

H₂

WERTSCHÖPFUNGSKETTE BRENNSTOFFZELLE

Metastudie

IMPRESSUM

Herausgeber und Auftraggeber

NOW GmbH
Nationale Organisation Wasserstoff- und
Brennstoffzellentechnologie
Fasanenstraße 5
10623 Berlin

Gefördert durch

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin

Mitwirkung des VDMA AG Brennstoffzellen

Gerd-Dieter Krieger

Autoren

INC Invention Center
Daniel Führen, M.Sc.
Dr.-Ing. Myron Graw
Dr. rer. nat. Léonard Kröll

umlaut
Dr.-Ing. Jan Ilsemann
Dr.-Ing. Martin Robinius
Dipl.-Ing., Dipl.-Wirt.-Ing. Patrick Wienert

Fraunhofer IPT
Martin Aretz, M.Sc.
Dr.-Ing. Henning Janssen
Marlin Kersting, M.Sc.
Clemens Müller, M.Sc., M.Sc.

Stand: Februar 2022

Gestaltung

kursiv Kommunikationsdesign | Katrin Schek
Peter Frey, Angela Köntje

Copyright

Die Nutzungsrechte liegen – soweit nicht explizit
genannt – bei NOW und den Autoren.

Beiträge

Die Studie ist eine Zusammenfassung mehrerer Analysen, die
von unterschiedlichen Auftragnehmern durchgeführt wurden.
Im Wesentlichen wurden folgende Beiträge geleistet:
Kap 2 und 3: INC Invention Center, ergänzt durch Fraunhofer IPT
Kap 4: umlaut, Fraunhofer IPT

Die Beiträge wurden vom Fraunhofer IPT überarbeitet und in
eine Studie überführt.

Die in den Literaturverzeichnissen angegebenen Online-
Quellen wurden im dritten Quartal des Jahres 2020 abgerufen.

Haftungsausschluss

Die Sichtweisen und Schlüsse, die in diesem Bericht aus-
gedruckt werden, sind jene der Mitarbeiter der NOW GmbH
sowie der beteiligten Partner. Alle Angaben und Daten sind
sorgfältig recherchiert. Allerdings gibt weder die NOW GmbH
noch irgendeiner ihrer Mitarbeiter, Vertragspartner oder
Unterauftragnehmer irgendeine ausdrückliche oder implizierte
Garantie oder übernimmt irgendeine rechtliche oder sonstige
Verantwortung für die Korrektheit, Vollständigkeit oder Nutz-
barkeit irgendeiner Information, eines Produktes oder eines
enthaltenen Prozesses.

	Abstract	5
1	Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen	7
2	Branchen und Marktübersicht	9
2.1	Unterteilung des Brennstoffzellmarktes	9
2.2	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle	13
2.3	Festoxid-Brennstoffzelle	15
2.4	Einflussgrößen auf die zukünftige Marktentwicklung	15
3	Einführung in die Brennstoffzellentechnologie	17
3.1	Übersicht Brennstoffzellensysteme	17
3.2	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle	19
3.2.1	Grundlagen und Funktion	19
3.2.2	Aufbau einer PEMFC	20
3.2.3	Komponenten der PEMFC	21
3.2.4	Komponenten der PEMFC-BoP	45
3.2.5	Komponenten der Leistungselektronik	58
3.2.6	Komponenten des Tanksystems	60
3.3	Festoxidbrennstoffzelle	64
3.3.1	Grundlagen und Funktion	65
3.3.2	Aufbau einer SOFC	66
3.3.3	Komponenten der SOFC	66
3.3.4	Aufbau der SOFC-BoP	77

4	Die Kostenanalyse der Wertschöpfungskette	88
4.1	Methodik und Auswahl der Datenbasis	88
4.1.1	Methodik	88
4.1.2	Auswahl der betrachteten Komponenten	89
4.1.3	Auswahl der Datenbasis	90
4.2	PEMFC-Stack	93
4.2.1	Bipolarplatte	100
4.2.2	Membran-Elektroden-Einheit	106
4.2.3	Gas-Diffusions-Lage	111
4.3	PEMFC-BoP	114
4.3.1	Luftverdichtung	118
4.3.2	Wassermanagement	119
4.4	SOFC-Stack	122
4.4.1	Interkonnektor	128
4.4.2	Zelle	131
5	Zusammenfassung und Ausblick	135
6	Anhang	139
	Literaturverzeichnis	139
	Abbildungsverzeichnis	140
	Tabellenverzeichnis	144
	Abkürzungsverzeichnis	145

Abstract

Brennstoffzellen können einen entscheidenden Beitrag zur Dekarbonisierung der weltweiten Energiewirtschaft leisten. Neben anderen Bauarten sind die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) und die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) aktuell die marktgängigsten Varianten. Trotz der schon langen Entwicklung bis hin zu serienreifen Systemen sind die Kosten am Markt weiterhin hoch. Eine hohe Marktdurchdringung und deutliche Kostensenkungen haben über die letzten Jahre nicht stattgefunden. Im Rahmen der Studie soll die Frage beantwortet werden, welche Ursachen für die hohen Marktpreise von Brennstoffzellensystemen vorliegen. Die Studie analysiert die Wertschöpfungskette von Brennstoffzellensystemen und leitet darauf aufbauend die Kostenstrukturen ab. Hierbei wird ergründet, ob die gestellten Prognosen zu Kostenentwicklungen mit dem Status quo übereinstimmen. Gleichzeitig werden Potenziale zur Kostenreduktion und damit zur Steigerung der Marktfähigkeit der Technologie identifiziert.

Um diese Fragestellungen zu beantworten, werden in der vorliegenden Studie sowohl Marktaspekte als auch grundlegende Technologien betrachtet. Im Anschluss an eine allgemeine Marktübersicht werden die Hauptkomponenten der jeweiligen Brennstoffzellensysteme analysiert und hinsichtlich ihrer Kosten, Lebensdauer und Komplexität bewertet. Durch den Vergleich der Bewertung aller Bauteile werden die Komponenten mit dem größten Kostensenkungspotenzial identifiziert. Im Anschluss werden die anvisierten Soll-Kosten der identifizierten Bauteile basierend auf vier Studien ermittelt und mit realen Ist-Kosten kontextualisiert. Die Ist-Kosten werden durch Gespräche mit Industrievertretern ermittelt. Der Fokus liegt hierbei auf den relevantesten Komponenten der Stacks einer PEMFC und einer SOFC sowie den Peripheriekomponenten

des PEMFC-Stacks. Abschließend wird analysiert, wie stark die Soll- und die Ist-Kosten voneinander abweichen, worin Gründe für mögliche Diskrepanzen liegen und wie diese zukünftig adressiert werden könnten.

Die PEMFC wird vornehmlich in mobilen Anwendungen eingesetzt. Die größten Kostentreiber im PEMFC-Stack basierend auf den untersuchten Studien sind in absteigender Reihenfolge die Membran-Elektroden-Einheit, die Bipolarplatte und die Gasverteilschicht. Kostensenkungen bezüglich des Stacks und der Einzelkomponenten um bis zu 75 % können bei einer Steigerung der Stückzahl von der Einzel- und Kleinstserienfertigung auf über 20.000 Stacks erreicht werden. Eine weitere Steigerung der Stückzahlen bietet zusätzliche Kostensenkungspotenziale. Die mit Abstand teuerste Komponente ist die Membran-Elektroden-Einheit. Ihr Kostenanteil liegt zwischen 40 und 75 % der gesamten Kosten eines Stacks. Es gibt Kostenunterschiede zwischen Systemen für Pkws, Lkws und die stationäre Energieversorgung. Die Hauptkostentreiber der Peripheriesysteme sind der Luftkreislauf und das Kühlsystem. Auch hierbei werden die größten Kostenreduktionen bei einer Steigerung der Stückzahl von der Einzel- und Kleinstserienfertigung auf über 20.000 Systeme prognostiziert. Diese prognostizierten Soll-Kosten entsprechen den Ist-Kosten, allerdings bleiben die tatsächlichen Stückzahlen weit hinter den teilweise optimistisch prognostizierten Stückzahlen zurück.

Die SOFC ist vermehrt in stationären oder quasistationären Anwendungen zu finden, z. B. in der dezentralen Energieversorgung. Basierend auf den untersuchten Studien sind die größten Kostentreiber in aufsteigender Reihenfolge der Interkonnektor und die als ASC (anode supported cell) ausgeführte Zelle bestehend aus Anode, Elektrolyt, Barrierschicht und Kathode. Die Vergleichbarkeit weiterer Komponenten ist aufgrund der unterschiedlichen Zelldesigns eingeschränkt.

Im Vergleich mit der PEM-Brennstoffzelle kommen Skaleneffekte bereits bei niedrigeren Stückzahlen zum Tragen. So betragen die Kostensenkungen bis zu 50 % bei einer Steigerung der Stückzahl von der Einzel- und Kleinstserienfertigung auf über 10.000 Stacks. Die prognostizierten Soll-Kosten entsprechen nicht den Ist-Kosten. Um diesen Kostenunterschied zu minimieren, sollte die Skalierung der SOFC weiter vorangetrieben und die Netzeinspeiseregulatorik innerhalb der EU vereinheitlicht werden.

Aus den Kostenbetrachtungen beider Systeme geht hervor, dass insbesondere im Bereich der PEMFC höhere Stückzahlen in der Produktion erforderlich sind, um die Kosten der Brennstoffzellentechnologie zu senken und damit eine Marktattraktivität zu erreichen. Zusätzlich zu den bisher nicht realisierten Skaleneffekten ergeben sich weitere Einflussfaktoren für ein hohes Kostenniveau aus den hohen Entwicklungs- und Investitionskosten, welche die Zuliefererindustrie teilweise über die wenigen am Markt abgenommen Systeme finanziert. Die aufgezeigten Kostensenkungspotenziale bei hohen Stückzahlen werden von der Industrie im Allgemeinen als realistisch, wenn auch ambitioniert eingestuft.

Die Hochskalierung der Produktion auf (Klein-)Serieniveau kann die Kosten für Brennstoffzellensysteme deutlich senken. Die Kostenreduktion ist dabei weniger auf systemseitigen Fortschritt, beispielsweise eine Verringerung der Materialkosten, als auf eine Reduktion der Fertigungskosten zurückzuführen. Ausschlaggebend für die Investition und den Aufbau einer hochratenfähigen Produktion ist eine vorliegende Sicherheit eines möglichen Absatzmarktes.

1 Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen

Hintergrund

Als innovativer Energieträger bietet Wasserstoff das Potenzial, CO₂-Emissionen in mobilen sowie stationären Anwendungen zu reduzieren. Die deutsche Bundesregierung möchte Wasserstofftechnologien als wesentliches Element der Energiewende nutzen und hat dazu im Juni 2020 die Nationale Wasserstoffstrategie veröffentlicht. Diese enthält das klare Bekenntnis, den Markthochlauf zugehöriger Systeme zu beschleunigen und die Wettbewerbsfähigkeit der nationalen Industrie zu stärken. Wasserstoffbasierte Brennstoffzellensysteme bieten für die deutsche und europäische (Zulieferer-)Industrie die Chance, industrielle Wertschöpfung zu erweitern, neue Arbeitsplätze zu schaffen bzw. die Arbeitsplatzsicherheit zu erhöhen und Exportchancen zu sichern. Große Potenziale bieten Brennstoffzellen beispielsweise im Bereich der stationären und quasistationären Energieversorgung, bei der neben der Stromgewinnung auch Abwärme genutzt werden kann und die abgenommene Strommenge nahezu konstant ist. Mobile Anwendungen bieten durch ihre hohen Anforderungen an die Energiedichte ebenfalls einige potenzielle Nutzungsmöglichkeiten, wengleich die erforderliche Energieversorgung eher

dynamisch ist. Der Vorteil der Brennstoffzellentechnologie im Vergleich zu Batteriespeichern liegt in der Nutzung eines Energieträgers, der eine höhere Energiedichte aufweist und somit bei gleichem Gewicht eine größere Energiemenge speichert. Aufgrund der höheren Energiedichte und dem häufig flüssigen oder gasförmigen Aggregatzustand des Energieträgers ist ein wirtschaftlicher Transport und ein schnelles Umfüllen möglich. Der Fokus der aktuellen Entwicklungen liegt daher vor allem auf Anwendungen, die einen großen Energiebedarf über einen langen Zeitraum abrufen und die Energie möglicherweise mit sich führen. In den nächsten Jahren ist damit zu rechnen, dass vornehmlich der Schwerlastverkehr durch den Einsatz von Brennstoffzellensystemen elektrifiziert wird. Der dafür erforderliche Markthochlauf ist jedoch nur umsetzbar, wenn Brennstoffzellen wirtschaftlich, technisch und regulatorisch wettbewerbsfähig zu alternativen Antriebstechnologien werden. Zum heutigen Zeitpunkt sind die Kosten der Brennstoffzellensysteme trotz der bereits langen Entwicklung hin zu serienreifen Systemen weiterhin hoch.

Zielsetzung

Die Wertschöpfungskette eines Brennstoffzellensystems ist sehr komplex und vielschichtig. Global spielen viele Akteure eine große Rolle für ein gesamtes Brennstoffzellensystem, sowohl als Zulieferer von Materialien als auch als Zulieferer einzelner Bauteile für das periphere System.

Die Metastudie soll zunächst ein Verständnis bezüglich der Brennstoffzellentechnologie, ausgewählten Einzelkomponenten sowie ihrer Produktion und ihrer Wertschöpfungskette erzeugen. Der Fokus der Betrachtung wird dabei auf die Komponenten des Brennstoffzellenstacks und ihre Funktionen gelegt. Neben dem Aufbau eines grundlegenden Verständnisses bezüglich ihrer Produktion soll im Rahmen einer Metaanalyse die Frage beantwortet werden, wie sich die Kosten der Brennstoffzellensysteme zusammensetzen. Gleichzeitig soll die Studie Kostentreiber der Systeme und Differenzen zwischen in der Vergangenheit prognostizierten Soll-Kosten und tatsächlichen Ist-Kosten ausgewählter Komponenten aufzeigen. Ein weiterer Schwerpunkt der Analyse liegt in der Betrachtung von Skaleneffekten in der Produktion und des Einflusses technologischer Weiterentwicklungen auf die Kostenentwicklungen.

So hat die Metastudie zum Ziel, die Wertschöpfungskette und die Kostenstrukturen von Brennstoffzellensystemen und BoP-Komponenten zu ergründen. Sie soll somit ein aktuelles und umfassendes Nachschlagewerk für Brennstoffzellen im heutigen Markt darstellen und für Entscheidungen aus Sicht von Zulieferern und Industrie sowie Politik dienen.

