazu kommen E-Fuels, die in der Handhabung sehr einfach sind, in der bestehenden Infrastruktur und herkömmlichen Verbrennungsmotoren unkompliziert eingespeist und für beispielsweise historische Fahrzeuge („Oldtimer“) oder Motorsportwagen genutzt werden können. Ausschlaggebend, auch aufgrund aktueller Entwicklungen, ist dabei der Effizienzgrad, jeweils gemessen am Primärenergiebedarf. Die Ergebnisse dieser Studie regten dazu an, die Brennstoffzelle in automobilen Anwendungen (Brennstoffzellenantrieb) genauer zu analysieren.

Daher widmet sich die vorliegende Studie anschließenden Fragestellungen, wie durch Normen und Standards Kosteneinsparungspotentiale erzielt werden können, um der Technologie zur Fertigung höherer Stückzahlen beziehungsweise zur Marktreife zu verhelfen. Die Annahme dabei ist, dass keine großen Technologiesprünge bei der Brennstoffzelle mehr zu erwarten sind, da sie heute Stand der Technik sind und stetig weiterentwickelt werden. Daher ist der entscheidende Ansatzpunkt, vorhandene Kostensenkungspotentiale zu identifizieren.

Gleichzeitig dient die Studie zur Identifizierung von Normungslücken bei Brennstoffzellen in automobilen Anwendungen. In vielen wichtigen Märkten, wie beispielsweise dem EU-Binnenmarkt oder auch dem chinesischen Markt, sind Normen ein politisch anerkanntes Instrument der Wirtschaft, um gesetzlich verankerte Sicherheitsziele zu konkretisieren. Für Unternehmen stellt die Beteiligung an der Normenerstellung einen wichtigen Hebel zur Einflussnahme auf die wirtschaftliche Entwicklung dar. Dies stellt auch eine Chance für den Wirtschaftsstandort Deutschland dar, um bei der Brennstoffzellentechnologie eine führende Position einzunehmen.

## 2. Zentrale Erkenntnisse

Für den Wirtschaftsstandort Deutschland bestehen Chancen im Aufbau und der Entwicklung von Fachwissen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Wasserstoff. Dafür gilt es vorhandene Normungslücken zu schließen, um den Einsatz der Brennstoffzelle in automobilen Anwendungen – beispielsweise beim Zusammenspiel einzelner Komponenten und standardisierten Schnittstellen – zu ermöglichen. Dadurch können Einsparungen bei den Systemkosten von 3 bis 5 % und bei den Entwicklungskosten von rund 6 % pro Fahrzeug bis zum Jahr 2025 erzielt werden.

„Entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Wasserstoff bieten sich viele Chancen für die deutsche Industrie. Vor allem kleine und mittelständische Unternehmen (KMUs) nehmen hierbei eine Schlüsselrolle ein.“

Die hohe Innovationskraft der deutschen Wirtschaft basiert auf dem starken Engagement in Forschung und Entwicklung sowie der engen Verzahnung von Wissenschaft und Wirtschaft in gemeinsam Forschungsvorhaben und Förderprojekten. Nur wenn es gelingt, diese Netzwerke auch im Bereich der Brennstoffzellentechnologie (weiter) zu entwickeln, kann die führende Rolle der deutschen (Automobil-)Industrie aufrechterhalten werden. Neben dem technologischen Fachwissen braucht es zudem hochmoderne Produktions- und Fertigungsanlagen, um Kosteneinsparungspotentiale zu erschließen.

„Während die Produktion aktuell primär in Ländern außerhalb Europas stattfindet, gilt es die Subsysteme und deren Schnittstellen entsprechend weiterzuentwickeln, wofür ein Ausbau sowie die Umsetzung relevanter Förderprogramme notwendig ist.“

Um die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie wettbewerbsfähig zu gestalten, werden weitere Anreize und Planungssicherheit von den Expert/-innen gewünscht. Auch ist eine gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsoffensive von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft notwendig, um den Vorsprung anderer Länder bei der Brennstoffzellenproduktion aufzuholen.

„Es gilt jetzt Fachwissen rund um die Wasserstofftechnologie aufzubauen und zu sichern, um Exportpotentiale zu erschließen und den Wirtschaftsstandort Deutschland im internationalen Wettbewerb zu behaupten.“

Die Generierung von Fachwissen entlang der gesamten Wertschöpfungskette bezieht auch die Anwendung der Brennstoffzellentechnologie sowie aller relevanten Subsysteme mit ein.

„Für eine erfolgreiche Marktaktivierung braucht es klare Regeln sowie Normen und Standards, die für ein gemeinsames Verständnis von Sicherheitsaspekten, Infrastruktur, Subsystemen und Schnittstellen der Brennstoffzelle sorgen. Erst durch eindeutige Anforderungen werden schnelle Genehmigungsverfahren möglich. Darin liegt eine Chance für den Wirtschaftsstandort Deutschland.“

Normen und Standards können frühzeitig dabei helfen Forschungs- und Entwicklungsprozesse zu optimieren und Kosteneinsparungen für beispielsweise Produzenten und Lieferanten zu erzielen. Etwaige Normungslücken gilt es zu schließen, um dadurch klare und schnelle Genehmigungsprozesse sowie Prüfungen und Zertifizierungen zu bewerkstelligen.

„Die Normungslücke offenbart ein vorhandenes Kosteneinsparungspotential. Wenn es einen Orientierungsrahmen durch eine neue Norm gibt, lassen sich Ausgaben für Forschung und Entwicklung gezielter einsetzen und ermöglichen so eine breite Anwendung – was auch zur Serienfertigung der Brennstoffzelle in automobilen Anwendungen beitragen kann.“

Der Fokus der Normung sollte jetzt auf den Schnittstellen zwischen Brennstoffzellen, Batterie und Elektromotor liegen, vor allem die Einbindung und Anforderungen der Subsysteme zur Versorgung des *Brennstoffzellenstacks* und der Elektrik. Das Zusammenspiel einzelner Komponenten muss dabei optimal aufeinander abgestimmt sein. Optimierungsansätze sind das simultane Tanken von Wasserstoff sowie das Laden der Batterie. Letzteres ist ein noch nicht betrachtetes Feld in der Normungslandschaft, was es zu berücksichtigen gilt. Denn der technologische Fokus könnte darauf ausgerichtet werden, dass die Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen künftig in die Richtung von Plug-in Hybridfahrzeugen geht.

# 3. Studiendesign

Wasserstoff ist ein wichtiger Baustein der Energiewende und könnte seinen Weg hin zum Einsatz in automobilen Anwendungen beschleunigen, wenn offene Fragen hinsichtlich Sicherheit und technologischer Weiterentwicklungen beantwortet werden können. Für diese Studie wurden daher Analysen von Patenten, Regelwerken und Normen durchgeführt. Zusätzlich wurden Expert/-innen befragt, um die gewonnenen Erkenntnisse mit praktischen Einschätzungen abzugleichen. Eine Analyse hinsichtlich vorhandener Kosteneinsparungspotenziale rundet die Studie ab.

## Hintergrund

Die Studie wurde im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts ELSTA<sup>1</sup> („Förderung der Elektromobilität durch Normung und Standardisierung“) erstellt und wird vom BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) gefördert. In diesem Projekt werden übergreifende, koordinierende Maßnahmen und Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt und gezielte Unterstützung für die deutsche Wirtschaft beziehungsweise Forschungseinrichtungen beim Setzen von Normen und Standards geleistet.

Beteiligte Projektpartner sind das Deutsche Institut für Normung e. V. (DIN), der Normungsausschuss im Verband der Automobilhersteller (VDA-NA Automobil) sowie die Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik.

Im Rahmen eines Unterarbeitspaketes wurde diese Studie von DKE gemeinsam mit der Managementberatung POLARIXPARTNER GmbH erarbeitet. Die Projektarbeit von DKE umfasste die Projektleitung und -koordination sowie die Dokumentation, Zusammenfassung und Veröffentlichung der Ergebnisse.

## Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Studie ist es, den Einfluss von Normen und Standards in Bezug auf die Brennstoffzellen in automobilen Anwendungen aufzuzeigen, indem das Einsparungspotential hinsichtlich Entwicklungs- und Fertigungskosten bestimmt wird. Dies stellt eine notwendige Bedingung für eine weitere Skalierung hin zur Produktion höherer Stückzahlen (Serienfertigung) dar. Im weiteren Studienverlauf wird die Brennstoffzelle unter anderem auch im Zusammenspiel mit der Batterie (Pufferbatterie) betrachtet, um etwaige Normungslücken ausfindig zu machen.