Vorgehen

Die vorliegende Studie ist in drei thematisch voneinander trennbare Kapitel unterteilt. Zunächst werden in einer Marktanalyse die aktuellen Entwicklungen auf dem Brennstoffzellenmarkt betrachtet. Der Fokus liegt hierbei auf den Brennstoffzellentechnologien der Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) und der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC). Anschließend werden die grundlegenden Funktionsprinzipien der Technologien beschrieben, bevor die Einzelkomponenten der Systeme näher betrachtet werden. Hierbei werden sowohl die Funktion als auch die Eigenschaften der Komponenten beleuchtet.

Ein weiterer Schwerpunkt in diesem Kapitel liegt auf der Betrachtung und Bewertung möglicher Produktionsverfahren der Einzelkomponenten. Aufbauend auf den Ergebnissen wird im Anschluss die Wertschöpfungskette ausgewählter Komponenten aus der Kostenperspektive näher beleuchtet. Unterschieden wird hierbei zwischen den ausgewählten Literaturquellen der anvisierten Soll-Kosten für Einzelkomponenten und den aktuellen Einschätzungen aus der Industrie. Dieser Vergleich zwischen den Soll- und den Ist-Kosten soll die größten Differenzen zwischen den durch Kostenmodelle ermittelten Kostenabschätzungen und durch die Industrie realisierbare Kosten aufzeigen und Anknüpfungspunkte für zukünftige Kostenreduktionen identifizieren. Die gewonnenen Erkenntnisse werden unter anderem in Gegenüberstellung von Zahlen und Fakten sowie Schaubildern dargestellt, um den deutschen, aber auch den globalen Markt bezüglich Herstellkosten von Brennstoffzellen und ihren Systemen zu verstehen.

2 Branchen und Marktübersicht

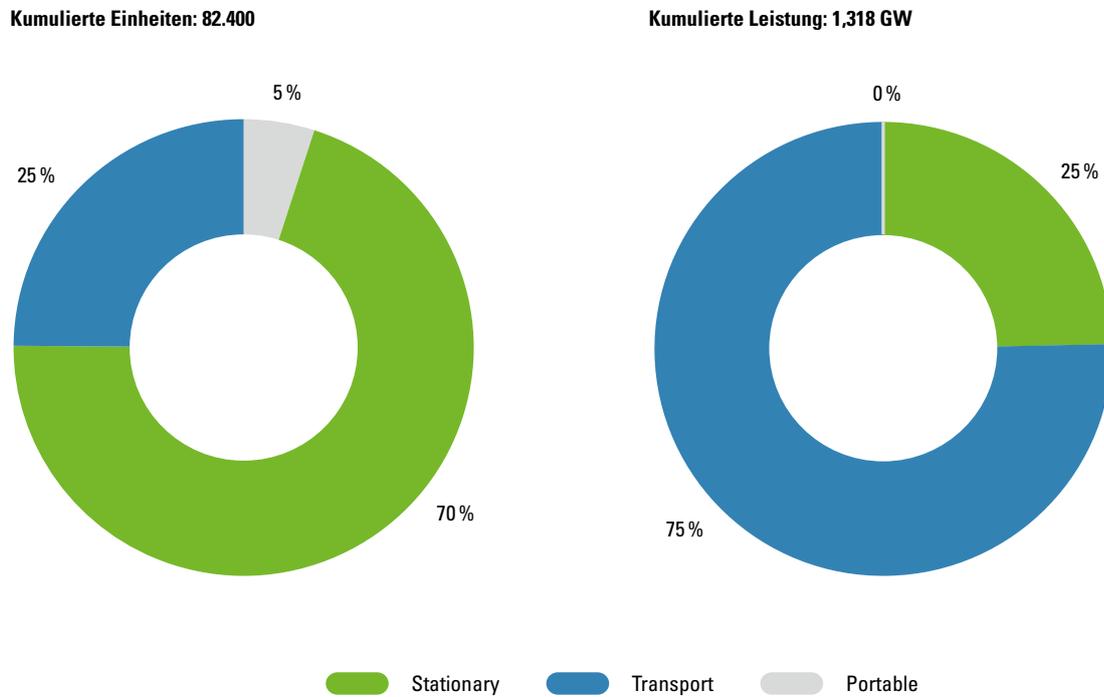
Im Rahmen der zukünftigen Energieversorgung von sowohl mobilen als auch stationären Anwendungen werden an die Brennstoffzellentechnologie hohe Erwartungen gestellt. Dieses Kapitel gibt zunächst eine Einschätzung über die Unterteilung des gesamten Brennstoffzellenmarktes nach Anwendungsbereich, Märkten und Brennstoffzellentypen. Im Anschluss werden die Märkte der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle und der Festoxid-Brennstoffzelle detaillierter betrachtet.

2.1 Unterteilung des Brennstoffzellenmarktes

Im Jahr 2020 wurden ca. 82.000 Brennstoffzellensysteme abgesetzt, wovon 70 % auf den stationären Einsatz entfielen (Abbildung 1, links). Die Gesamtleistung aller Anlagen lag bei ca. 1,3 GW, wovon etwa drei Viertel auf mobile Anwendungen zurückzuführen sind (Abbildung 1, rechts). Portable Brennstoffzellensysteme, die zur Energieversorgung von elektronischen Geräten dienen, sind nur als Nischenanwendungen im Markt vertreten.

Aus diesen Zahlen lässt sich erkennen, dass stationäre Einheiten einen Großteil der verkauften Einheiten ausmachen, leistungstechnisch jedoch weniger stark auf dem Markt präsent sind. Dividiert man die jeweiligen Gesamtleistungen durch die Anzahl der verkauften Systeme, wird deutlich, dass stationäre Brennstoffzellensysteme im Durchschnitt über eine Leistung von ca. 5 bis 6 kW verfügen, während Brennstoffzellen, die im mobilen Sektor eingesetzt werden, mit durchschnittlich ca. 50 kW deutlich leistungsstärker sind. Dies liegt darin begründet, dass ein Großteil der stationären Brennstoffzellensysteme für die Strom- und Wärmeerzeugung in kleineren Gebäuden eingesetzt wird (engl. Combined-Heat-and-Power (CHP)). So wurden in Japan im Jahr 2020 über 47.000 stationäre Mikro-CHP verkauft, der deutsche Markt ist mit etwas über 5.000 Einheiten der zweite große Absatzmarkt für stationäre Systeme. Neben den kleinen Systemen sind im stationären Bereich auch Großanlagen mit einer Gesamtleistung von >100 kW verfügbar. Trotz der geringen Stückzahlen von nur 400 verkauften Systemen bilden diese mit einer installierten Leistung von über 270 MW einen Großteil der installierten Gesamtleistung im stationären Bereich ab.

ABBILDUNG 1 Anteilige Menge der abgesetzten Brennstoffzellen im Jahre 2020 aufgeteilt nach portablem, stationärem und mobilem Einsatz (links: nach Stückzahl; rechts: nach Leistung)

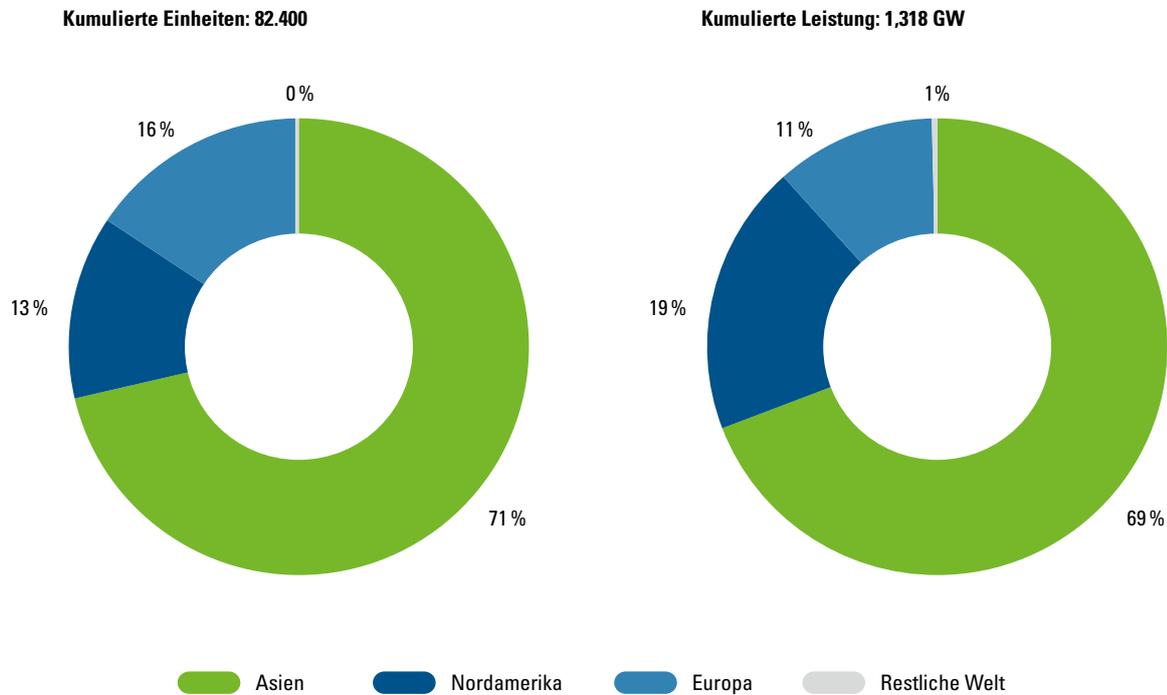


Im mobilen Sektor werden Brennstoffzellen vor allem als Antrieb für Personenwagen genutzt. Insbesondere die Fahrzeuge der Hersteller Toyota und Hyundai tragen mit über 8.500 verkauften Fahrzeugen im Jahr 2020 zu den Verkaufszahlen bei. Weitere Anwendungen, beispielsweise tragbare Geräte, spielen eine untergeordnete Rolle und sollen hier nicht weiter betrachtet werden.

Nahezu drei Viertel aller Systeme wurden im Jahr 2020 in Asien verkauft (siehe Abbildung 2, links). Die restlichen Systeme wurden zu ungefähr gleichen Teilen im europäischen und im nordamerikanischen Raum installiert. Auch hinsichtlich der installierten Gesamtleistung ist insbesondere der asiatische Markt im

Bereich der Brennstoffzellentechnik dominant (siehe Abbildung 2, rechts). Der Vorsprung Asiens resultiert weitgehend aus starken politischen Instrumenten. Hier zu nennen sind die chinesische NEV-Förderung, Koreas Roadmap für die Wasserstoffwirtschaft und der Renewables Portfolio Standard sowie der alle drei Jahre überarbeitete Basic Energy Plan und der strategische Fahrplan für Wasserstoff und Brennstoffzellen in Japan. Insbesondere Japan fördert aktiv die Wasserstoffmobilität und investiert stark in stationäre Brennstoffzellensysteme für den Gebäudesektor. So wurden im Rahmen eines Förderprogrammes der NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) bis März 2020 insgesamt ca. 313.000 Mikro-Brennstoffzellen-Heizkraftwerke installiert.

ABBILDUNG 2 Anteil der abgesetzten Brennstoffzellen im Jahre 2020 aufgeteilt nach Weltregionen und Stückzahl (links: nach Stückzahl; rechts: nach Leistung)

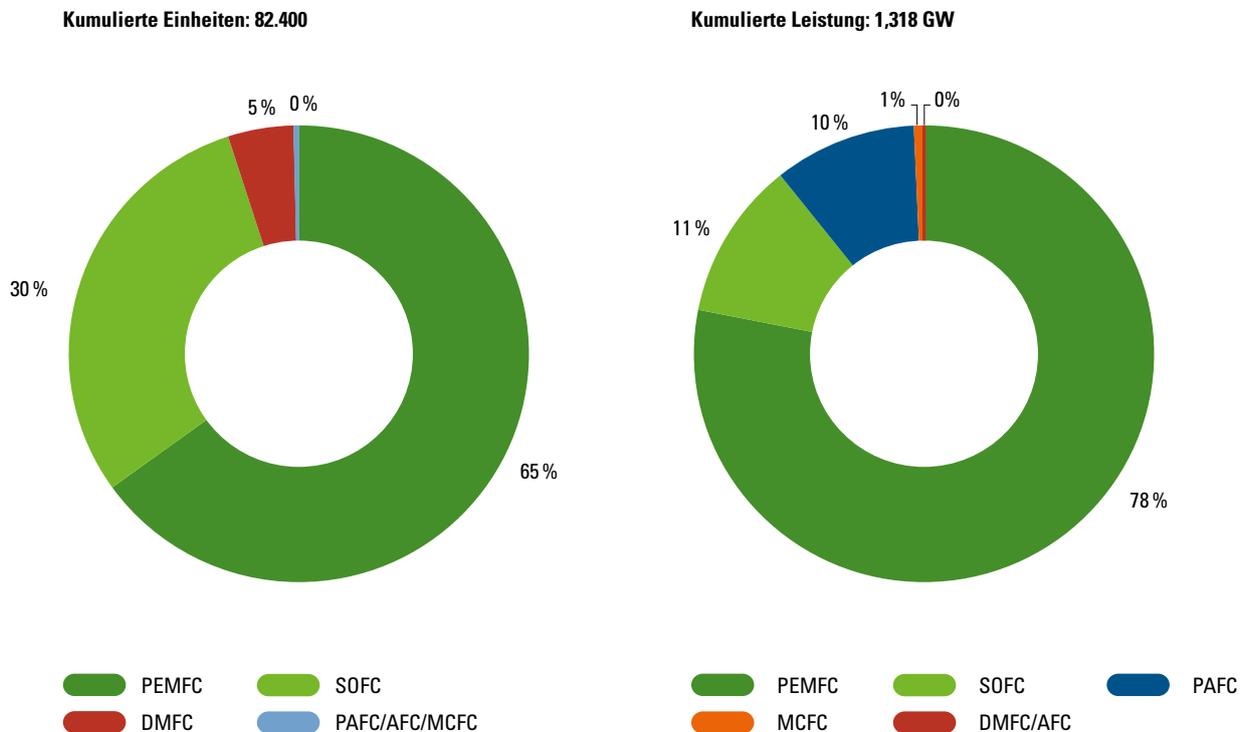


Märkte außerhalb der drei betrachteten Regionen Asien, Nordamerika und Europa spielen im Bereich der Brennstoffzelle keine Rolle.

In Abbildung 3 sind die Anteile der jeweiligen Brennstoffzellentechnologien anhand der installierten Gesamtleistung und der verkauften Einheiten dargestellt. Die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)) ist mit Abstand die dominierende Brennstoffzellentechnologie (siehe Abbildung 3, rechts). Im Durchschnitt besitzt eine PEMFC eine Leistung von 19 kW. Der hohe Anteil der Technologie am Brennstoffzellenmarkt resultiert vor allem aus der Nutzung der PEMFC im Pkw und in kleineren CHP-Anlagen. Damit ist die Bandbreite des PEMFC-Systems breit gefächert.