Diese Studie und der damit angestoßene Dialog sollen für ein gemeinsames Verständnis zwischen interessierter Fachöffentlichkeit, Normungs-Expert/-innen sowie Vertreter/-innen der Industrie, Wissenschaft, Forschung und Politik sorgen. Das Einbringen der Studienergebnisse in den weiteren Dialogprozess der (Fach-) Öffentlichkeit sowie das Aufgreifen der Erkenntnisse in den Normungsgremien, wird die Entwicklung und Akzeptanz der Brennstoffzellentechnologie allgemein weiter fördern.

Der Bedarf an Dialogformaten mit der (Fach-) Öffentlichkeit war auch ein Fazit der Antriebsportfolio-Studie. Durch die Patent-, Regelwerk-, Normungs- sowie Kostenanalysen können mögliche Potentiale identifiziert und erste Lösungswege aufgezeigt werden.

## Methodik

Die Studie wurde zwischen Juli 2021 und April 2022 erstellt. Im Kick-off-Treffen wurde das weitere Vorgehen besprochen und die Schwerpunkte anhand von fünf Arbeitspaketen gemeinsam festgelegt. Darauf folgte eine Patentanalyse der Jahre 1985 bis 2020. Hierzu wurden registrierte Patentanmeldungen im Kontext der Brennstoffzellentechnologie nach Produktfamilien im internationalen Vergleich gesichtet und ausgewertet.

In einem zweiten Schritt wurde eine Analyse des Status Quo von Normung und Standardisierung im Bereich der Brennstoffzelle in automobilen Anwendungen im Straßenverkehr sowie im Bereich der internationalen Regelsetzung mit Fokus auf den Fahrzeugklassen<sup>2</sup> (M1, N1 nachgelagert M2, M3, N2, N3 – im weiteren Verlauf M und N) durchgeführt.

Diese Ergebnisse wurden in einem ersten Whitepaper veröffentlicht und damit Interviewpartner/-innen aus Industrie, Forschung und Wissenschaft für virtuelle Gesprächsformate angeschrieben und gewonnen. Das Whitepaper diente dabei als Diskussionsgrundlage. Weitere Fragestellungen in den Interviews waren allgemeine Sichtweisen, Chancen und Hürden, Normungslücken und -potentiale sowie künftige Erwartungen an die Brennstoffzellentechnologie.

In einem vierten Schritt wurde eine detaillierte Kostenanalyse durchgeführt, um die Stückkosten der Brennstoffzellenbestandteile, der Batterie sowie weiterer wichtiger Komponenten und Subsysteme zu bestimmen. Abschließend wurden die Ergebnisse konsolidiert und zusammengeführt.

# 4. Die Brennstoffzelle

Eine technische Analyse der Brennstoffzelle gibt Aufschluss darüber, wie die Brennstoffzelle aufgebaut ist, welche Subsysteme sie umfasst und welche technologischen Potentiale in Bezug auf ihre technologische Weiterentwicklung noch vorhanden sind. Hierbei relevant sind vor allem der *Stack*, ein Stapel aus Brennstoffzellen, und die Mono- oder Bipolarplatten, welche die einzelnen Zellen in einem Stack abgrenzen beziehungsweise voneinander trennen.

## Eigenschaften und Funktionsweise der PEM-Brennstoffzelle

Eine einzelne PEM-(Polymerelektrolyt) Brennstoffzelle besteht im Wesentlichen aus einer dünnen Polymermembran, welche auf jeweils beiden Seiten mit einer katalytisch aktiven Elektrode beschichtet ist, typischerweise eine Mischung aus Kohlenstoff und Platin, und von Platten gasdicht eingfasst wird. Für eine möglichst homogene Verteilung der Reaktanten wird jeweils zwischen einer Elektrode und einer Platte eine Gasdiffusionsschicht (*GDL, Gas Diffusion Layer*) aus einem widerstandsfähigen, porösen Material eingefügt.

Die chemische Reaktion findet an den katalytisch aktiven Elektroden (das heißt der Anode beziehungsweise Kathode) statt. Die Anode wird mit Wasserstoffgas umspült und nimmt die Elektronen aus der Oxidation des Wasserstoffs auf. Die Kathode wird mit Luft umspült, wobei der enthaltene Sauerstoff unter Aufnahme von Elektronen zu Oxidionen reduziert wird. Zwischen Anode und Kathode baut sich eine elektrische Spannung auf, die abgegriffen und einem Verbraucher zugeführt werden kann (Abbildung 1).

Die Polymermembran ist aus einem semipermeablen, protonenleitfähigen Material gefertigt, beispielsweise aus Nafion. Die Membran wirkt als Elektrolyt, indem sie die Diffusion von Protonen (das heißt den Wasserstoffatomen, die ihr Elektron abgegeben haben, beziehungsweise oxidiert wurden) von der Anoden- zur Kathodenseiten ermöglicht, wodurch der Stromkreis geschlossen wird.

Auf der Kathodenseite angekommen reagieren die Protonen mit den dort entstehenden Oxidionen (das heißt den Sauerstoffatomen, die Elektronen aufgenommen haben, beziehungsweise reduziert wurden) zu Wasser, welches die Brennstoffzelle über den stetigen Luftstrom an der Kathodenseite verlässt.

Die Platten, welche die Zelle nach beiden Seiten hin gasdicht abschließen, sind oftmals so ausgelegt, dass sie in ihrem Innern ein nichtleitendes Kühlmedium führen, um die freiwerdende Reaktionswärme abzuführen. Auf ihrer Oberfläche ist zudem eine feine Kanalstruktur eingearbeitet, welche das Wasserstoffgas beziehungsweise die Luft in die Gasdiffusionsschicht der Elektrodenkammer leitet. Da diese Platten nur mit jeweils einem elektrischen Pol der Brennstoffzelle in Berührung kommen, werden sie als Monopolarplatten bezeichnet.

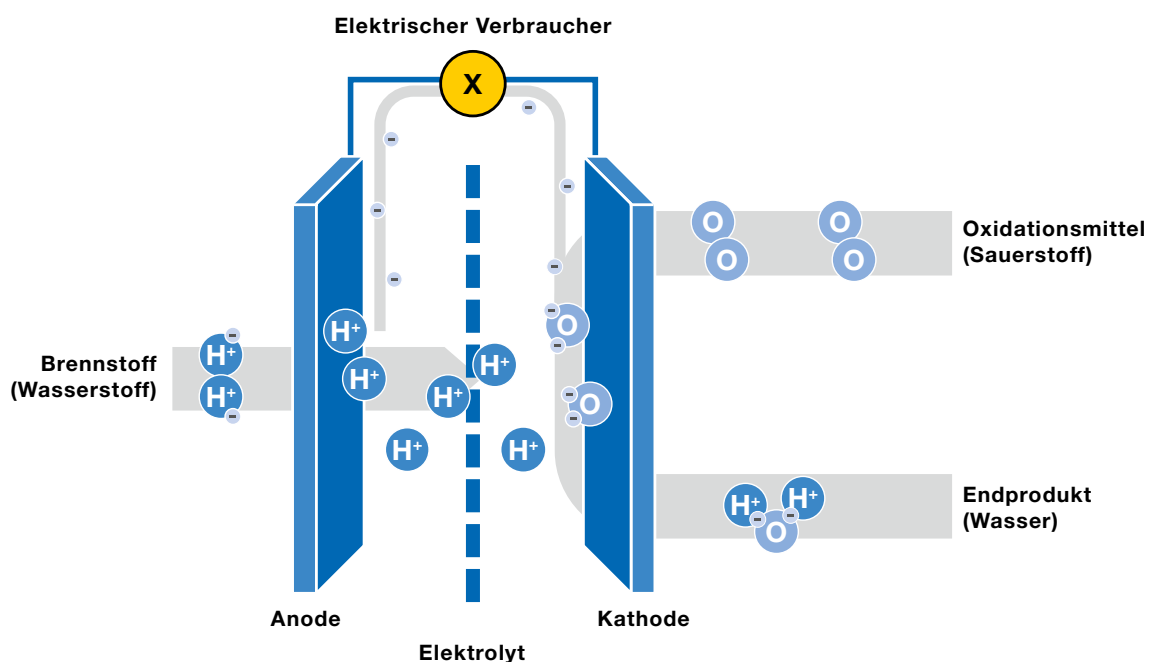


Abbildung 1: Skizze der PEM-Brennstoffzelle

In der Regel werden mehrere Zellen zu einem *Stack* (englisch für Stapel) zusammengefasst, das heißt elektrisch miteinander verschaltet, um eine höhere Ausgangsspannung beziehungsweise -stromstärke zu realisieren. Anstelle der zuvor beschriebenen Monopolarplatten kommen dabei vorwiegend so genannte Bipolarplatten zum Einsatz. Diese tragen die feine Kanalstruktur auf beiden Seiten und wirken jeweils als Abgrenzung zwischen zwei benachbarten Zellen des Stapels. Die Zahl der notwendigen Platten kann so nahezu halbiert werden, wenngleich Bipolarplatten höhere Ansprüche an die Fertigung stellen.

### Brennstoffzellenstack und Subsysteme

Damit der *Stack* einsatzfähig ist, braucht er sogenannte Subsysteme (Abbildung 2). Diese sorgen für die Wasserstoff- und Sauerstoffzufuhr (Luft), wobei das Wasserstoffsystem mit einer Dosiereinheit verbunden ist, die mit Druck aus dem Tank arbeitet.

Nicht verbrauchter Wasserstoff wird im Kreislauf über die Rezirkulationspumpe zurückgeführt und in den *Stack* befördert. Die Luft wird über ein starkes elektrisches Gebläse und Wärmetauscher zur Kühlung direkt in den *Stack* gepresst. Dieser reagiert entsprechend auf die Betätigung des Gaspedals. Beim Beschleunigen wird durch dieses Gebläse schnell Luft in den *Stack* gepresst.

Damit der *Stack* nicht überhitzt, muss die Reaktionswärme über ein Kühlsystem abgeführt werden. Hierzu gibt es entsprechende Kühlkreisläufe, die an herkömmliche Fahrzeuge mit Verbrenner angelehnt sind. Für das Zusammenspiel braucht es ein Steuergerät und einen DC-DC-Wandler, der den Zellstrom transformiert.

Bei der Ausgestaltung der semipermeablen Membran setzen die Hersteller vermehrt auf einen Ausbau der Fähigkeiten für die Massenproduktion von Mono-/Bipolarplatten aus Titan, Edelstahl oder Graphit. Der Anteil des Edelmetalls Platin, das als Katalysator eingesetzt wird, ist derzeit um circa 50 % höher als theoretisch notwendig.

Wird der Fertigungsprozess und die Alterung berücksichtigt, ist zwar ein gewisses Einsparpotenzial gegeben (Kapitel 8), wohl aber keine großen Technologiesprünge mehr. Die Membran besteht meist aus einem mehrlagigen Aufbau mit sehr dünnen Schichtdicken bis zu 1,5 µm, die gesamte Membran ist rund 10 µm dick. Weitere Entwicklungen bei der Massenproduktion könnte eine Anlehnung an die Herstellungsprozesse der bekannten *GoreTex* Membran sein.

Neue Materialien, ähnlich wie in der Batteriezellenforschung und Mikrostrukturierung können weitere Leistungssteigerungen, wie beispielweise einen erhöhten Wirkungsgrad und Kosteneinsparungen bewirken. Diese Entwicklung wird nach aktuellen Forschungsständen aber eher anhand eines evolutionären und keines disruptiven Sprungs beschrieben. Die Brennstoffzelle verursacht weder Abgase noch Lärm und ist lokal CO<sub>2</sub>-frei. Zudem ermöglicht sie eine hohe Reichweite und kurze Betankungsdauer. Allerdings zieht die längere Energiewandlungskette auch einen hohen Bedarf an Primärenergie nach sich mit höheren Umwandlungsverlusten.

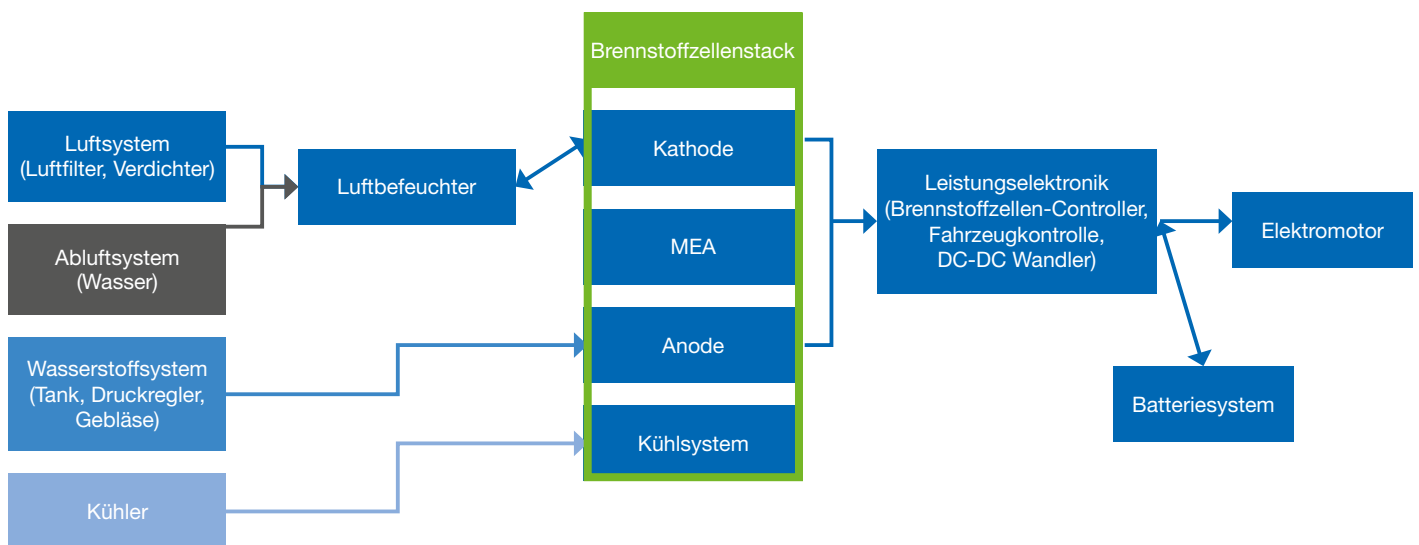


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der PEM-Brennstoffzelle und Subsysteme



# 5. Patentanalyse und Standardisierungspotentiale

Die Patentanalyse zeigt, dass Deutschland und Europa im internationalen Vergleich angemeldeter Patente hinter den USA und Asien zurückliegen. Auch wenn sich daraus nicht zwingend eine Aussage über den aktuellen Entwicklungsstand treffen lässt, da nicht jede Entwicklung zwingend auch in ein Patent fließen muss, gilt es den Anschluss zu halten und Fördermittel zu nutzen. Vorhandene Normungslücken gilt es zu schließen, unter anderem beim Zusammenspiel von Brennstoffzelle und Batterie in automobilen Anwendungen.

## Analyse der Patentsituation

Die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie hat in den letzten Jahren deutliche Fortschritte gemacht. Beim Vergleich der angemeldeten Patente zur Volltextsuche in dem elektronischen Dokumentenarchiv „Depatisnet“<sup>43</sup> des Deutschen Patent- und Markenamts (DPMA) mit dem Suchbegriffe Brennstoffzelle („Fuel Cell“) fällt allerdings auf, dass Deutschland, Europa sowie die USA im Vergleich zu Japan, Korea und China (Asien) zurückfallen (Abbildung 3). Es bleibt spannend und abzuwarten, ob bisher nicht patentierte Ansätze diesen Rückstand aufholen können.

Insgesamt haben die Patente der letzten Jahre folgende Themenschwerpunkte:

- „Membran Electrode Assembly“ (MEA) Optimierung beziehungsweise Verwendung anderer Materialien
- Reduzierung des Platin Katalysatorgehalts
- Aufbau der Nafion Membran
- „Cell Voltage Monitoring“ (CVM) Brennstoffzellenüberwachung
- Brennstoffzellenzustandsbestimmung
- Materialien und Methoden zur Fertigung von Mono-/ Bipolarplatten

Dazu könnten Mittel aus der Wasserstoff-Roadmap von der deutschen Industrie genutzt werden, um hier weiter voranzugehen. Aktuell sind geringe Stückzahlen sowie eine gewisse Zurückhaltung zu beobachten, wenngleich seit dem Jahr 2021 ein Beschleunigungsschub eingesetzt hat. Industrielle Expertise und wissenschaftliches Fachwissen gilt es weiter aufzubauen.

Dies ist gerade jetzt essenziell, um künftig nicht rein von Importen abhängig zu sein. Diese Ergebnisse decken sich auch mit denen der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM).<sup>44</sup> Die NPM macht in ihrem Whitepaper einen Nachholbedarf bei bestimmten Wertschöpfungsschritten aus, unter anderem bei Entwicklung und Produktion der Membran (MEA), sowie Forschung zur Bipolarplatte und Stackmontage.