Die Festoxid-Brennstoffzelle (engl. Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)) hat den zweithöchsten Anteil am Gesamtmarkt, sowohl in Bezug auf die installierte Leistung als auch in Bezug auf die Anzahl der verkauften Systeme. Die Hauptanwendung der SOFC liegt im stationären Bereich. Hier wird die SOFC insbesondere als CHP in Gebäuden oder zur Sicherstellung der Energieversorgung von Datenzentren eingesetzt. Die Phosphorsäure-Brennstoffzelle (engl. Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)) hat einen signifikanten Anteil an der umgesetzten Gesamtleistung, ist mengenmäßig jedoch nur in äußerst kleinen Stückzahlen am Markt vertreten. Dies deutet darauf hin, dass die PAFC insbesondere in großen Anlagenkonzepten mit mehreren hundert kW Gesamtleistung eingesetzt wird. Eine genau gegenläufige Entwicklung ist bei der Direkt-Methanol-Brenn-

ABBILDUNG 3 Anteil der abgesetzten Brennstoffzellen im Jahre 2020 aufgeteilt nach Brennstoffzellentechnologie (links: nach Stückzahl; rechts: nach Leistung)



stoffzelle (engl. Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)) zu erkennen. Hier werden insbesondere kleine und damit portable Systeme mit Leistungen von unter 100 Watt am Markt angeboten. Die Stückzahlen sind im Vergleich zu der PEMFC und der SOFC dennoch gering.

Sowohl Alkalische Brennstoffzellen (engl. Alkaline Fuel Cell (AFC)) als auch Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (engl. Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)) stellen in Hinsicht auf die installierte Gesamtleistung und die Anzahl an ausgelieferten Systemen Nischenprodukte dar, die nur in hochspezialisierten Anwendungen Absatzmärkte finden.

Literatur

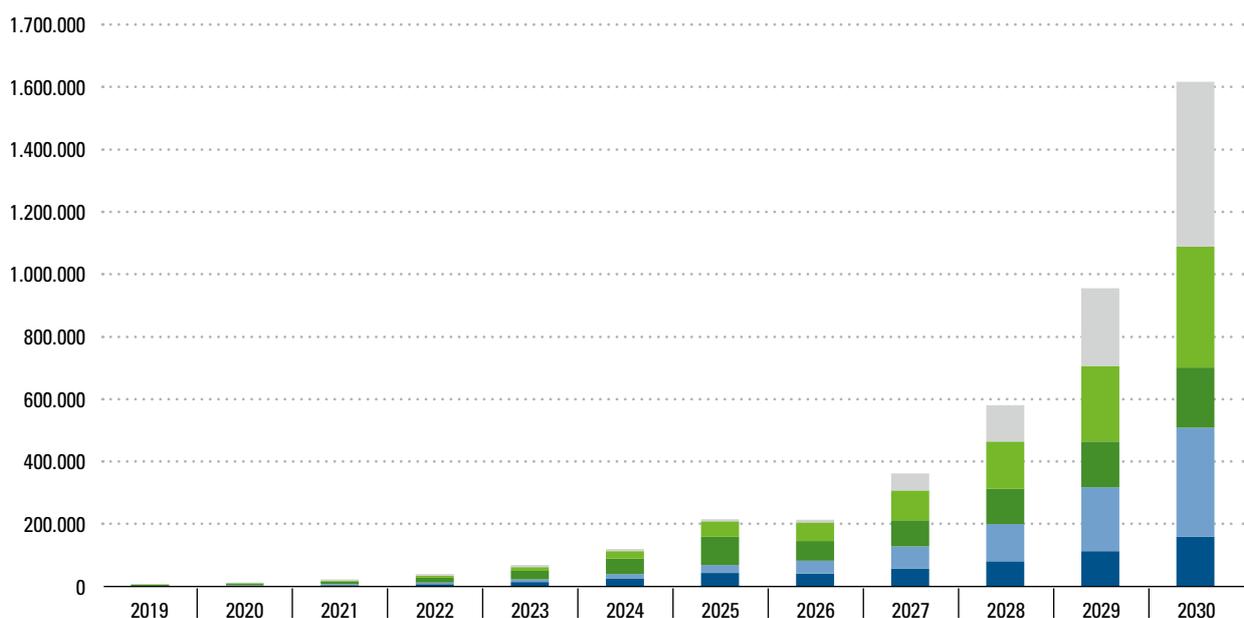
- E4tech: The Fuel Cell Industry Review 2020

2.2 Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle

In diesem Teil der Marktanalyse wird die weltweite Entwicklung der Brennstoffzellenfahrzeuge (engl. Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)) analysiert. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die PEMFC die dominante Brennstoffzellentechnologie im Bereich der FCEV darstellt. Gleichzeitig wird angenommen, dass die PEMFC hauptsächlich in mobilen Anwendungen eingesetzt wird. Die zukünftige Anzahl der zugelassenen brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeuge basiert auf den FCEV-Flottenzielen, die von den Regierungen derjenigen Länder festgelegt werden, die den großflächigen Einsatz von FCEVs unterstützen. Zu diesen Ländern zählen China, Japan, Südkorea und die USA. Europa als Staatengemeinschaft hat keine offiziellen FCEV-Flottenziele veröffentlicht.

In Abbildung 4 werden die jährlichen Verkaufszahlen auf Basis der Flottenziele an betriebenen Brennstoffzellenfahrzeugen der jeweiligen Regierungen aufgezeigt. Die Daten für das Jahr 2020 basieren auf den in den jeweiligen Ländern gemeldeten FCEVs, während die Daten für 2025 bis 2030 den FCEV-Flottenzielen der Regierungen entsprechen. Für den jährlichen Absatz in Europa wurde ein durchschnittliches Flottenziel für 2030 auf Basis der Ziele einzelner europäischer Länder angenommen. Für den Absatz in Südkorea wurde das Flottenziel für 2030 linear zwischen den in der nationalen Wasserstoff-Roadmap verankerten Zielen für 2025 und 2040 interpoliert.

ABBILDUNG 4 Entwicklung der FCEV-Absätze auf Basis der Flottenziele der betrachteten Regierungen

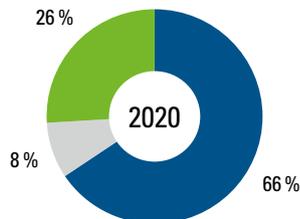


Quelle: Center Fuel Cell Industrialization 2021

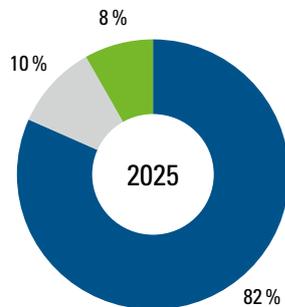
China Europe Japan South Korea USA

ABBILDUNG 5 Anzahl an zugelassenen FCEV nach Weltregion

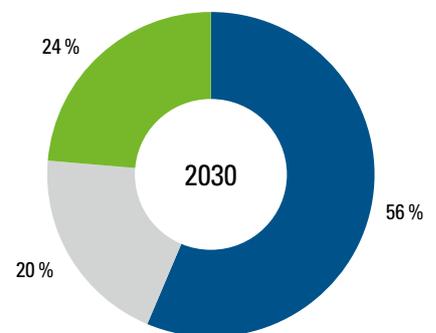
34.500 zugelassene Fahrzeuge



490.000 zugelassene Fahrzeuge



4.200.000 zugelassene Fahrzeuge



Quelle: Center Fuel Cell Industrialization 2021

Europa Nordamerika Asien-Pazifik

Die akkumulierte Menge aller zugelassenen FCEV ergibt die Gesamtmenge der zugelassenen Fahrzeuge (siehe Abbildung 5).

Im Jahr 2020 entfallen auf Nordamerika und den asiatisch-pazifischen Raum insgesamt über 90 % der weltweiten FCEV-Flotte. In den nächsten Jahren ist zu erwarten, dass die FCEV-Flotte vor allem im asiatisch-pazifischen Raum deutlich schneller wachsen wird als in den anderen Weltregionen, was dazu führt, dass der FCEV-Flottenanteil in dieser Region bis zum Jahre 2025 auf ca. 82 % ansteigt. Zwischen 2025 und 2030 ist global ein starker Anstieg der zugelassenen Fahrzeuge zu verzeichnen. Im Rahmen dieser Entwicklung können Nordamerika und Europa ihren Marktanteil am FCEV-Markt auf 24 % bzw. 20 % ausbauen, was auf das zeitlich verschobene Wachstum der einzelnen Märkte zurückzuführen ist.

Literatur

- https://juser.fz-juelich.de/record/894093/files/Energie_Umwelt_542.pdf
- https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf
- <https://www.klimaatkkoord.nl/documenten/publicaties/2019/06/28/national-climate-agreement-the-netherlands>
- https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_fc2f37727595437590891a3c7ca0d025.pdf
- <https://cafcp.org/blog/california-fuel-cell-revolution-vision-2030>
- <https://fuelcellworks.com/news/carb-issues-annual-evaluation-of-fuel-cell-electric-vehicle-deployment-hydrogen-fuel-station-network-development>
- https://www.ieafuelcell.com/fileadmin/publications/2019-04_AFC_TCP_survey_status_FCEV_2018.pdf

2.3 Festoxid-Brennstoffzelle

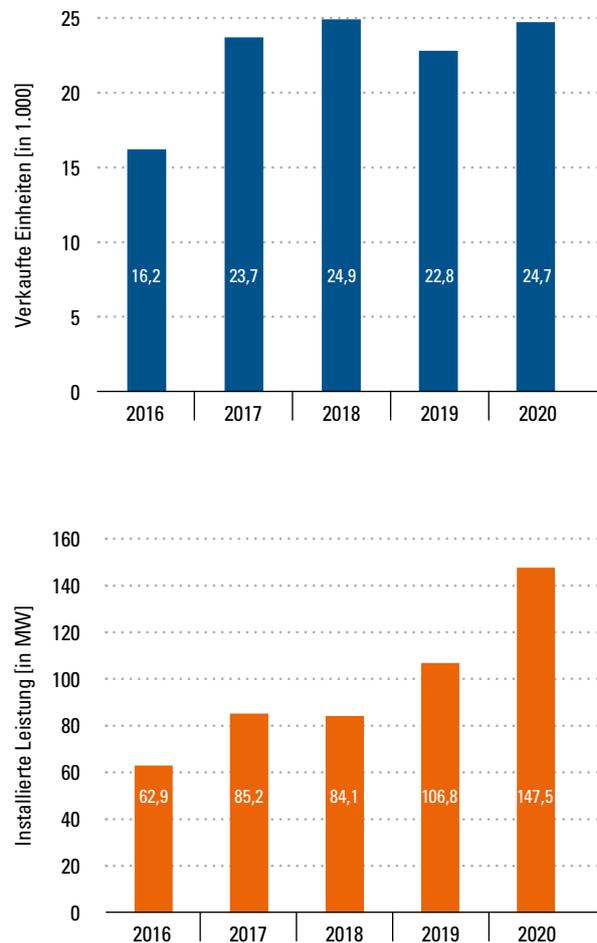
Wie bereits aus der Gesamtbetrachtung des Brennstoffzellenmarktes (Kapitel 2.1) ersichtlich wird, ist die SOFC neben der PEMFC sowohl hinsichtlich der Anzahl an installierten Systemen als auch hinsichtlich der installierten Leistung eine der relevantesten Brennstoffzellentechnologien. Die im Jahr 2020 ca. 25.000 verkauften Einheiten entsprechen einer Gesamtleistung von 148 MW (siehe Abbildung 6). Dies stellt ein deutliches Wachstum hinsichtlich der 107 MW installierten Leistung im Jahre 2019 dar. Insgesamt ist zu erkennen, dass sich die installierte Gesamtleistung zwischen den Jahren 2016 und 2020 mehr als verdoppelt hat. Die Steigerung der Gesamtleistung lässt sich zum einen durch die ansteigende Anzahl an verkauften Systemen erklären. Zum anderen stieg jedoch die durchschnittliche Leistung der SOFC-Systeme zwischen 2016 und 2020 von 3,9 kW auf 6 kW an. Die verhältnismäßig geringe Durchschnittsleistung des Systems ist darauf zurückzuführen, dass die SOFC-Technologie vor allem in kleinen stationären Mikro-CHP eingesetzt wird, wo sie die Funktion der Wärmeenergie und Stromversorgung übernimmt.

Mittelfristig ist zu erwarten, dass der Einsatz der SOFC in quasistationären Anwendungen auch quantitativ an Bedeutung gewinnen wird. Als quasistationäre Anwendungen werden wenig dynamische Fahrzeuge bezeichnet. Hierzu zählen beispielsweise Schiffe, Züge oder auch Baumaschinen.

Literatur

— E4tech: The Fuel Cell Industry Review 2020

ABBILDUNG 6 Entwicklung des SOFC-Marktes zwischen 2016 und 2020



2.4 Einflussgrößen auf die zukünftige Marktentwicklung

Die in den vorigen Kapiteln aufgezeigten Entwicklungen der Brennstoffzellenmärkte lassen sowohl für die PEMFC als auch die SOFC darauf schließen, dass die Brennstoffzellentechnologie in den nächsten Jahren eine entscheidende Rolle bei der Energieversorgung in sowohl mobilen als auch stationären Anwendungen spielen wird.

Die Marktentwicklung der PEMFC in mobilen Anwendungen hängt neben den vorgegebenen politischen Zielen einzelner Akteure vor allem von der technischen und ökonomischen Entwicklung der Technologie und ihren Substitutionstechnologien ab. Unter den verschiedenen technologischen Optionen für die Elektrifizierung des Antriebsstranges bzw. die Dekarbonisierung des Verkehrssektors steht vor allem der batterieelektrische Antrieb für mobile Anwendungen aktuell im Vordergrund. Insbesondere die im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen hohen Systemkosten der Brennstoffzellentechnologie und infrastrukturelle Rahmenbedingungen stellen zum heutigen Zeitpunkt ein Hemmnis für den Hochlauf der Brennstoffzellentechnologie dar. Der Marktanteil der FCEV und damit der Hochlauf der PEMFC-Technologie wird daher zukünftig stark davon abhängen, wann und in welchem Maße die Systemkosten deutlich reduziert werden können.