## Zusammenspiel zwischen Brennstoffzelle und Batterie

Auch Brennstoffzellenfahrzeuge nutzen Batterien (Pufferbatterien) als Zwischenspeicher für die elektrische Energie. Sie ermöglichen unter anderem eine Rückgewinnung der Bremsenergie. Hierfür reicht meist eine Batterie mit geringer Speicherkapazität aus, wenn sie mit denen von Fahrzeugen mit rein batterieelektrischen Antrieben verglichen wird. In dem veröffentlichten Whitepaper zur Studie wurde bereits auf das Fehlen standardisierter Prozesse im Hinblick auf das Zusammenspiel zwischen Brennstoffzelle und Batterie im Gesamtsystem hingewiesen.

Bisherige Ansätze sind Individuallösungen und decken nur teilweise den aktuellen Stand der Technik ab: Je nach Größe der Batterie ergeben sich auch unterschiedliche Vorgaben an Wechselrichter, Stecker oder Kondensatoren, für die es noch einheitliche beziehungsweise übergreifende Regelwerke zu entwickeln gilt. Daraus ergeben sich Normungs- und Standardisierungspotentiale sowohl im Hinblick auf die Spannungsbereiche und Leistungsregime der jeweiligen automobilen Anwendung.

Land und Anzahl Patente / Jahre	1985 - 1990	1991 - 1995	1996 - 2000	2001 - 2005	2006 - 2010	2011 - 2015	2016 - 2020
Deutschland	0	0	7	8	17	3	3
EU (Rest)	0	0	3	11	3	7	1
USA	0	0	18	142	32	36	11
Japan	4	3	18	130	83	70	52
China	0	0	0	1	9	18	83
Korea	0	0	0	0	4	2	1

Abbildung 3: Vergleich der Patentsituation im Kontext der Brennstoffzelle (angemeldete Patente von 1985 bis 2020)

# 6. Regelwerk- und Normungsanalyse

Für die Anwendung der Brennstoffzellen in automobilen Anwendungen spielen neben verbindlichen Regelwerken auch Normen und Standards eine wichtige Rolle - letztere vor allem dadurch, dass sie die oftmals abstrakt formulierten Schutzziele der gesetzlichen Vorgaben entsprechend konkretisieren. Es ist folglich ein komplexes Zusammenspiel aus Regelwerken, Normen und Standards zu betrachten, um sämtliche relevanten Aspekte hinsichtlich der Sicherheit, Tank(-systeme), Batterie und Brennstoffzelle sowie neuer Technologietrends zu umfassen. Keine der bereitgestellten Brennstoffzellen-Normen führt die Verwendung von Brennstoffzellen in Straßenfahrzeugen in ihrem automobilen Anwendungsbereich explizit auf. Hersteller und Entwickler bedienen sich daher teilweisen Analogieschlüssen zu anderen Normen.

## Analyse der UN/ECE-Regelwerke

Für die Brennstoffzelle in automobilen Anwendungen sind vor allem die zwei Regelwerke UN/ECE-R100 und 134 relevant, die sich mit Anforderungen an den Elektroantrieb sowie allgemeinen Sicherheitsanforderungen wasserstoffbetriebener Fahrzeuge, Drucktanks und der Hochdruckperipherie auseinandersetzen – ohne jedoch explizit auf Fahrzeuge mit Brennstoffzellen einzugehen.

Die **UN/ECE-R100 „Besondere Anforderungen an den Elektroantrieb“** befasst sich primär mit batterieelektrischen Fahrzeugen und einem dazugehörigen wiederaufladbaren Energiespeichersystem (REES) und dessen Subsystem für die Fahrzeugklassen M und N. In Bezug auf die Anforderungen an ein Brennstoffzellenfahrzeug werden hinsichtlich der elektrischen Sicherheit die Berührsicherheit sowie Mindestwerte für den Isolationswiderstand festgelegt, ohne allerdings weiter auf funktionale Sicherheit einzugehen.

Dagegen befasst sich die **UN/ECE-R134 „Sicherheitsrelevanten Eigenschaften von mit Wasserstoff und Brennstoffzellen betriebenen Fahrzeugen“** detaillierter mit sicherheitsrelevanten Aspekten der Wasserstoffspeicherung in (Brennstoffzellen-)Fahrzeugen der Klassen M und N. Die drei Teile umfassen Spezifikationen für das Druckwasserstoff-Speichersystem, dessen Bauteile und das KFZ-Kraftstoffsystem.

Auch enthält sie Vorgaben an das Wasserstoff-Tanksystem und dessen Komponenten, beispielweise zur Anschlussvorrichtung, dem zulässigen Betankungsdruck, der Wasserstoff-Betankungsleitung oder Vorgaben für die Messung und Grenzwerte des Abgasstroms. Jedoch wird nicht auf Hochvolt-Sicherheitsvorgaben eingegangen. Wenn vom Antriebssystem die Rede ist, wird entweder vom Brennstoffzellenstapel oder Elektromotor gesprochen. Detaillierter wird auch nicht auf die Brennstoffzelle eingegangen - vielmehr verbleiben sie und ihre Eigenschaften als „Blackbox“.

## Zwischenfazit der Regelwerkanalyse

Eine erste Analyse ergab, dass es aktuell keine geltende UN/ECE-Regelung gibt, die sich mit einem Brennstoffzellenfahrzeug (UN/ECE-R134) der Klassen M und N sowie gleichzeitig auch einem Wasserstoff-Speichersystem in Form eines wiederaufladbaren Energiespeichersystems (REES; UN/ECE-R100) auseinandersetzt.

Vielmehr müsste es eine Ergänzung und Kombination aus beiden UN/ECE-Regelungen sein, wobei das Tanksystem (UN/ECE-R134) mit den Sicherheitsanforderungen (UN/ECE-R100) für elektrisch betriebene Fahrzeuge zusammengeführt wird. Erst dadurch könnte das Brennstoffzellenantriebssystem vollständig definiert und beschrieben werden (Abbildung 4).

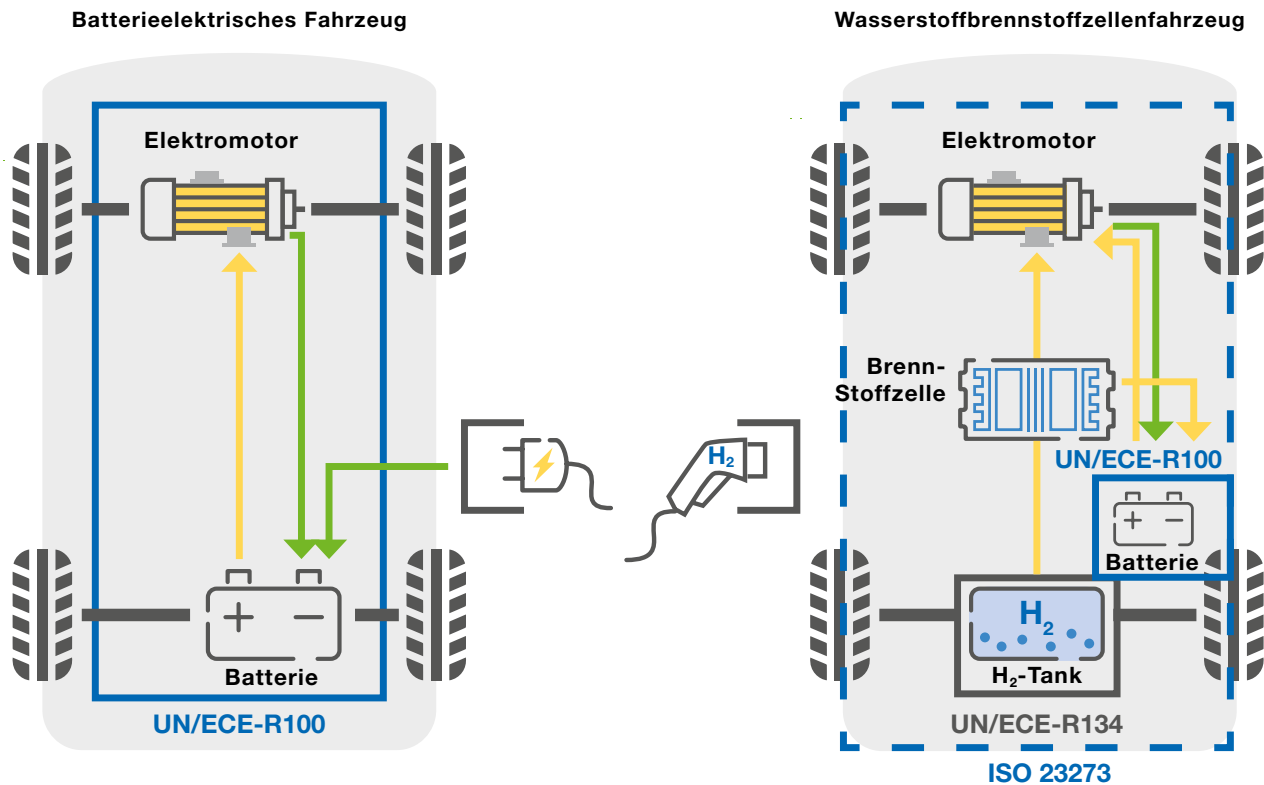


Abbildung 4: Übersicht der Geltungsbereiche der untersuchten Regelwerke und Normen

### Analyse von Normen und Standards

Damit eine Technologie Anwendung findet und schließlich auch in höher Stückzahl produziert werden kann (Serienfertigung), braucht es hinreichende gesetzliche Regelwerke sowie Normen und Standards, an denen sich beteiligte *Stakeholder* ausrichten können. Ein abgestimmtes Vorgehen aller beteiligten Akteure ist erforderlich. Ein Beispiel hierfür sind sogenannte „*Regulations, Codes and Standards (RCS)*“, die auf internationaler Ebene vereinbart werden.