Neben den in den Marktstudien oft betrachteten Anwendungen der Brennstoffzellentechnologie in Personenkraftwagen oder im schweren Nutzfahrzeugbereich ist der Einsatz der PEMFC auch in anderen Fahrzeugarten und -klassen denkbar. Zu nennen wären beispielsweise der Einsatz der PEMFC im Schienenverkehr, im gewerblichen Personentransport oder in maritimen Anwendungen. Zum heutigen Zeitpunkt sind Marktabschätzungen für diese Anwendungen jedoch noch mit Unsicherheiten verbunden.

Wie in den vorigen Kapiteln beschrieben, werden SOFC-Systeme mehrheitlich als stationäre CHP-Anwendungen genutzt. Hieraus resultieren die verglichen mit den PEMFC geringen durchschnittlichen Leistungen der Systeme. Bei der Betrachtung der aktuellen und zukünftigen Marktentwicklung sollten andere Anwendungsbereiche der SOFC jedoch nicht aus dem Betrachtungshorizont genommen werden.

Beispielsweise stellen Großanlagen mit Leistungen >100 kW stückzahltechnisch nur einen geringen Teil an den Gesamtsystemen dar. Gleichzeitig sind sie bezogen auf die installierte Gesamtleistung ein nicht zu vernachlässigender Baustein in der Entwicklung der SOFC. So wurde im Jahr 2021 in Korea ein SOFC-Kraftwerk mit einer Gesamtleistung von über 78 MW in Betrieb genommen. Diese vereinzelt Projekte zeigen, wie flexibel die Technologie hinsichtlich Anwendung und realisierbarer Leistungsklasse ist. Ein weiterer, bis jetzt noch nicht betrachteter Fokus liegt in quasistationären Anwendungen, in denen die SOFC zukünftig verstärkt eingesetzt werden könnte. Insbesondere der Einsatz als Generator oder APU (engl. Auxiliary-Power-Unit) im Schiffsverkehr erscheint hierbei vielversprechend. Erste Demonstratorsysteme in Kreuzfahrtschiffen sind für das Jahr 2022 geplant.

Die Heterogenität hinsichtlich der realisierbaren Systemleistungen und die Nutzung der SOFC in neuen Anwendungsfeldern begünstigen den Markthochlauf für die Systeme, erschweren gleichzeitig jedoch die Vorhersage bezüglich zukünftiger Stückzahlen. Die Quantifizierung des Markthochlaufs der SOFC ist daher mit hohen Unsicherheiten verbunden.

Literatur

- E4tech: The Fuel Cell Industry Review 2020
- <https://www.h2-view.com/story/new-78-96mw-hydrogen-fuel-cell-power-plant-opens-in-south-korea/>
- <https://www.msccruises.de/news/msc-euribia-muenzzeremonie-msc-world-europa-aufschwimmen>

3 Einführung in die Brennstoffzellentechnologie

Eine Brennstoffzelle wandelt die chemische Energie eines Brennstoffs in elektrische Energie um. Die Umsetzung des Brennstoffs findet dabei im sogenannten Brennstoffzellenstack statt, der in der Regel aus einer Vielzahl von Einzelzellen besteht. Über zahlreiche periphere Komponenten wird der Stack mit den dazu erforderlichen Medien versorgt. Der Aufbau des Stacks und der Peripheriekomponenten hängt stark von der Art und dem Funktionsprinzip der Brennstoffzelle ab. Im folgenden Kapitel 3.1 wird zunächst eine Übersicht über verschiedene Brennstoffzellensysteme gegeben, bevor in den Kapiteln 3.2 und 3.3. näher auf die Funktion und die Komponenten der PEMFC und der SOFC eingegangen wird. Für die Komponenten des Brennstoffzellenstacks werden zusätzlich die Produktionsverfahren näher beleuchtet.

3.1 Übersicht Brennstoffzellensysteme

Je nach Betriebstemperatur können Brennstoffzellen in Nieder-, Mittel- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen unterteilt werden. Eine weitere mögliche Unterscheidung ist nach der Art des verwendeten Elektrolyten möglich. Gängige Brennstoffzellen sind die Alkalische Brennstoffzelle (AFC), die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC), die Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC), die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC), die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) und die Polymer-elektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) (siehe Abbildung 7). Die unterschiedlichen Zelltypen unterscheiden sich deutlich in der Betriebstemperatur, der Leistungsdichte und dem Wirkungsgrad des Systems.

In den letzten Jahren ziehen Automobilhersteller und -zulieferer Brennstoffzellen zunehmend als mögliche Technologie für den Antrieb von E-Fahrzeugen in Betracht. Drei wesentliche technische Anforderungen prägen den Einsatz in mobilen Anwendungen: kurze Anlaufzeit sowie eine hohe gravimetrische Leistungsdichte der Energiewandler und Energieträger. Insbesondere die PEM-Brennstoffzelle hat sich aufgrund ihrer vergleichsweise niedrigen Betriebstemperatur

zwischen 80 °C und 120 °C und der Fähigkeit zum dynamischen Betrieb als favorisierte Brennstoffzellentechnologie für die mobile Antriebstechnik durchgesetzt.

Für stationäre Anwendungen, beispielsweise Blockheizkraftwerke, werden zumeist SOFC eingesetzt, die unter höheren Temperaturen (500 bis 1000 °C) betrieben werden können und einen hohen Wirkungsgrad besitzen. Neben Wasserstoff können in der SOFC auch andere Brenngase wie Erdgas als Treibstoff verwendet werden. Diese Brenngase können unter der Nutzung

der hohen Abwärme des Systems zu Wasserstoff reformiert werden. Der Einsatz als Antriebstechnik für quasistationäre Anwendungen, beispielsweise in der Schifffahrt oder in Schienenfahrzeugen, ist allerdings ebenso möglich.

Aufgrund dieser Relevanz werden in dieser Studie die PEMFC und die SOFC betrachtet.

ABBILDUNG 7 **Übersicht über verschiedene Brennstoffzellentypen**

Brennstoffzellentyp	Betriebs-temperatur [°C]	Elektrische Effizienz [%]	Leistungsdichte [mW/cm ²]	Bewertung
AFC	< 100	60	100 – 200	
DMFC	0 – 120	20 – 30	240	
PEMFC	80 – 120	60	700	
PAFC	150 – 200	40	200	
MCFC	600 – 700	50	100	
SOFC	500 – 1.000	60	240	



Literatur

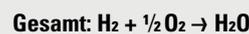
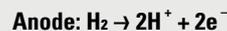
- Wee, J.-H.: Applications of proton exchange membrane fuel cell systems. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2007, 11 (8); pp. 1720–1738
- Kurzweil, P.: Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung. 3. Auflage. Springer, Wiesbaden. 2016
- Wang, Y. et al.: A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. In: Applied Energy. 2011, 88 (4); pp. 981–1007
- Fraunhofer IPT: Future Energy Storage Systems for Mobility Applications; 20203.2

3.2 Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle

Wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt, bietet die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) neben den Brennstoffzellen typischen Eigenschaften durch ihren relativ niedrigen Betriebspunkt zwischen 80 °C und 120 °C Vorteile hinsichtlich des dynamischen Betriebs. Im Folgenden werden die Funktion, der Aufbau des Stacks und die einzelnen Komponenten beschrieben und durch mögliche Produktionstechnologien ergänzt.

3.2.1 Grundlagen und Funktion

In der PEMFC werden Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) in Wasser (H₂O) umgewandelt. Dabei wird elektrischer Strom erzeugt (e⁻). Der molekulare Wasserstoff (H₂) wird an der Anode zu atomarem Wasserstoff (H⁺) aufgespalten und unter Abgabe von Elektronen zu H⁺-Ionen (Protonen) oxidiert. Per Definition wird die Elektrode, an der die Oxidation stattfindet, als Anode bezeichnet. Die H⁺-Ionen wandern zur gegenüberliegenden Seite und rekombinieren mit Sauerstoff zu Wasser. Da an dieser Elektrode die Reduktion der H⁺-Ionen erfolgt, wird die Elektrode als Kathode bezeichnet. Folglich verarmt die Anodenseite an Wasserstoff und an der Kathodenseite bildet sich Wasser. Durch die elektrische Isolation von Anode und Kathode besteht zwischen den Elektroden der Zelle ein elektrochemisches Potenzial von 1,23 V. Die Elektrodenreaktionen und die Gesamtreaktion lauten wie folgt:



Die aufgrund des Potenzials bei geschlossenem Stromkreislauf bewegten Elektronen können durch einen externen Verbraucher, z. B. den Motor eines Fahrzeuges, geleitet werden. Die Protonen indes wandern durch den Elektrolyten auf direktem Weg zur Kathode. Dieser Elektrolyt ist im Falle der PEMFC eine Polymerelektrolytmembran, die der Brennstoffzelle zu ihrem Namen verhilft. Um die Reaktionen möglichst effizient ablaufen zu lassen, werden üblicherweise Katalysatoren genutzt. Diese senken die Energie, die für die Reaktion nötig ist, und erhöhen somit die Umsätze der eingeleiteten Gase deutlich.

Ein Brennstoffzellensystem besteht aus drei bzw. vier Subsystemen (siehe Abbildung 8):

- dem Stack, in dem die elektrochemische Umwandlung des Brennstoffs (Luft + H_2) in elektrische Energie erfolgt,
- dem Medium leitenden System, das zum einen die Reaktanden zur Brennstoffzelle führt und zum anderen die Medien zur erforderlichen Kühlung der Subkomponenten leitet (dieses System wird im Allgemeinen als Balance of Plant (BoP) bezeichnet),
- der Leistungselektronik, welche die von der Brennstoffzelle zur Verfügung gestellte elektrische Energie in Antriebs- und Versorgungsenergie verteilt, und
- dem Tanksystem, das an die BoP angeschlossen ist, aber hier separat aufgeführt wird.

Der Aufbau des Stacks wird im Folgenden detailliert inklusive der erforderlichen Materialien und möglichen Prozesstechnologien erläutert. Im Anschluss folgt einer Beschreibung der BoP-Subsysteme und -Komponenten, bevor die Leistungselektronik und das Tanksystem betrachtet werden.

3.2.2 Aufbau einer PEMFC

Ein PEMFC-Stack kann nach verschiedenen technischen Anforderungen, z. B. Leistung oder geometrische Rahmenbedingungen, ausgelegt werden, um an die unterschiedlichen Anwendungen angepasst zu werden. Dabei können einzelne Komponenten nicht durch z. B. leistungsstärkere getauscht werden, sondern müssen immer aufeinander abgestimmt sein.

ABBILDUNG 8 Vereinfachter Aufbau eines PEMFC-Systems

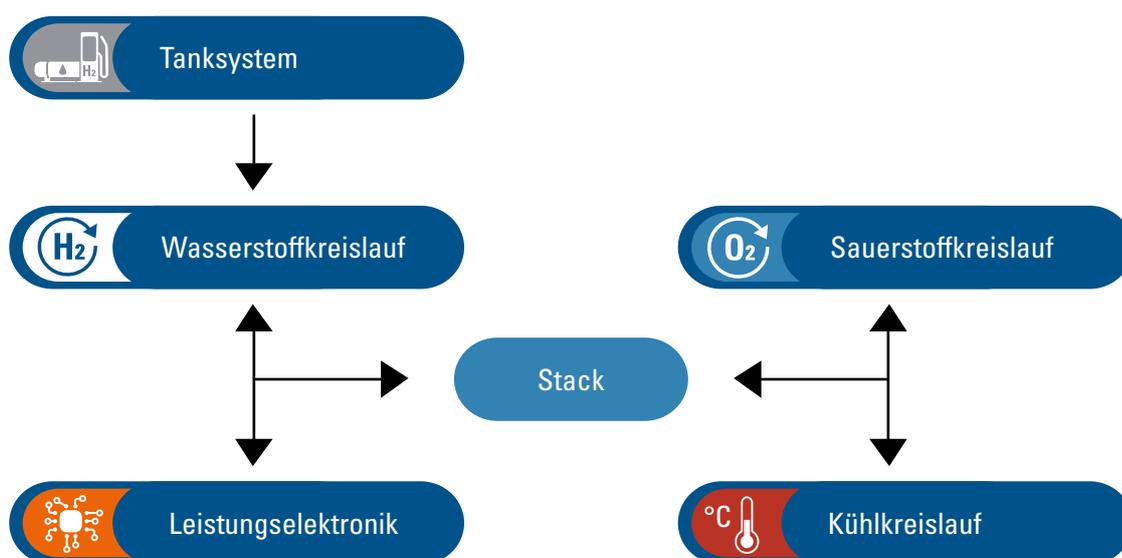


ABBILDUNG 9 Schematische Darstellung eines PEMFC-Stacks



Quelle: Fraunhofer IPT

Der grundsätzliche Aufbau eines PEMFC-Stacks ist in Abbildung 9 zu sehen. Ein PEMFC-Stack für mobile Anwendungen besteht aus ca. 200 bis 500 Einzelzellen und hat typischerweise einen rechteckigen Grundriss. Eine einzelne Zelle besteht üblicherweise aus zwei Bipolarplatten (BPP), zwei Dichtungen, zwei Gasdiffusionsschichten (GDL) und der Membranelektrodenanordnung (MEA). Die MEA besteht aus zwei Elektroden (Anode und Kathode), die jeweils mit einem Katalysator beschichtet sind, und einer Polymerelektrolytmembran (PEM), welche die Protonen leitet. Die Stapelung der einzelnen Komponenten führt zu einer Dicke von 0,8 bis 1,6 mm. Der größte Einfluss auf die Dicke ist durch das Material der BPP gegeben. Hier sind metallische BPP aufgrund der erreichbaren minimalen Materialdicke von 50 μm vorteilhaft und führen zu einem kompakteren Stack. Der PEMFC-Stack ist von Stromkollektoren umschlossen, die den elektrischen Strom aus dem System abführen. Die Endplatte mit eingebauten Schnittstellen für die Medienzufuhr und -abfuhr dient dazu, die Druckbelastung gleichmäßig im Stack zu verteilen und Gas- und Flüssigkeitsanschlüsse zu befestigen.

Kennzahlen Stack

- Stack Leistung: 20 – 200 kW
- Anzahl Zellen: 200 – 500
- Zelltemperatur: 80 – 120 °C

Literatur

- Center Fuel Cell Industrialization 2019
- B.D. James et al. "Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update"

3.2.3 Komponenten der PEMFC

Im Folgenden werden die Komponenten des PEMFC-Stacks einzeln vorgestellt. Zudem werden relevante Schlüsselparameter und mögliche Produktionstechnologien der jeweiligen Komponenten näher beleuchtet. Es wird dabei erst die Komponente beschrieben und anschließend mithilfe einer Ampel bewertet, wie hoch der Einfluss auf die finalen Kosten des Stacks, wie kritisch die Komponente bzgl. der Gesamtlebensdauer

des Stacks und wie komplex dessen Herstellung ist. Grün steht dabei jeweils für einen geringeren Anteil an den finalen Kosten, bedeutet nicht Lebenszeit einschränkend und meint eine einfache Fertigung. Rot steht für einen höheren Anteil an den Stackkosten, kurze Lebensdauer und komplexere Herstellungsprozesse. Anschließend werden die möglichen und üblichen Produktionstechnologien vorgestellt.