Durch Normung werden materielle und immaterielle Gegenstände im Konsens vereinheitlicht. Interessierte Fachkreise wirken planmäßig und gemeinschaftlich am Prozess gemeinsam unter Einbeziehung der Öffentlichkeit mit. Eine Norm ist im Regelfall nicht verbindlich, ist eher als „Leitsatz oder Handlungsempfehlung“ zu verstehen, sofern Gesetze sie nicht vorschreiben. Relevante Informationen zur Brennstoffzelle in automobilen Anwendungen lassen sich beispielhaft in folgenden Normen finden, die sich auf spezifische Themenbereiche wie Sicherheit der Brennstoffzelle allgemein, das Tanksystem oder grundlegende Terminologien und Begriffsdefinitionen fokussieren. Dabei erwägt die Aufzählung keinesfalls Anspruch auf Vollständigkeit, bietet jedoch einen Überblick (Abbildung 5).

Relevant ist vor allem die ISO 23273, die im ISO/TC 22/SC 37 „Elektrisch angetriebene Fahrzeuge“ behandelt wird. Sie befasst sich mit Sicherheitsanforderungen für Mensch und Umwelt innerhalb und außerhalb von Brennstoffzellenfahrzeugen. Der ISO-Standard umfasst die funktionale Sicherheit im Fahrzeug, die Wasserstoffsicherheit für mit komprimiertem Wasserstoff betriebene Fahrzeuge und den Schutz von Personen vor elektrischem Schlag. Die aufgelisteten Sicherheitsanforderungen, unter anderem auch zum Hochvolt-Schutz, sind sehr detailliert in Bezug auf gasförmigen Wasserstoff. Dazu gehören Schutz vor elektrischem Schlag und Ex-Schutz für Bereiche, in denen sich durch Fehlfunktionen explosive Gemische bilden können. Beides muss in der entsprechenden Package-Konstruktion der Fahrzeuge zwingend gewährleistet sein.

## Zwischenfazit der Regelwerk- und Normungsanalyse

Die Analysen der UN/ECE-R100 und 134 offenbaren, dass es eine Mischung aus beiden Regelwerken bräuchte, um alle notwendigen Sicherheitsanforderungen für Brennstoffzellenfahrzeuge und deren Speichersysteme (Tank) zu erfassen. Am ehesten sind diese Inhalte in dem Standard ISO 23273 zu finden, der als Bindeglied zwischen den beiden Regelwerken fungiert, indem er beide Aspekte aufgreift und deren Sicherheitsanforderungen ausführt.

## Zusammenspiel Brennstoffzelle und Batterie (Pufferbatterie)

Bei der Frage nach möglichen „White-Spots“ in der Normungslandschaft beim Zusammenspiel von Batterie (Pufferbatterie) und Brennstoffzelle konnten vor allem im Bereich der Lade- und Speichertechnologien weitere mögliche Normungspotentiale ausgemacht werden.

Bei der induktiven Ladetechnologie mit ortsfesten/ dynamischen magnetischen Feldern ist die Auswirkung auf unterflurmontierte Wasserstoff-Speichertanks noch unzureichend erforscht. Die Kohlefasern des Tanks verfügen über freie Elektronen und sprechen demnach auf die extern angelegten Magnetfelder an. Daraus ergibt sich beispielsweise ein Potential für die Erstellung einer Norm oder eines Standards mit Vorgaben bezüglich der Positionierung und/ oder Abschirmung von Kohlefaser-tanks bei Nutzung induktiver Ladetechnologien.

Ein zweiter „White Spot“ liegt in dem Zusammenspiel und der Verwendung von Hochleistungsbatterien. Die Kombination aus zwei elektrochemischen Energiespeichern ist bisher noch nicht berücksichtigt worden. Daraus ergibt sich die Fragestellung, welches System in welchen Situationen die Sicherheit des Gesamtfahrzeuges sicherstellt und welche Dimensionierungen oder Größen sowohl die Hochleistungsbatteriesysteme als auch die Brennstoffzelle haben sollten.

<b>Allgemeine Normen und Standards</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ISO 23273 "Fuel cell road vehicles - Safety specifications - Protection against hydrogen hazards for vehicles fuelled with compressed hydrogen"</li> <li>■ ISO 23828 "Fuel cell road vehicles - Energy consumption measurement - Vehicles fuelled with compressed hydrogen"</li> <li>■ ISO TR 15916 "Basic considerations for the safety of hydrogen systems"</li> </ul>
<b>Tanksystem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ISO 19881 "Gaseous hydrogen - Land vehicle fuel containers"</li> <li>■ ISO 19882 "Gaseous hydrogen - Thermally activated pressure relief devices for compressed hydrogen vehicle fuel containers"</li> <li>■ ISO 13985 "Liquid hydrogen - Land vehicle fuel tanks"</li> <li>■ ISO 19887 "Gaseous hydrogen Fuel system components for hydrogen fueled vehicles"</li> </ul>
<b>Auszug regionaler Normen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ SAE J2578 "General Fuel Cell Vehicle Safety"</li> <li>■ SAE J2579 "Fuel systems in fuel cell and other Hydrogen vehicle"</li> <li>■ China GB/T 24548 2009 "Fuel cell electric vehicles terminology"</li> <li>■ China GB/T 24549 2009 "Fuel cell electric vehicles safety requirements"</li> </ul>

Abbildung 5: Beispielhafte Übersicht zur Normungslandschaft der Brennstoffzelle in automobilen Anwendungen

# 7. Expert/-innen-Befragung

Neben den theoretischen Erkenntnissen aus der Analyse von Patenten, Regelwerken, Normen und Standards sind auch die praktischen Erfahrungen und Einschätzungen von Expert/-innen aus Industrie, Wissenschaft und Forschung relevant. Laut den befragten Expert/-innen ist es wichtig, eine klare Richtung vorzugeben, mit denen Automobilhersteller wie auch -zulieferer zurechtkommen, um nicht parallel an verschiedenen Lösungsmöglichkeiten zu arbeiten, was zu deutlichen Mehrkosten bei Forschung und Entwicklung sowie Fertigung führen kann.

## Expert/-innen Befragung

Um die theoretischen Erkenntnisse auch durch Expert/-innen aus der Praxis überprüfen zu lassen, wurden zusätzliche Interviews durchgeführt. Bei der Auswahl der Expert/-innen wurde auf eine ausgewogene Balance der Vertreter/-innen aus Industrie (auch KMUs), Automobilhersteller, Zulieferer (Tier 1 und 2), Wissenschaft, Forschung sowie Beratungsunternehmen geachtet.

Aufgrund der jeweils subjektiven, teils sehr detaillierten und individuellen Einschätzungen von (Technologie-) Trends, Erwartungen und Unternehmenspositionen, wird auf die Nennung der Namen der teilnehmenden Expert/-innen und Unternehmen im Verlauf der Studie gänzlich verzichtet.

## Sichtweisen der Expert/-innen

Die befragten Expert/-innen bestätigten überwiegend die zuvor gewonnenen theoretischen Erkenntnisse. Am gravierendsten ist für sie das Fehlen einer neuen Norm, die sich grundlegend mit Brennstoffzellen in automobilen Anwendungen befasst. Wird künftig die Integration der Brennstoffzelle in das Fahrzeug in einer neuen Norm aufgegriffen, können klare Vorgaben für Unternehmen gemacht werden, an denen sie sich auch orientieren können.