Bipolarplatte (BPP)

Die Bipolarplatte vereint eine Vielzahl von Aufgaben und Funktionen zum Betrieb einer Brennstoffzelle. In jeder Einzelzelle wird auf der Anodenseite Wasserstoff und auf der Kathodenseite Sauerstoff über die Kanalstrukturen der BPP zur MEA geleitet. Neben der Zellseparation und der Verteilung dieser Reaktionsmedien ist eine zentrale Funktion der BPP die elektrische Leitung der Elektronen. Zusätzlich wird durch die innen liegende Kanalstruktur der BPP Reaktionswärme mittels eines Kältemittels abgeführt. Die BPP gibt einer Einzelzelle ihre mechanische Festigkeit und positioniert die weiteren Komponenten in der Brennstoffzelle. Durch die hohe Anzahl an Einzelzellen pro Stack ist die BPP in Bezug auf Systemkosten und Systemmasse ein Hauptbestandteil einer PEMFC.

Aus den Funktionen der BPP ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an diese Komponente. Die Kanalstruktur der BPP muss so geschaffen sein, dass sie eine homogene Verteilung der Medien innerhalb der Zelle gewährleistet. Der optimale Aufbau der Kanalstruktur hängt dabei von den Betriebsbedingungen des Stacks ab. Um eine möglichst hohe Effizienz der Brennstoffzelle erreichen zu können, muss der elektrische Widerstand der BPP möglichst gering gehalten werden, gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass

die BPP sowohl auf der Anodenseite als auch auf der Kathodenseite chemisch stabil und korrosionsbeständig ist. Bei metallischen BPP muss zusätzlich die Wasserstoffversprödung beachtet werden, bei welcher der Wasserstoff in das Metall der BPP eindringen kann und somit die Materialeigenschaften negativ verändert. Die angesprochene Abführung der Reaktionswärme erfolgt durch deionisiertes Wasser, das als Kühlmittel genutzt und durch den Kühlkreislauf des Systems und durch die BPP geleitet wird. Durch die Deionisierung des Wassers wird seine Leitfähigkeit deutlich reduziert und Kurzschlüsse innerhalb der Zelle werden vermieden. Bei metallischen BPP ist zusätzlich eine Beschichtung erforderlich, um eine bessere Korrosionsbeständigkeit und eine optimierte elektrische Leitfähigkeit zu erreichen.

Eine BPP kann aus verschiedenen Materialien hergestellt werden. Edelstahl ist dabei der vielversprechendste Substratwerkstoff hinsichtlich einer wirtschaftlichen Großserienfertigung, vor allem in mobilen Anwendungen, aufgrund seiner wirtschaftlichen Vorteile in der Verarbeitung. Weitere Metalle wie Titan oder Aluminium sowie Nichtmetalle wie Graphit oder Verbundmaterialien können eingesetzt werden. Die erforderlichen Bearbeitungsverfahren hängen stark von der Materialwahl ab, insbesondere davon, ob es sich um einen metallischen oder nichtmetallischen Werkstoff handelt. Unabhängig von den Materialien muss die BPP jedoch auf beiden Seiten mit mindestens dem Strömungsfeld funktionalisiert sein. Eine BPP leitet die anodenseitig frei werdenden Elektronen einer Zelle zur Kathodenseite der benachbarten Zelle weiter. Damit ist in einer Bipolarplatte der negative Pol (Anode) einer Zelle und der positive Pol (Kathode) der benachbarten Zelle enthalten.

TABELLE 1 Übliche BPP-Materialien und ihre Eigenschaften

	Edelstahl	Titan	Aluminium	Reines Grafit	Grafit-Verbundwerkstoff
Kosten (hoch > mittel > niedrig)					
Korrosionsbeständigkeit (niedrig > mittel > hoch)					

Abhängig von der Anwendung, der erwarteten Leistung und Lebensdauer sowie der Wirtschaftlichkeit der Produktion gibt es eine Vielzahl an möglichen Materialien, die für BPP in Betracht kommen. Eine Übersicht ist in Tabelle 1 gezeigt.

Da die Materialstärke der metallischen BPP im Vergleich zu der von Verbundwerkstoffen oder Grafit deutlich geringer ausfallen kann, können durch den Einsatz von metallischen Platten höhere volumetrische und auch gravimetrische Leistungsdichten des Brennstoffzellenstacks realisiert werden. Daher werden für den Einsatz im Pkw vor allem BPP aus Titan oder Edelstahl genutzt. Im Nutzfahrzeugbereich oder in stationären Anwendungen, in denen hohe Anforderungen an die Lebensdauer gestellt werden und die Leistungsdichte weniger relevant ist, werden zumeist BPP aus Grafit-Verbundwerkstoffen eingesetzt. In Anwendungen mit hohen Anforderungen an das Systemgewicht, z. B. der Luftfahrt, wird vermehrt auf das kostenintensivere Titan gesetzt. In den beiden folgenden Unterkapiteln werden die beiden Gruppen metallische und nichtmetallische BPP näher untersucht.

Kennzahlen BPP

- Leistungsdichte: 1 – 1,5 W / cm²
- Zellspannung: 0,6 – 0,7 V
- Zelldruck: 2 – 3 bar
- Luftstöchiometrie: 1,5

Metallische Bipolarplatten

Durch immer weiter steigende Anforderungen hinsichtlich der Gewichtsreduktion des Brennstoffzellenstacks und der Verkleinerung der geometrischen Abmessungen ist in Bezug auf Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ein klarer Trend in Richtung metallischer Bipolarplatten zu erkennen. Insbesondere steht in diesem Zusammenhang die Weiterentwicklung von Edelstahlplatten in Richtung hoher Lebensdauer durch Materialoptimierung und Beschichtungen im Fokus. Edelstahlmaterialien weisen gute mechanische Eigenschaften auf und lassen sich im Sinne einer Hochvolumenproduktion hinsichtlich der Produktionsschritte Umformen, Schneiden und Fügen besser verarbeiten. Titanmaterialien sind vorteilhaft in Bezug auf ihre geringe Dichte bei gleichzeitig höherer Korrosionsbeständigkeit. Im Vergleich zu Edelstahlmaterialien stellen Titanmaterialien allerdings wiederum eine größere Herausforderung in der

Umformung dar, und zwar aufgrund der Restriktionen bezüglich des Umformvermögens. Mit amorphem Kohlenstoff beschichtetes Titan wurde beispielsweise für den Toyota Mirai I verwendet. Weitere Anstrengungen werden forschungsseitig hinsichtlich einer Verwendung von Aluminium als Basismaterial für metallische Bipolarplatten unternommen. Aluminium hat Vorteile im Gegensatz zu Edelstahlmaterialien, z. B. eine geringe Dichte und eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Allerdings ist es in der Betriebsumgebung der Brennstoffzelle sehr korrosionsanfällig, sodass der Qualität der Beschichtung eine große Bedeutung zukommt.

Metallische BPP bestehen üblicherweise aus zwei gefügten Halbschalen. Diese werden zunächst umgeformt und geschnitten. Typische Blechstärken liegen zwischen 50 und 100 μm . Im umgeformten Zustand nach Einbringen der Kanalstrukturen ist die ungefähre

Höhe einer Halbschale, in Abhängigkeit von der jeweiligen Kanalbreite, in einem Bereich von 250 bis hin zu 500 μm realisierbar. Wesentliche produktionstechnologische Merkmale der Platten sind die Kanaltiefen und Umformradien, die ein definiertes Strömungsverhalten ermöglichen sollen.

Die vier wesentlichen Prozessschritte der BPP-Produktion sind: Umformen, Schneiden, Fügen und Beschichten. Diese Hauptprozesse einer typischen Prozesskette sind in Abbildung 11 dargestellt. In Abhängigkeit der Anwendung und des Werkstoffs müssen nicht alle BPP diese vier Prozessschritte in dieser Reihenfolge durchlaufen. Beispielsweise kann bei der Nutzung von vorbeschichteten Materialien auf eine Beschichtung im Produktionsprozess verzichtet werden.

ABBILDUNG 10 Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen einer metallischen Bipolarplatte mit umgeformten Strömungsfeld



Kosten



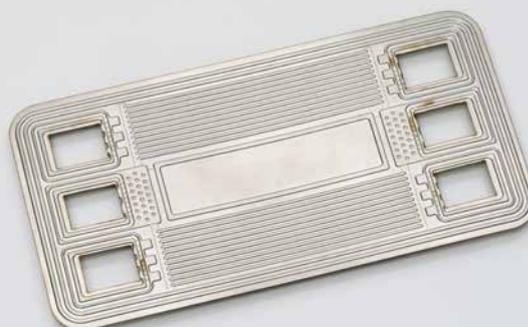
Lebensdauer



Komplexität

Kennzahlen

Lebensdauer	Bis zu 10.000 h (in Abhängigkeit von Material, Beschichtung und Anwendung auch länger)
Stahlpreis	2.500 €/t
Dichte Stahl	8 kg/dm ³
Materialstärke	0,05 – 0,1 mm



Quelle: Center Fuel Cell Industrialization

ABBILDUNG 11 Ein mögliches Prozessschema für die Produktion von metallischen Bipolarplatten



Umformen

Der Vorgang des Umformens im Allgemeinen ist durch die Einbringung der geometrischen Form der Bipolarplatte in ein Blechhalbzeug charakterisiert. Ein häufig angewendetes Verfahren ist eine Kombination aus Prägen und Tiefen, bei dem das Blech in einer Presse zwischen zwei metallischen Werkzeughälften, welche die Zielgeometrie aufweisen, geformt wird. Dieses Verfahren wird häufig als Stanzen (engl. Stamping) bezeichnet. Wenn mittels eines hydrostatischen Drucks umgeformt wird, kann eine der Werkzeughälften durch ein Fluid (Hydroforming) oder ein Elastomer (Rubberforming) ersetzt werden, wodurch Kostenvorteile generiert werden können. Das Rubberforming eignet sich vorrangig für kleine Stückzahlen, da eine Automatisierung sehr aufwendig ist und das Elasto-

mer bereits bei mittleren dreistelligen Hubzahlen Verschleißerscheinungen aufweist. Neben anderen diskontinuierlichen Verfahren wie dem Hochgeschwindigkeitsumformen ist die kontinuierliche Umformung beispielsweise mittels Prägewalzen Gegenstand der Forschung. Ein Vergleich der genannten Produktionstechnologien ist in Tabelle 2 gezeigt.

Aufgrund der geringen Prozessdauer, der hohen Automatisierbarkeit und der hohen Technologiereife ist das Stamping das am häufigsten eingesetzte Umformverfahren für die Produktion der BPP. Der vergleichsweise hohe Verschleiß durch den Kontakt von Blech und metallischem Umformwerkzeug muss durch eine entsprechende Schmierung oder Anpassungen im Umformprozess reduziert werden. Das Hydroforming

TABELLE 2 Umformprozesse für metallische Bipolarplatten

	Stamping	Hydroforming	Rubberforming	Hochgeschwindigkeitsformen	Rolle-zu-Rolle-Umformung
Kosten					
Reife					
Industrialisierungspotenzial					
Zykluszeit [s]	1 – 2,5	5 – 10	5 – 10	< 20	N/A (niedriges TRL)
Werkzeugverschleiß					N/A

hat Vorteile hinsichtlich der Ausdünnung des Blechs entlang der Kanalwände, die Prozesszeit zur Umformung ist im Vergleich allerdings länger. Sowohl für das Rubberforming als auch für das Hochgeschwindigkeitsumformen gilt, dass diese Technologien zwar kostengünstiger sind, aber wegen der hohen Zykluszeiten und schlechteren Automatisierbarkeit ein geringeres Industrialisierungspotenzial aufweisen. Großes Potenzial wird dem Rolle-zu-Rolle-Umformen beigemessen, allerdings bedarf es in dem Bereich noch weiterer Entwicklungen.

Trennen

Trennverfahren sind notwendig, um die einzelnen Medienein- und -auslässe freizuschneiden und den Beschnitt der Endkontur umzusetzen. Zwei übliche Technologien zum Trennen metallischer Platten sind das Laserschneiden und das Scherschneiden. Bei Ersterem wird das zu schneidende Material lokal durch einen Laserstrahl aufgeschmolzen bzw. verdampft. Vorteile des Laserschneidprozesses sind die flexible Anpassung der Schneidgeometrie, geringe Prozesskosten sowie die weitestgehende Verschleißfreiheit. Die Investitionen hingegen sind höher als für eine Scherschneidanlage. Diese schneidet Material in einem mechanischen Prozess zwischen zwei Schneidkanten. Tabelle 3 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden Technologien.

Durch die höhere Flexibilität des Laserschneidens ist diese Technologie besonders für Entwicklungsprozesse sowie geringere Stückzahlen geeignet. Bei automatisierten Prozessen für höhere Stückzahlen müssen Lösungen für eine vollständige Automatisierung des Handlings und der Aufspannung der Platten für den Schneidprozess gefunden werden. Das Scherschneiden bietet sich insbesondere für höhere Stückzahlen

an, da es mit hoher Reproduzierbarkeit schneidet und sich hervorragend mit einem Stamping-Umformprozess in einem gemeinsamen Werkzeug umsetzen lässt.

TABELLE 3 **Schneidprozesse für metallische Bipolarplatten**

	Laserschneiden	Scherschneiden
Kosten		
Reife		
Industrialisierungspotenzial	hoch	hoch
Zykluszeit [s]	> 100 m/min (Schneidgeschwindigkeit)	1 – 2,5
Werkzeugverschleiß		

Fügen

Beim Fügen werden zwei Halbschalen stoffschlüssig miteinander verbunden, sodass die elektrische Leitfähigkeit innerhalb einer Bipolarplatte verbessert wird und die Dichtheit der Komponente sichergestellt ist. Übliche Verfahren sind das Laserschweißen und das Kleben. Das Laserschweißen ist ein Verfahren, bei dem das Material des Bauteils lokal erhitzt und aufgeschmolzen wird. Das Fügen der BPPs mit Faserlasern kann in einer Zeit von weniger als 20 s pro Platte realisiert werden, wenn die Schweißnahtlänge pro BPP etwa 1 bis 2 Meter beträgt. Sowohl die Schweißnahtlänge als auch die resultierende Prozessdauer sind direkt von den Abmessungen der BPP bzw. dem festgelegten Design abhängig. Die Schweißgeschwindigkeit ist bei dünnen Materialien sehr hoch, jedoch liegen die üblichen Schweißdauern aufgrund der komplexen Geometrien und insbesondere der prozessspezifischen Handhabung bzw. Automatisierung immer noch zwischen 0,2 und 2 Minuten pro BPP.

TABELLE 4 **Fügeprozesse für metallische Bipolarplatten**

	Laserschweißen	Kleben
Kosten	 *	 *
Reife		
Industrialisierungspotenzial	hoch	hoch
Zykluszeit [s]	3 – 16	> 2 (abhängig von Klebstoff)
Werkzeugverschleiß		

* Die Kosten können nicht verglichen werden, da sie stark vom gewählten Produktionsszenario abhängen

Beim Kleben wird ein adhäsiver Film auf die Oberflächen der zu verbindenden Werkstücke aufgetragen. Unter Druck werden die beiden Halbschalen für die Dauer der Aushärtung aufeinandergepresst. Je nach BPP-Design besteht die Notwendigkeit, dass die Elektronen durch den verwendeten Klebstoff geleitet werden müssen. Entsprechend wichtig ist eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Beide Technologien werden in Tabelle 4 bezüglich einiger produktionsrelevanter Parameter verglichen.

Eine finale Bewertung anhand der Kosten hängt stark vom Produktionsszenario ab. Beispielsweise hat das Laserschweißen hohe Investitions- und niedrige Betriebskosten, während beim Kleben deutlich mehr Verbrauchsmaterial eingesetzt werden muss. Laserschweißen benötigt eine potenziell geringere Zykluszeit, die jedoch stark von den Eigenschaften der zu fügenden Halbschalen abhängt.

Beschichten

Im Allgemeinen werden BPP beschichtet, um die Korrosionsbeständigkeit und die elektrische Leitfähigkeit zu erhöhen. Dabei kann die Beschichtung entweder vor dem eigentlichen Produktionsprozess auf dem Grundmaterial aufgetragen werden oder im Verlauf der Prozesskette nach dem Fügen. Bei der Beschichtung werden nanoskalige Schichten aufgebracht, welche die Oxidation des Eisens im Substrat verzögern. Typische Beschichtungsverfahren lassen sich unterteilen in die Abscheidung aus der Gasphase (Physical Vapour Deposition (PVD) und Chemical Vapour Deposition (CVD)), die Änderung der Stoffeigenschaften durch Begasen (Nitrierung) und die Abscheidung aus Flüssigkeiten (Galvanisieren). Zusätzlich kann das Verfahren der Beschichtung aus Flüssigkeiten mit anschließender Laserbehandlung genannt werden. Insbesondere das Abscheiden aus der Gasphase durch geordnete Kondensation auf der BPP ist ein marktübliches Verfahren, das zu einer stabilen Schicht führt. Materialien der Beschichtung können organische Beschichtungen wie Kohlenstoff oder Edelmetalle wie Gold oder Titan/Chrom-Nitrid sein. Es ist jedoch zu beachten, dass die Notwendigkeit, im Vakuum zu beschichten, einen wesentlichen zeitlichen und kostentechnischen Zusatzaufwand bedeutet. Galvanische Prozesse laufen zwar schneller, kontaminieren aber evtl. die MEA durch Fremdatome, sobald die Zelle in Betrieb genommen wird. Tabelle 5 zeigt die verschiedenen Beschichtungsverfahren und ihre Potenziale.

In bisherigen Entwicklungsarbeiten aus Industrie und Forschung konnte das Industrialisierungspotenzial des PVD-Beschichtens und des Galvanisierens nachgewiesen werden. Aufgrund der nicht erwünschten fremden Metallatome durch das Galvanisieren stellt das PVD-Verfahren den aktuellen Stand der Technik dar.

TABELLE 5 Beschichtungstechnologien für metallische Bipolarplatten

	PVD	CVD	Nitrieren	Galvanisches Beschichten
Kosten				
Reife				
Industrialisierungspotenzial				
Zykluszeit [s]	2 – 5	3 – 4	N/A	N/A
Werkzeugverschleiß	–	–	–	–

Literatur

- B.D. James et al. "Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update"
- Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 4. Umformen*. Springer-Verlag Berlin, 5. Aufl., 2006, p. 449
- Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie, RWTH Aachen, 2021
- Center for Fuel Cell Industrialization 2020
- https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/fcto_bipolar_plates_wkshp_james.pdf
- K. Lee et al. "Fabrication of Titanium Bipolar Plates by Rubber Forming Process and Evaluation Characteristics of TiN coated Titanium Bipolar Plates" *FUEL CELLS* 15 (2014)
- <https://www.siempelkamp.com>
- <https://rformbplates.weebly.com>
- https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/27199/4/ICHSF2010_Shang.pdf
- Patent US 2005/02173334 A1
- <http://i2fg.org/impulse-forming/joining-by-high-velocity-forming/>
- Psyk et al. „Electromagnetic forming– A review“ *JOURNAL OF MATERIAL PROCESSING TECHNOLOGY* 211 (2011)
- <https://www.laserschneiden-marktplatz.de/lasern-von-brennstoffzellen>
- <https://publications.anl.gov/anlpubs/2017/11/137641.pdf>
- <https://patentimages.storage.googleapis.com/d6/1e/11/b4671feddb72f0/US8089027.pdf>
- https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/de/documents/Jahresberichte/jb12/JP12_S75.pdf
- <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:785647481/Untersuchung-des-Einsatzes-von-Klebstoffen-zur?cHash=562e941895f92da98fe88f736c5f196b>
- <https://www.springerprofessional.de/fertigungstechnik/energietechnik/brennstoffzellen-einfach-kleben/6593602>
- <https://vaportech.com/equipment-2020/small-medium-capacity-coater/>
- <https://vaportech.com/equipment-cvd/>
- S. Shu et al. "Significant enhancement of corrosion resistance of stainless steel with nanostructured carbon coatings by substrate-catalytic CVD" *APPLIED NANOSCIENCE* (2020)
- L. Mustafi et al. "Deposition behavior and tribological properties of diamond-like carbon coatings on stainless steels via chemical vapor deposition" *INTERNATIONAL JOURNAL OF MINERALS, METALLURGY AND MATERIALS* 25 (2018) 1335
- <https://matenggroup.wordpress.com/nitriding-process>
- <https://www.nitrex.com/nitriding-equipment-heat-treating-furnaces/nitriding/#toggle-id-17>
- <https://www.corrosionpedia.com/definition/1413/galvanic-coating>
- <https://www.andritz.com/metals-en>

Nichtmetallische Bipolarplatten

Die meisten nichtmetallischen BPP-Werkstoffe basieren auf Grafit. Reiner Grafit ist in heutigen Anwendungen selten zu finden, da er nur zerspanend zu BPPs verarbeitet werden kann. Zerspanende Bearbeitungsprozesse in der BPP-Herstellung sind aufgrund der vergleichsweise langen Zykluszeiten für die meisten heutzutage relevanten Anwendungen ungeeignet. Eine Hochskalierung der Produktion von Grafit-BPP ist daher mit den verfügbaren Fertigungsverfahren nur schwierig denkbar. In Kombination mit Kunststoffen als Grafit-Verbundwerkstoff hingegen kann die Compound-BPP mit schnelleren Produktionsverfahren hergestellt werden. Daher liegt der weitere Fokus auf Grafit-Polymer-Verbundwerkstoffen (GPC, engl. Graphite-Polymer-Composites). Der größte Vorteil der GPC-BPP gegenüber metallischen BPP ist die deutlich höhere

Lebensdauer von bis zu 30.000 h. Nachteile hingegen sind die höhere Gasdurchlässigkeit für Wasserstoff (H_2), die geringere elektrische Volumenleitfähigkeit und die geringere Festigkeit. Aufgrund des höheren Permeationskoeffizienten für Wasserstoff haben GPC-BPPs in der Regel höhere Wandstärken als metallische BPP. Dies stellt vor allem bei Anwendungen, bei denen der Bauraum kritisch ist, beispielsweise in Pkws, einen Nachteil dar.

Das Grafit innerhalb von GPC-BPP übernimmt die Funktion der Leitfähigkeit und Festigkeit. Neben verschiedenen Arten von Grafit (Naturgrafit, synthetischer Grafit, Blähgrafit) werden weitere kohlenstoffbasierte Füllermaterialien wie Ruß, Carbon Nano Tubes oder Kohlenstofffasern eingesetzt, um die Leitfähigkeit und Festigkeit der BPP zu erhöhen. Der Kunststoff übernimmt lediglich die Funktion des Binders des

ABBILDUNG 12 Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen einer nichtmetallischen GPC-Bipolarplatte

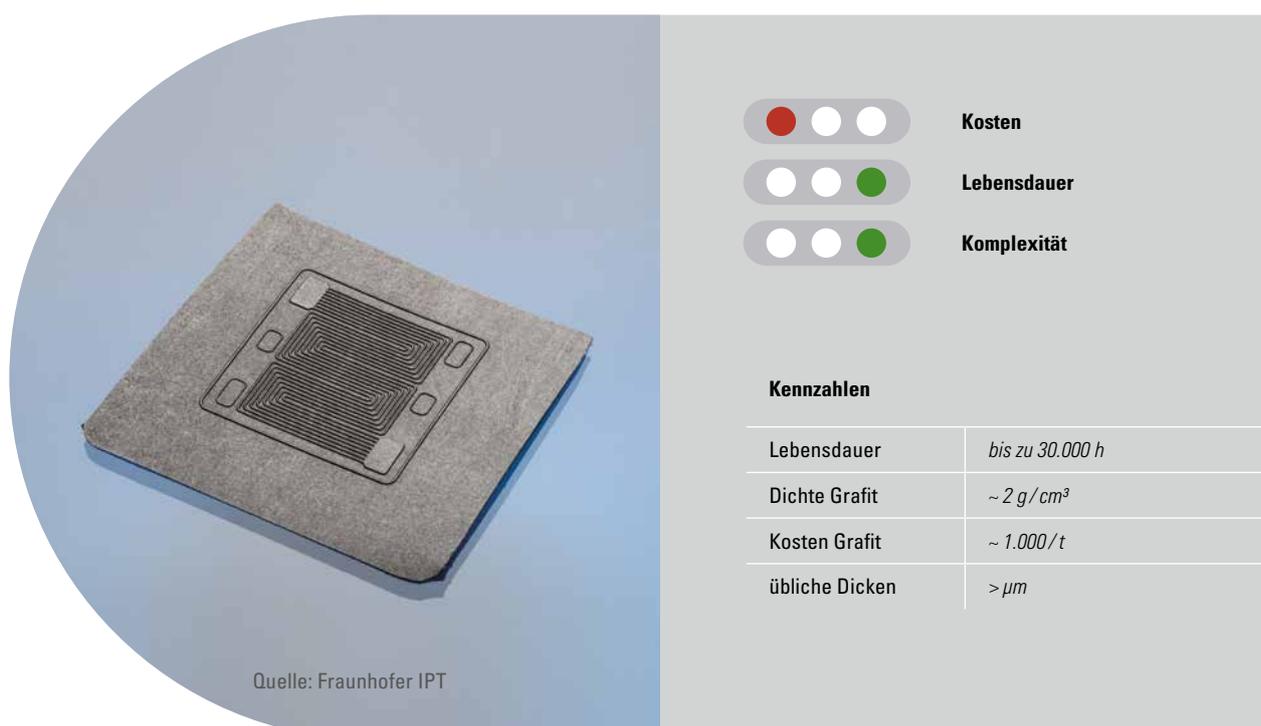


ABBILDUNG 13 Prozesskette zur Herstellung von Grafit-Polymer-Verbund BPP



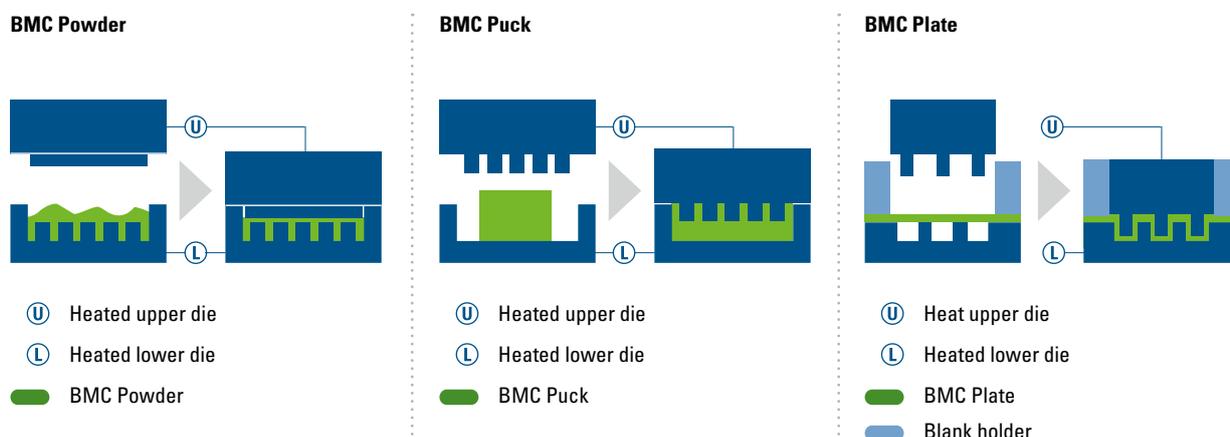
grafitischen Füllers und ermöglicht die Verarbeitbarkeit in Kunststoffformgebungsprozessen. Da der für die Brennstoffzelle funktional wichtige Anteil auf dem Füllmaterial beruht, werden in der Regel möglichst hohe Füllgehalte angestrebt. Typische Füllergehalte liegen bei über 70 Vol.-%. Die generelle Prozesskette zur Herstellung von GPC-BPP beginnt mit einem Formgebungsprozess, durch den das Rohmaterial in die BPP-Geometrie gebracht wird. In der Regel ist ein Nachbearbeitungsschritt notwendig, um den Kontaktwiderstand der Oberfläche zu reduzieren. In Abhängigkeit des Zelldesigns kann ein Fügeschritt auch bei GPC-BPP erforderlich sein. Hierzu wird häufig auf Schweiß- oder Klebeverfahren zurückgegriffen.

Innerhalb der nichtmetallischen GPC-BPP werden zwei Arten von Kunststoffen verwendet, Duromere und thermoplastische Kunststoffe. Je nach Kunststoff unterscheiden sich die Formgebungsprozesse.