Ergänzend wurden weitere Aspekte genannt:

- Normierung Subsysteme
- Normierung Unterkomponenten
- Ergänzung funktionaler Sicherheit bei UN/ECE-R100
- Normierung an den Schnittstellen von Fahrzeug und Tankinfrastruktur

Als Gründe wurden hierbei Sicherheit für Innovations- und Produktentwicklungen genannt, auf die sich beispielsweise im Bereich der Konnektivität der Brennstoffzelle mit den einzelnen Bestandteilen der Subsysteme berufen wird. Während hier primär monetäre Gründe den Ausschlag geben, spielt auch die Rolle der Wahrnehmung von Sicherheit und Verbraucherschutz eine wichtige Rolle, die es stets zu beachten und vermitteln gilt.

Darüber hinaus sprechen sich die Expert/-innen beispielsweise auch für die Übernahme beziehungsweise sektorübergreifende Vereinheitlichung von Sicherheitsanforderungen an die Brennstoffzelle aus. Heutzutage gibt es aufgrund unklarer Vorgaben auch Abweichungen und unterschiedliche Handhabungen bei der Abnahme durch technische Dienste. Zusätzlich sehen die Expert/-innen weitere Potentiale hinsichtlich Normung der Subsysteme in Bezug auf den Betankungsdruck (350, 500 oder 700 bar), Reinheitsstandards und der allgemeinen Qualität von bereitgestelltem Wasserstoff an Tankstellen.

Während also einerseits eine neue Norm erwünscht ist, sprechen sich die befragten Expert/-innen gleichzeitig dafür aus, der Brennstoffzelle insgesamt weitere Innovationspotentiale durch Freiräume zu belassen und sie nicht zu eng normativ einzuschränken. Vielmehr sollte die Brennstoffzelle als „Blackbox“ betrachtet und auch als solche in die neue Norm aufgenommen werden.

## Zwischenfazit der Expert/-innen

Statt die Brennstoffzelle als solche zu normen, sprechen sich die Expert/-innen für die Normierung der Subsysteme und integrativen Anforderungen aus. Dadurch ließen sich bestehende Unsicherheiten folgender Anforderungen beseitigen:

- Druckregime und Temperaturbereiche für die Kühlmedien
- Ionenaustauscher im nichtleitenden Kühlkreislauf
- Dichtigkeit der Schnittstellen
- Management der drei Ströme aus Batterie, Brennstoffzelle und Rekuperation der E-Maschine (elektrische- und EMV-Anforderungen)
- Sensorik
- zu verwendende Anschlüsse

Bei den genannten Punkten handelt es sich um eine beispielhafte Auswahl. Gerade Zulieferern könnte dadurch eine Sicherheit hinsichtlich der Weiterentwicklung der Subsysteme gegeben werden, um in einem markt- und sicherheitstechnisch sinnvollen Rahmen diese weiter voranzutreiben.

# 8. Kostenanalyse

Brennstoffzellenfahrzeuge haben im Vergleich zu konventionellen und batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen hohe Anschaffungskosten. Auch aus diesem Grund werden sie aus Verbrauchersicht oftmals nicht bevorzugt. Eine Kostenanalyse soll aufzeigen, welche Komponenten die Kostentreiber in diesem Bereich sind und welchen Beitrag vor allem Normen und Standards zur Kostenreduzierung leisten können.

## Analyse der Kostentreiber

Die Summe der Kosten für E-Achse, Batterie, Elektrik/Elektronik (EE), *Brennstoffzellenstack* mit den Subsystemen Kühl-, Luft- und Wasserstoffsystem werden als **Systemkosten** definiert. Der *Stack* und das Tanksystem sind dabei die kostspieligsten Komponenten des Brennstoffzellenfahrzeugs und bestimmen die Systemkosten. Diese machen beim Pkw circa 70 % und beim 40 t Lkw circa 59 % der Gesamtkosten des Antriebsstranges aus. Dies liegt insbesondere daran, dass ein Lkw eine deutlich größere Batterie mit circa 70 kWh benötigt als die aktuell auf dem Markt befindlichen Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) mit circa 1,5 kWh.

Die Kosten eines *Stacks* setzen sich vor allem aus den Kosten der nacheinander gestapelten Zellen zusammen. Der Hauptkostentreiber bei den Zellen ist die Membran (*MEA*), welche für die Umwandlung von chemischer in elektrischer Energie sorgt. Diesen Umwandlungs- beziehungsweise Stromerzeugungsprozess gilt es möglichst leistungsstark und alterungsstabil zu gestalten, wofür gezielte Forschung an den einzelnen Komponenten unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen untereinander erforderlich ist.

Die Gasdiffusionsschicht (*GDL*), ein Bestandteil der *MEA*, macht aktuell, unter anderem aufgrund der enthaltenen Carbonfasern circa 22 % der *Stackkosten* aus. Platin wird als Katalysator in der *MEA* eingesetzt und die Kosten des Platins machen aktuell circa 12 % der *Stackkosten* aus und ließen sich theoretisch auf rund 8 % reduzieren. Ein Kosteneinsparungspotenzial von 4 % lässt sich allerdings nur dann realisieren, wenn Alterungsprozesse und Randeffekte bei der Fertigung berücksichtigt werden.

Das größte Kosteneinsparungspotenzial bieten die Monopolarplatten, welche aktuell circa 32 % der *Stackkosten* und circa 12 % der Systemkosten ausmachen. Erhebliche Kostenvorteile lassen sich durch Volumenfertigung erzielen. Weitere Kostenvorteile bringt die Materialauswahl, bei der nach aktuellem Stand der Technik Titan oder Edelstahl und Graphit mögliche Alternativen sind.

Um hier Kostenreduzierungen erreichen zu können, ist der Hochlauf der Stückzahlen in nennenswerte Volumina notwendig, damit sich eine entsprechende Fertigungsinfrastruktur entwickeln kann.

Ebenfalls entscheidend ist die Entwicklungsleistung der aktuell noch begrenzten Anzahl an Marktteilnehmern. Es ist damit zu rechnen, dass diese Effekte voraussichtlich erst in den nächsten fünf bis zehn Jahren einen nennenswerten Beitrag zur Kostenreduzierung leisten werden.

## Rolle von Normen und Standards

Die Luft-, Kühl-, Wasserstoffversorgungs- und EE-Systeme werden zusammen als **Subsysteme** bezeichnet. Diese Subsysteme machen circa 20 % der Systemkosten aus. Insbesondere bei der Weiterentwicklung der Subsysteme können Normen und Standards dabei helfen, die Kosten der Komponenten in Hinblick auf die Systemkosten, um circa 4 % zu senken. Die Lieferantenentwicklungskosten bestimmen maßgeblich die Stückkosten und können auch über 30 % an Kosteneinsparungen bei den Subsystemen erzielen.

Die Kosten des Tanks machen beim Pkw circa 30 % und beim Lkw (40 t) circa 40 % der Systemkosten aus. Das Verhältnis zwischen den *Stack-* und Tankkosten verhält sich beim Pkw im Vergleich zum Lkw (40 t) dabei unterschiedlich. Bei Pkw fallen die *Stackkosten* relativ gesehen höher aus als die Tankkosten, wohingegen beim Lkw (40 t) die Tankkosten höher liegen. Der Grund liegt darin, dass ein LKW (40 t) circa 60 bis 80 Kilogramm Wasserstoff an Bord hat, während ein Pkw „nur“ über 5 Kilogramm Tankinhalt verfügt und brennstoffzellenseitig einen drei- bis vierfachen Leistungszuwachs im Vergleich zum Pkw benötigt. Die hohen Kosten der Tanks werden maßgeblich durch die Kosten der Carbonfasern (> 50 % der Gesamtkosten) bestimmt. Hier hat in den letzten Jahren viel Entwicklungsarbeit sattgefunden.

Durch verbesserte Skaleneffekte und Prozesse im Rahmen steigender Volumina und technologischer Weiterentwicklungen sind bis 2025 Kostenreduzierungen von bis zu 10 % und bis 2030 von bis zu 20 % durchaus realisierbar. Das Kosteneinsparungspotenzial durch Normen und Standards liegt bei den Systemkosten bis 2025 bei 3 bis 5 % und bei den Entwicklungskosten bei circa 6 %. Dies zeigt, dass Normen und Standards in Zukunft einen wesentlichen Beitrag zur Kostenreduzierung bei Brennstoffzellenfahrzeugen leisten können (Abbildung 6).

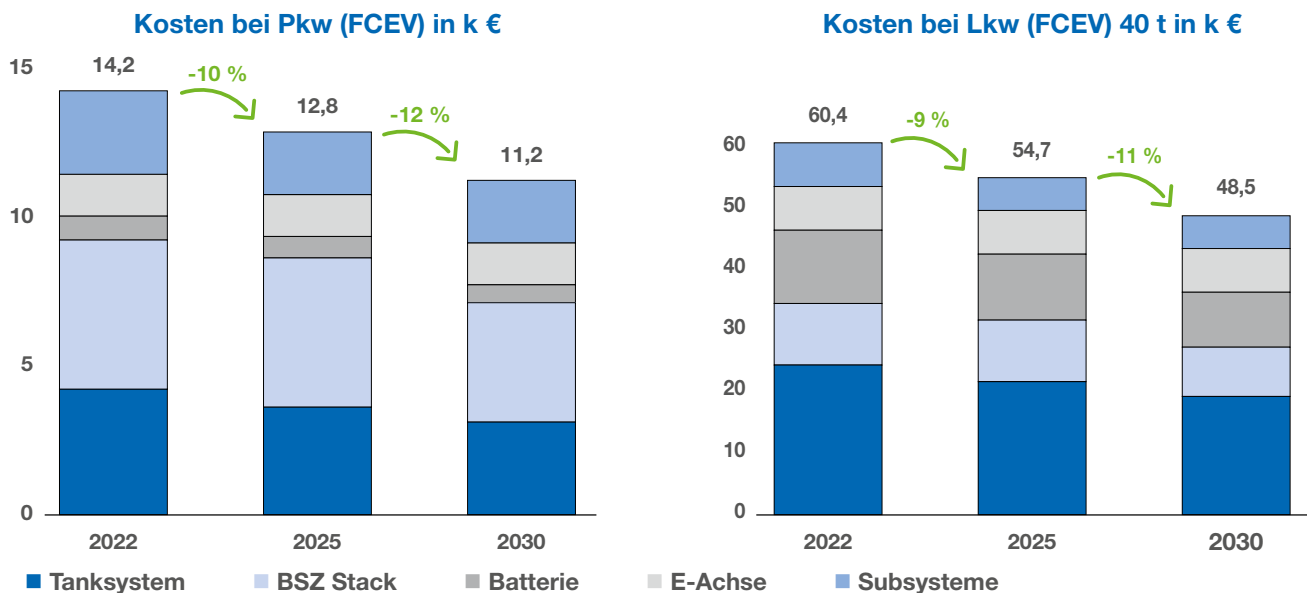


Abbildung 6: Kosteneinsparungspotentiale bei Pkw und Lkw 40 t (FCEV) mit Brennstoffzellenantrieb bis 2030

### Weitere Kosteneinsparungspotentiale

Im Verkehrssektor mit Fokus Straßenverkehr wird die Brennstoffzelle primär in den Bereichen Schwerlast- und Langstreckengüterverkehr eingesetzt - so die Rückmeldung der interviewten Expert/-innen. Diese Ergebnisse sind deckungsgleich mit der Antriebsportfolio-Studie. Neben dem Aufbau und der Entwicklung von Fachwissen für den Wirtschaftsstandort Deutschland spielt auch der Ausblick auf Anwendungen in weiteren Verkehrsträgern (wie Flugzeug, Schiff und Zug) eine wichtige Rolle.

Es ist zwar mit keinem großen Technologiesprung mehr zu rechnen, doch könnten gesunkene Entwicklungskosten zu höheren Stückzahlen (Serienfertigung) führen. Das wiederum kann auch geringere Kaufpreise auf Seiten der Verbraucher/-innen nach sich ziehen, was den Umstieg auf nachhaltige Verkehrsoptionen erleichtern dürfte.

Entscheidend für eine hohe Akzeptanz bei Verbraucher/-innen sind neben dem absoluten Kaufpreis auch die variablen Verbrauchskosten sowie die bestehende und künftig geplante Tankinfrastruktur.

Aktuell werden Brennstoffzellenfahrzeuge nur in geringer Stückzahl und vor allem in Kleinserie von deutschen oder asiatischen Automobilproduzenten gebaut, was hohe Entwicklungs- und Systemkostenanteile mit sich bringt. Auch die Errichtung von Wasserstofftankstellen ist teuer. Aktuell gibt es in Deutschland 92 davon (Stand: April 2022) und 1.261 Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb (Stand: Juni 2021).<sup>5, 6</sup>

Es gibt verschiedene Möglichkeiten für die Konfiguration von FCEVs in der Zukunft. Eine davon ist die unterschiedliche Auslegung der Systemkomponenten. Beispielhaft wurde betrachtet welche Auswirkungen eine veränderte Systemauslegung von Brennstoffzellen- und Batteriegröße auf die Systemkosten hat. Eine Plugin-FCEV-Kombination könnte Kostenvorteile bringen (Abbildung 7).




Fahrzeugtyp	Systemkosten	Leistung Brennstoffzelle	Gewicht H <sub>2</sub>	Energie Batterie
 Wasserstoffbrennstoffzellenfahrzeug (FCEV)	14.200 €	130 kW	5,6 kg	1,5 kWh
 Plug-in Wasserstoffbrennstoffzellenfahrzeug (PFCEV)	13.400 €	80 kW	4,3 kg	10 kWh
 Wasserstoffbrennstoffzellen-Lkw (FCEV) 40 t	60.400 €	520 kW	~70,0 kg	75 kWh

Abbildung 7: Beispielhafter Vergleich der Materialkosten verschiedener Fahrzeugtypen, Antriebsstränge und Batterien

# 9. Handlungsempfehlungen

Das Schließen vorhandener Normungslücken beziehungsweise das Nutzen der Standardisierungspotentiale bei Brennstoffzellen in automobilen Anwendungen kann mit einer Kostenreduktion einhergehen, die der Technologie beim Schritt hin zu höheren Stückzahlen (Serienfertigung) helfen kann. Dabei kann Fachwissen aufgebaut und der Wirtschaftsstandort Deutschland im Bereich wichtiger Zukunftstechnologien und ihrer Anwendungen konkurrenzfähig bleiben.

## Zusammenfassung der Erkenntnisse

Nach den Analysen der Patente, Regelwerke, Normen und Standards sowie der Befragung von Expert/-innen ist festzuhalten, dass es noch Normungspotentiale bei der Brennstoffzelle in automobilen Anwendungen gibt. Eine neue Norm sollte dabei das Zusammenspiel zwischen Brennstoffzelle und Batterie (Pufferbatterie) – in Hinblick auf beispielsweise Wechselrichter, Stecker oder Kondensatoren – sowie Brennstoffzelle mit Subsystemen hinsichtlich sicherheitsrelevanter Anforderungen schließen und dabei auch den aktuellen Stand der Technik umfassen. Dies stellt auch eine Chance für deutsche Unternehmen dar.

Hinsichtlich vorhandener RCS sind die UN/ECE-R100 und 134 sowie die ISO 23273 wichtig, wobei letztere als Bindeglied fungiert, indem sie die Aspekte Energiespeicher/ Tank und Brennstoffzellenfahrzeug aufgreift und deren Sicherheitsanforderungen näher ausführt, ohne allerdings im Detail auf die Brennstoffzelle einzugehen. Dies wurde aber teilweise auch von den befragten Expert/-innen so gewünscht, um weitere Innovationspotentiale durch Freiräume erschließen zu können. Eine neue Norm erzeugt Klarheit über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Brennstoffzelle in automobilen Anwendungen. Denn aktuell liegt die Herausforderung in der Zusammenarbeit zwischen Automobilherstellern, Zulieferern und technischen Diensten oftmals darin, ein gemeinsames Verständnis über das Zusammenspiel zwischen Brennstoffzelle und Subsystemen zu erhalten.

Auch wurden weitere Handlungsfelder in Hinblick auf die Normungsarbeit im Zusammenspiel von Brennstoffzelle und Batterie identifiziert: Bei der Nutzung induktiver Ladetechnologien und Hochleistungsbatteriesystemen, sektorübergreifenden Sicherheitsanforderungen sowie Qualitätsstandards hinsichtlich des Wasserstoffs an Tankstellen.

Durch Normen und Standards kann ein Kosteneinsparungspotential von 3 bis 5 % in Hinblick auf die Systemkosten pro Fahrzeug bis 2025 erzielt werden. Diese Einsparungen ermöglichen eine gezielte Weiterentwicklung der Brennstoffzellen auch in höheren Stückzahlen (Serienfertigung). Die Entscheidung über das weitere Vorgehen sollte dabei den Expert/-innen der Normungsgremien obliegen. Im Rahmen des „ELSTA“-Projekts können die Erkenntnisse aktiv weiter diskutiert werden.