Formprozesse für duromere grafitische BPP

Duromere zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine vernetzte molekulare Struktur aufweisen. Daher sind sie nicht schmelzbar. Für die Formgebung liegen Duromere als Harz in einer chemischen Vorstufe vor. Dies bedingt, dass in duromeren Formgebungsprozessen immer eine Aushärtereaktion notwendig ist. Typischerweise liegen duromere GPC-Formmassen als Pulver,

ABBILDUNG 14 Schematische Darstellung des Pressformprozesses für Formmassen (BMC, engl. Bulk Molding Compound) als Pulver (links), als Puck (Mitte) und als Flächenhalbzeug (rechts)



Puck oder als flächiges Halbzeug vor. Diese Formmassen werden in beheizten Presswerkzeugen unter Druck in Form gepresst und durch den Eintrag von Wärme ausgehärtet. Der große Vorteil von duromeren Formmassen ist, dass Füllgehalte von über 80 Vol.-% erzielt werden können. Der Nachteil von duromeren GPC-BPP-Prozessen ist, dass die Zykluszeiten durch den Aushärteprozess beschränkt sind. Typische Zykluszeiten liegen zwischen 1 und 20 min.

Formprozesse für thermoplastische grafitische BPP

Thermoplaste zeichnen sich dadurch aus, dass sie schmelzbar sind und sich oberhalb der Schmelztemperatur formen lassen. Dadurch, dass thermoplastische Kunststoffe keine Aushärtereaktion benötigen, sondern beim Abkühlen erstarren, sind geringere Zykluszeiten als bei Duromeren möglich. Typischerweise werden thermoplastische GPC im Spritzgießen zu BPP verarbeitet. Dieser vollständig automatisierte Prozess ermöglicht die Herstellung von BPP mit Zykluszeiten von ca. 20 s, die deutlich geringer sind als beim duromeren Formpressen. Jedoch sind die Prozesszeiten noch immer deutlich höher als bei metallischen Umformprozessen, die derzeit bei 5 bis 10 s liegen. Außerdem sind die Füllgehalte typischerweise geringer als bei duromeren GPC-BPP. Es existieren auch thermoplastische Compounds, die im Formpressen verarbeitet werden, diese sind jedoch seltener zu finden als Spritzgießcompounds.

In der Forschung wird derzeit sowohl für duromere als auch für thermoplastische GPC an Rollformprozessen gearbeitet, bei denen flächige GPC-Halbzeuge kontinuierlich zu BPP umgeformt werden. Es wird davon ausgegangen, dass somit Zykluszeiten von ungefähr 3 s pro BPP ermöglicht werden. Damit ist das Rollformen von GPC-Compounds zu BPP eine vielversprechende Zukunftstechnologie.

Nachbearbeitung

In Spritzgieß- und Formpressprozessen entsteht in der Regel eine kunststoffreiche Deckschicht an der Oberfläche der BPP. Um den Kontaktwiderstand zu verringern, muss diese entfernt werden. Hierzu kommen typischerweise Plasmaverfahren oder mechanisch abrasive Verfahren zum Einsatz. Bei der Herstellung von GPC-BPP im Rollformverfahren konnte teilweise beobachtet werden, dass keine kunststoffreiche Deckschicht entstand, wodurch das Potenzial zu einer weiteren Zykluszeitenreduktion für dieses Verfahren gegenüber Formpressen und Spritzgießen gegeben ist. Jedoch müssen im Rollformverfahren kontinuierlich hergestellte GPC-BPP vereinzelt werden.

Literatur

- Renato A. Antunes, Mara C. L. de Oliveira, Gerhard Ett, Volkmar Ett, Carbon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of the main challenges to improve electrical performance, *Journal of Power Sources*, Volume 196, Issue 6, 2011, Pages 2945-2961, ISSN 0378-7753
- <https://eisenhuth.de/en/components-for-fuel-cells-redox-flow-batteries-and-electrolysers/>
- https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/fcto_bipolar_plates_wkshp_norley.pdf
- S. Porstmann, T. Wannemacher, W.-G. Drossel, A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bipolar plates including anticipated future industry trends, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 60, 2020, Pages 366–383, ISSN 1526-6125

Membran-Elektroden-Einheit (MEA)

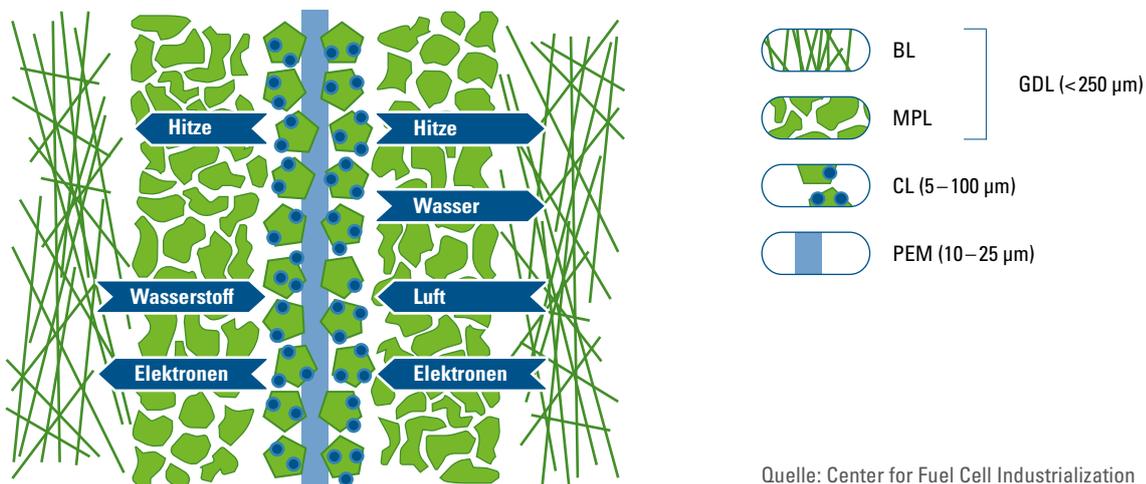
Die Membran-Elektroden-Einheit, kurz MEA, besteht, wie der Name bereits andeutet, aus verschiedenen Subkomponenten: der Protonaustauschmembran mit zwei beidseitig aufgetragenen Elektroden, einem Dichtungsrahmen und den Gasdiffusionslayern (GDL). Die Kombination aus der Membran (engl. Proton Exchange Membrane (PEM)) und den katalytischen Schichten (engl. Catalytic Layer (CL)) wird 3-schichtige MEA (MEA3L) genannt. Werden zusätzlich die Dichtungsrahmen und die GDL aufgebracht, spricht man von einer 7-schichtigen MEA (MEA7L).

Die Aufgabe der MEA ist die katalytische Umsetzung der Reaktionsgase, die elektrische Isolation der BPP und die Gleichverteilung der Medien. Diese Funktionen werden durch verschiedene Schichten erfüllt. Die ionische Polymerelektrolytmembran leitet fast ausschließlich die Wasserstoffionen, die Protonen, wohingegen Elektronen nicht durch sie hindurchfließen können. Damit der Wasserstoff mit dem Sauerstoff reagiert, wird ein Katalysator genutzt. Diese Umsetzung der Reaktionsgase wird durch auf Kohlenstoff

aufgebrachtes Platin als Katalysator ermöglicht. Die Schicht aus Kohlenstoff und Platin wird als katalytische Schicht (CL) bezeichnet. Der dritte Bestandteil der CL ist das gleiche ionenleitende Material, aus dem auch die Membran besteht. Durch die Beimischung dieses Ionomers soll eine möglichst gute ionische Leitung ermöglicht werden. Die drei Materialien Kohlenstoff, Ionomer und Platin sind wichtig, um sowohl die Protonen als auch die Elektronen vom katalytischen Zentrum abzuleiten und somit einen effizienten Betrieb zu ermöglichen. Diese Grenzfläche kann durch die Formulierung der Tinte und Wahl der Produktionstechnik beeinflusst werden. In Abbildung 16 ist eine mit CL beschichtete Polymerelektrolytmembran zu sehen. Übliche Dicken der Membran liegen zwischen 5 und 25 μm . Die CL je nach Leistungsdichte ist zwischen 5 und 100 μm dick.

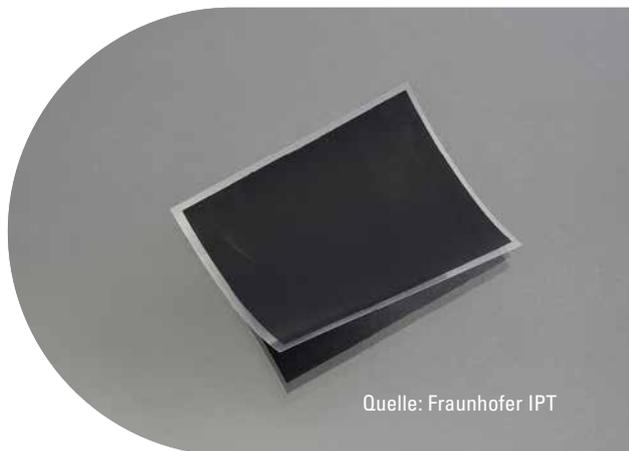
Neben den elektrochemischen Funktionen muss die MEA auch eine mechanische Stabilität aufweisen. So wird die Membran durch die mögliche Druckdifferenz während des Betriebs gebeugt. Neben den Kräften aufgrund der unterschiedlichen Drücke an Anode und Kathode können Schwingungen durch Vibrationen

ABBILDUNG 15 Aufbau einer PEM-Membran-Elektroden-Einheit



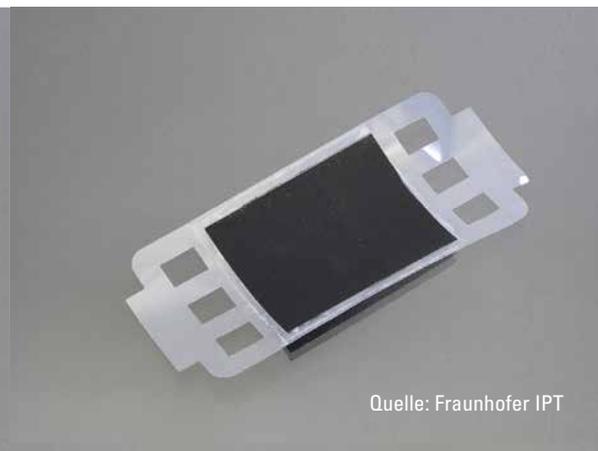
Quelle: Center for Fuel Cell Industrialization

ABBILDUNG 16 Exemplarische Darstellung der mit katalytischer Tinte beschichteten Protonenaustauschmembran



Quelle: Fraunhofer IPT

ABBILDUNG 17 Exemplarische Darstellung der in einen Dichtungsrahmen eingeklebten und mit katalytischer Tinte beschichteten Protonenaustauschmembran



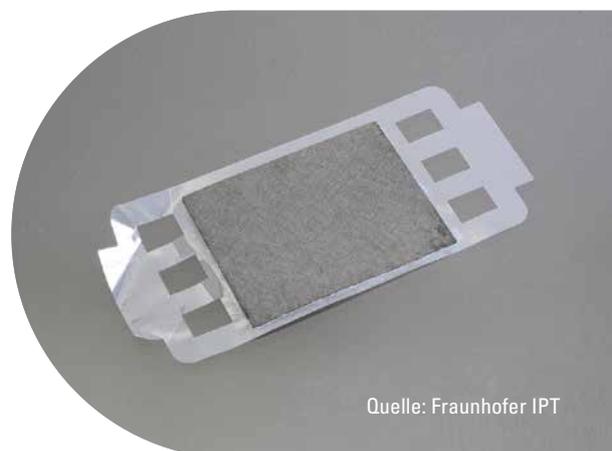
Quelle: Fraunhofer IPT

oder Scherkräfte durch Beschleunigungen des Fahrzeugs auf die MEA wirken. Um die dünne Membran zu stabilisieren und um eine geeignete Auflagefläche für die Dichtung zu bieten, kann ein Dichtungsrahmen genutzt werden. Dieser besteht typischerweise aus Polyethylenphthalat (PEN). Der Dichtungsrahmen muss wie die Membran elektrisch isolieren. Häufig sind die Rahmen einseitig mit einem temperatur- oder druckvernetzenden Adhäsiv versehen, um die Membran zu fixieren. Typische Dicken des Dichtungsrahmen liegen zwischen 25 μm und 100 μm . Die Dicke richtet sich auch nach der Schichthöhe der CL. In Abbildung 17 wird eine mit Dichtungsrahmen versehene $\text{MEA}_{3\text{L}}$ dargestellt.

Die Gasdiffusionsschicht ist die Komponente zwischen der CL und der BPP und kontaktiert diese elektronisch. Sie besteht aus zwei Schichten, der mikroporösen Schicht aus gesinterten Kohlenstoffpartikeln und der unterstützenden Schicht aus Fasern. Beide Schichten sind mit Polytetrafluorethylen (PTFE) imprägniert und helfen so, das Reaktionsprodukt Wasser auszutragen.

Zusätzlich führt ihre poröse Struktur zur Gleichverteilung der Reaktionsgase. In Abbildung 18 ist eine beispielhafte $\text{MEA}_{7\text{L}}$ dargestellt.

ABBILDUNG 18 Exemplarische Darstellung der in einen Dichtungsrahmen eingeklebten und mit katalytischer Tinte beschichteten Protonenaustauschmembran mit aufgebrachtem Gasdiffusionslayer



Quelle: Fraunhofer IPT

ABBILDUNG 19 Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen einer Protonenaustauschmembran



Kennzahlen

Dicke	5 – 25 μm
Volumenänderung	1 – 10 %
Wasserstoffdiffusion	< 0,015 ml/min*cm ²



Quelle: Fraunhofer IPT

Die durch die einzelnen Lagen bestimmte Gesamtdicke der MEA liegt zwischen 200 μm und 400 μm . Typische Schichtdicken der einzelnen Lagen können Abbildung 19 entnommen werden.

Die Degradation innerhalb der MEA ist ein haltbarkeitsbestimmender Faktor, der wesentlich von der Materialauswahl sowie dem Design und während des Betriebs von der Beanspruchung und Betriebsweise abhängt. Insbesondere die elektrochemische Degradation der Membran, des Katalysators und der GDL in Form von Kohlenstoffzersetzung, Fremdioneneinlagerung und Auswaschung von PTFE ist eine häufige Degradationserscheinung. Physikalische Degradation betrifft neben dem Reißen oder Punktieren der PEM eher die Agglomeration von Katalysatorpartikeln oder das Ablättern und die Rissbildung der CL und GDL.

Proton-Austausch-Membran

Um die PEMFC möglichst effizient zu betreiben, muss die PEM eine möglichst hohe ionische und eine möglichst geringe bzw. nicht vorhandene elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Neben diesen funktionalen Merkmalen benötigt die Membran eine mechanische Stabilität. Daher kann die PEM aus zwei Hauptkomponenten bestehen: dem Ionomer und einem Strukturmaterial, wobei auch Ausführungen existieren, die auf das Strukturmaterial verzichten.