DKE hat über die letzten Jahre ein starkes Netzwerk aus Fachkräften (Ingenieur/-innen, Forscher/-innen und Herstellern) mit Expertise in der Brennstoffzellen-Technologie aufgebaut und im nationalen Gremium DKE/K 384 „Brennstoffzellen“<sup>7</sup> gebündelt. Die sichere Anwendung von Brennstoffzellen in Nicht-Straßenfahrzeugen wird hier bereits direkt in Normen adressiert. Hersteller und Entwickler ziehen diese Normen zum Teil heran, um Analogien zu Straßenfahrzeugen zu schließen. Es ist somit nur konsequent, auch diesen Bedarf zu adressieren. Die DKE bietet die dafür geeignete neutrale Plattform, um die Normen der Zukunft zu gestalten.

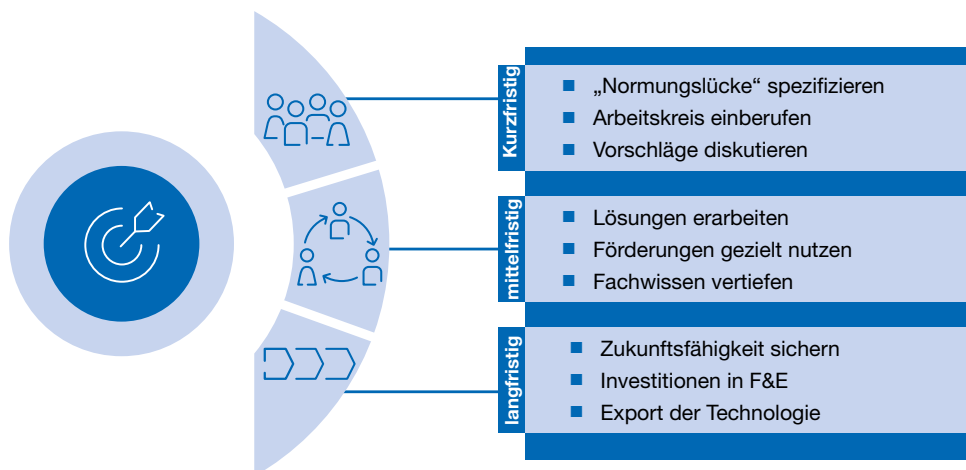


Abbildung 8: Handlungsempfehlungen



# 10. Literatur- und Abbildungsverzeichnis

## Literaturverzeichnis

- <sup>1</sup> ELSTA-Projektwebsite, unter: <https://www.elsta-mobilitaet.de/de>
- <sup>2</sup> Methodische Erläuterungen zu Statistiken über Fahrzeugzulassungen (FZ) (Stand: Februar 2022), unter: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/fz\\_methodik/fz\\_methodische\\_erlaeueterungen\\_202202\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/fz_methodik/fz_methodische_erlaeueterungen_202202_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- <sup>3</sup> DEPATISnet - Datenbank zu Patentveröffentlichungen aus aller Welt des Deutschen Patent- und Markenamts (Stand: Januar 2022), unter: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=menu&content=index&action=index>
- <sup>4</sup> NPM AG 4 – Zwischenbericht „Positionspapier Brennstoffzelle“ (Stand: April 2021), unter: <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/2download/positionspapier-brennstoffzelle/>
- <sup>5</sup> Anzahl Wasserstofftankstellen in Deutschland (Stand: April 2022), unter: <https://h2.live/>
- <sup>6</sup> Drucksache 19/31761 – Antwort der Bundesregierung - „Ergebnis der Förderung von Wasserstoff-Pkws durch die Bundesregierung“, unter: <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/317/1931761.pdf>
- <sup>7</sup> DKE K/384 „Brennstoffzellen“, unter: <https://www.dke.de/384>

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1</b>	Skizze der PEM-Brennstoffzelle	7
<b>Abb. 2:</b>	Schematischer Aufbau der Brennstoffzelle und Subsysteme	8
<b>Abb. 3:</b>	Vergleich der Patentsituation im Kontext der Brennstoffzelle (angemeldete Patente von 1985 bis 2020)	9
<b>Abb. 4:</b>	Übersicht des Geltungsbereiches der untersuchten Regelwerke und Normen	11
<b>Abb. 5:</b>	Beispielhafte Übersicht zur Normungslandschaft der Brennstoffzelle in automobilen Anwendungen	12
<b>Abb. 6:</b>	Kosteneinsparungspotentiale bei Pkw und Lkw 40 t (FCEV) mit Brennstoffzellenantrieb bis 2030	15
<b>Abb. 7:</b>	Vergleich der Materialkosten verschiedener Fahrzeugtypen, Antriebsstränge und Batterien	15
<b>Abb. 8:</b>	Handlungsempfehlungen	16

# 11. Abkürzungsverzeichnis

<b>BSZ</b>	Brennstoffzelle
<b>CVM</b>	<i>Cell Voltage Monitoring</i>
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN)
<b>DKE</b>	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik
<b>DPMA</b>	Deutsches Patent- und Markenamt
<b>EE</b>	Elektrik/ Elektronik
<b>EMV</b>	Elektromagnetische Verträglichkeit
<b>VDE ETG</b>	Energietechnische Gesellschaft im VDE
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>FCEV</b>	<i>Fuel Cell Electric Vehicle, Brennstoffzellenfahrzeug</i>
<b>GB</b>	GB Standard, <i>Guobiao</i> , chinesisch für „Nationaler Standard“
<b>GDL</b>	<i>Gas Diffusion Layer</i> , Gasdiffusionsschicht
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i> , Internationale Organisation für Normung
<b>KFZ</b>	Kraftfahrzeug
<b>KMUs</b>	Kleine und mittelständische Unternehmen
<b>kWh</b>	Kilowattstunde
<b>Lkw</b>	Lastkraftwagen (Lkw)
<b>MEA</b>	<i>Membrane Electrode Assembly</i> , Membran-Elektroden-Einheit
<b>NPM</b>	Nationale Plattform Zukunft der Mobilität
<b>NFZ</b>	Nutzfahrzeug
<b>PEM</b>	Polymerelektrolyt
<b>PFCEV</b>	<i>Plug-In Fuel Cell Electric Vehicle</i> (Plug-In Brennstoffzellenfahrzeug)
<b>Pkw</b>	Personenkraftwagen (Pkw)
<b>RCS</b>	<i>Regulation, Code and Standards</i>
<b>REES</b>	<i>Rechargeable Energy Storage System</i> , Wiederaufladbares Energiespeichersystem
<b>SAE</b>	<i>Society of Automotive Engineers</i> , Verband der Automobilingenieure
<b>t</b>	Tonne (Gewichtsangabe)
<b>TC</b>	<i>Technical Committee</i> , Technisches Komitee
<b>TR</b>	<i>Technical Reports</i>
<b>UNECE</b>	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i> , Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE, UNECE)
<b>VDA</b>	Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
<b>VDE</b>	VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
<b>VDI GEU</b>	Verein Deutscher Ingenieure e.V. Gesellschaft Energie und Umwelt

# Ihr Kontakt



## Andrea Appel

Projektmanagerin  
Wasserstoffentwicklung  
Neue Technologien und Services  
VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e.V.  
Mobil: +49 171 5521928  
andrea.appel@vde.com



## Dennis Heusser

Projektmanager Mobility  
VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e.V.  
Telefon: +49 69 6308-466  
Mobil: +49 170 5769233  
dennis.heusser@vde.com



## Dr.-Ing. Ralf Petri

Geschäftsbereichsleiter Mobility  
VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e.V.  
Telefon: +49 69 6308-221  
Mobil: +49 170 7916310  
ralf.petri@vde.com



## Gürkan Balcioglu

Projektmanager Mobility  
DKE Deutsche Kommission  
Elektrotechnik Elektronik  
Informationstechnik  
Telefon: +49 69 6308-422  
Mobil: +49 170 7645310  
guerkan.balcioglu@vde.com



## Marko Kesic

Projektmanager Mobility  
DKE Deutsche Kommission  
Elektrotechnik Elektronik  
Informationstechnik  
Telefon: +49 69 6308-417  
Mobil: +49 160 97504971  
marko.kesic@vde.com



## Dr. David Urmann

Projektmanager Health  
DKE Deutsche Kommission  
Elektrotechnik Elektronik  
Informationstechnik  
Telefon: +49 69 6308-226  
Mobil: +49 170 1782112  
david.urmann@vde.com

VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e.V.  
Merianstraße 28  
63069 Offenbach

Tel. +49 69 6308-0  
[service@vde.com](mailto:service@vde.com)  
[www.vde.com](http://www.vde.com)

**VDE**