Als Ionomere werden synthetische Polyelektrolyte verwendet, die sowohl aus stabilisierenden als auch aus funktionellen Gruppen bestehen, die zufällig und/oder regelmäßig entlang des Polymerrückgrats verteilt sind. Die Ionenleitfähigkeit wird durch die Sulfonsäure-Gruppe ($-\text{SO}_3\text{H}$) ermöglicht, welche die zum Transport benötigten Leitungskanäle durch Mikrophasensepara-

tion ausbilden. Das am häufigsten eingesetzte Ionomer ist Perfluorsulfonsäure (PFSA) in Säureform. Als Verstärkungsmaterial wird häufig expandiertes Polytetrafluorethylen (ePTFE) verwendet.

Die Produktion der PEM kann sowohl über den Lösungsguss als auch über die Schmelzextrusion realisiert werden. Üblicherweise wird die Membran in der Stackproduktion allerdings als Zukaufteil gesehen. Die Herstellung losgelöst von der Technologie erfordert Wissen über großvolumiges Handling von gesundheitsgefährdenden, explosiven sowie umweltschädlichen Chemikalien und wird daher häufig durch explizite Membranhersteller abgedeckt.

Literatur

- B.D. James et al. "Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update"
- Center for Fuel Cell Industrialization 2020
- M. Toupin et al. "Techno Economics of a New High Throughput Process for Proton Exchange Membranes Manufacturing" EVS29 SYMPOSIUM (2016)

- E. H. Majlan et al. "Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review" RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS 89 (2018) 117–134
- <http://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Ionomers.html>

Katalytische Schicht

Die CL soll eine möglichst große Oberfläche an Katalysatormaterial zur Verfügung stellen, um die Oxidation des Wasserstoffs und die Reduktion des Sauerstoffs effektiv zu beschleunigen. Zusätzlich soll das entstandene Elektron vom Reaktionszentrum der Oxidation abgeleitet und zum Reaktionszentrum der Reduktion geleitet werden. Dies erfolgt durch elektrisch leitfähigen Kohlenstoff wie Ruße oder andere poröse Kohlenstoffe. Die Katalysatorschicht hat eine Dicke von 5 µm bis 100 µm. Der Trend geht jedoch eher in Richtung dünnerer Schichten, um einen geringen Materialbedarf und niedrige Widerstände zu haben bei gleichzeitig hoher Porosität und stark exponiertem Katalysator.

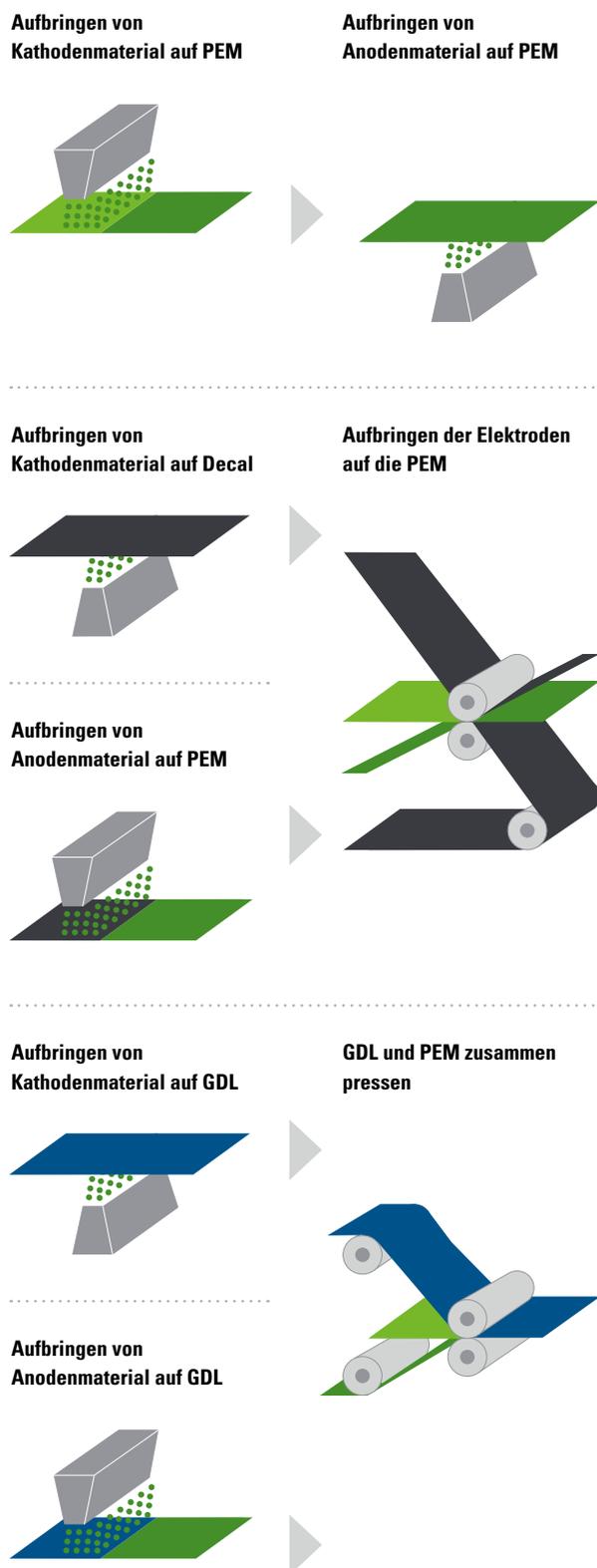
ABBILDUNG 20 Darstellung und qualitative Bewertung der katalytischen Tinte



Quelle: Fraunhofer IPT



ABBILDUNG 21 **Übersicht der verschiedenen produktionstechnologischen Möglichkeiten der Aufbringung der katalytischen Schicht**



Aufgrund der unterschiedlichen chemischen Bedingungen an den beiden Elektroden werden unterschiedliche Zusammensetzungen der Bestandteile und Schichtdicken auf der Anoden- und der Kathodenseite gewählt. Die CL wird aus dem katalytischen Gemisch hergestellt, das aus einem Kohlenstoffträger mit darauf abgeschiedenem Katalysatormaterial, einem hydrophoben Bindemittel, Lösungsmittel und dem Ionomer besteht. Der am häufigsten verwendete und effektivste Katalysator in Brennstoffzellen ist Platin (Pt) aufgrund seiner hohen katalytischen Aktivität und seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit. Durch die hohen Kosten wird jedoch versucht, den Pt-Anteil zu reduzieren. Dabei spielen Pt-Legierungen eine besonders wichtige Rolle. Auf diese Weise sollen die katalytischen Vorteile von Pt erhalten bleiben und die geringeren Kosten des Verbundmaterials genutzt werden. Neben einer Kostensenkung können Legierungen Toleranzen gegenüber Schadstoffen wie CO erhöhen und eventuell die Aktivität noch weiter steigern. Der effektiv nutzbare Katalysator kann auch durch geschickte Wahl der Produktionstechnologie erfolgen.

Aufbringung der katalytischen Schicht

Das Aufbringen der Katalysatorfarbe auf die PEM kann sowohl direkt als auch indirekt geschehen. Wie auf bereits geschildert, können durch Änderung von äußeren Gegebenheiten deutliche Geometrieänderungen der PEM beobachtet werden. Beispielsweise kann ein direkter Auftrag der lösemittelhaltigen Tinte zu einem Quellen der Membran führen. Dies kann vermindert werden durch eine Formulierung ohne organische Lösemittel und stattdessen mit z. B. Wasser. Alternativ ist die Beschichtung eines anderen Substrats mit anschließendem Übertrag auf die Membran, dem indirekten Beschichten wie in Abbildung 21 gezeigt, möglich. Eine weitere Möglichkeit kann die Beschichtung der GDL sein. Ein erheblicher Nachteil besteht in der

potenziell schlechteren Ausnutzung des Katalysators aufgrund die Unebenheit der GDL. Eine exemplarische Visualisierung der verschiedenen Auftragsuntergründe ist in Abbildung 21 gegeben.

ABBILDUNG 22 **Mögliche Fertigungsverfahren zur Aufbringung der katalytischen Schicht**



Beschichtungstechnologien können weitestgehend unabhängig von dem gewählten Beschichtungsverfahren (vgl. Abbildung 21) gewählt werden. Die verschiedenen Technologien müssen allerdings an die unterschiedlichen Tintenrezepturen und Membranen angepasst werden.

Nassbeschichtung

Bei einem Nassbeschichtungsverfahren wird eine Tinte bestehend aus dem katalytischen Gemisch auf ein Substrat abgeschieden. Dabei soll die Abscheidungsstärke steuerbar und der Prozess effizient in der Auftragsmenge und automatisierbar sein. Aufgrund der Viskosität des katalytischen Gemischs werden diese Erfordernisse am besten vom Schlitz-

düsenbeschichtungsverfahren erfüllt. Die üblichste Beschichtungsart in der Brennstoffzellenfertigung ist die Schlitzdüsenbeschichtung. Weitere Tintenauftragsverfahren sind: Siebdruck, Tintenstrahldruck, Sprühbeschichtung und andere.

Als Flüssigbeschichtungsverfahren bietet die Schlitzdüsenbeschichtung eine kostengünstige Beschichtung. Abhängig vom Trockner und der Formulierung der Tinte kann die Katalysatorausnutzung weniger effizient als mit anderen Fertigungstechnologien sein, was zu einem höheren Katalysatorverbrauch und damit zu höheren Kosten führt. Allen Nassbeschichtungstechnologien muss ein Trocknungsschritt nachfolgen. Auch hier gibt es verschiedenen Bauarten, die das finale Ergebnis entscheidend beeinflussen. Die Auswahl eines geeigneten Trockners ist allerdings stark von den Tinten abhängig. Mögliche Trockner sind Konvektionsöfen, IR-Strahler und Lasertrockner.

Literatur

- B. D. James et al. "Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update"
- Center for Fuel Cell Industrialization 2020
- E. H. Majlan et al. "Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review" RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS 89 (2018) 117–134
- S. Perez-Rodriguez et al. "Electrochemical behavior of the carbon black Vulcan XC-72R: influence of the surface chemistry" (2018)
- P. T. Yu et al. "Carbon-Support Requirements for Highly Durable Fuel Cell Operation" POLYMER ELECTROLYTE FUEL CELL DURABILITY (2009) 29–53
- M. J. Lazaro et al. "Study and application of carbon black vulcan XC-72R in polymeric electrolyte fuel cells" CARBON BLACK: PRODUCTION PROPERTIES AND USES (2011) Chapter 2

- <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/electrodeposition>
- Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie, RWTH Aachen
- P. E. Santangelo et al. "Review of Catalyst-deposition Techniques for PEMFC Electrodes" *TECNICA ITALIANA – ITALIAN JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE* 63 (2019) 65 –72
- https://www.tmaxcn.com/automatic-roll-to-roll-continuous-film-coating-machine-with-drying-oven-for-battery-electrodes_p504.html
- www.kex.net

Dichtungsrahmen

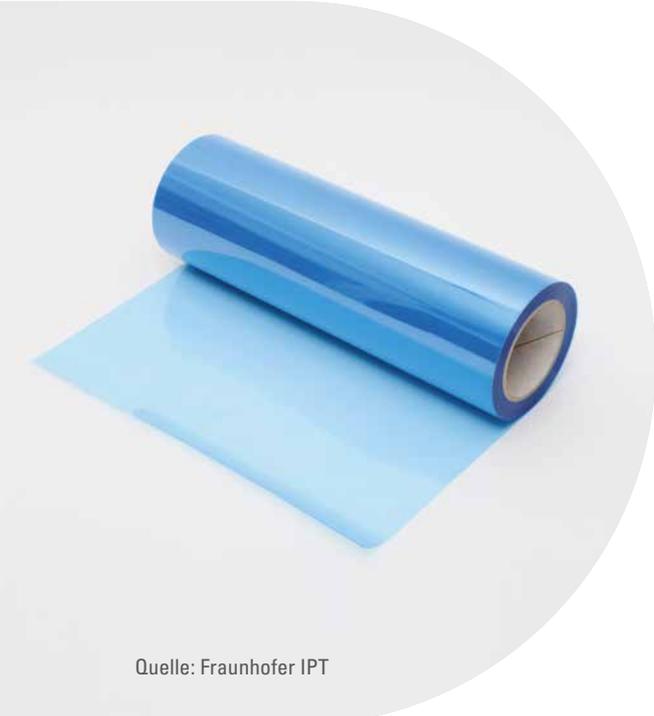
Der Dichtungsrahmen (engl. Subgasket) dient neben dem ePTFE-Gitter in der Membran der mechanischen Stabilisierung. Zusätzlich gleicht er die Größe zwischen aktiver Fläche der MEA bzw. Strömfeld der BPP und den Außengeometrien des Stacks aus. Auf ihm kann je nach Zelldesign die Dichtung aufliegen und er ermöglicht ein einfaches Aufbringen von möglichen Passermarken. Ein typisches Polymer, aus dem Subgaskets hergestellt werden, ist Polyethylnaphthalat, kurz PEN. Dieses Polymer hat ausreichend kleine Permeabilitätsraten von Wasserstoff und kann gut als Untergrund für eine Elastomerdichtung genutzt werden. Häufig sind diese Polymere einseitig mit thermisch oder drucksensitiver Klebe beschichtet, sodass sie auf die beidseitig mit CL

ABBILDUNG 23 Darstellung des Materials für einen Dichtungsrahmen, qualitative Bewertung und Kennzahlen des Dichtungsrahmens

Kosten
 Lebensdauer
 Komplexität

Kennzahlen

Dicke	5 – 100 µm
Material	Polyethylnaphthalat (PEN)



Quelle: Fraunhofer IPT

beschichtete PEM laminiert werden können. Üblicherweise ist das Subgasket je nach Zelldesign 25 µm bis zu 100 µm dick.

Die Applikation des Dichtungsrahmens auf die mit Katalysator beschichtete Membran erfordert eine hohe Präzision in der Ausrichtung an die aktive Fläche. Je nach Klebstoff auf dem Subgasket wird nach der Positionierung der Dichtraahmen laminiert. Die Rolle-zu-Rolle-Applikation des Dichtungsrahmens ist möglich.

Literatur

- B. D. James et al. "Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update
- Center Fuel Cell Industrialization 2020

Gas-Diffusions-Lage (GDL)

Durch die Gasdiffusionsschicht (GDL) werden die Reaktanten aus dem Strömungsfeld der BPP hin zur CL transportiert und möglichst homogen verteilt. Weiterhin wird durch die hydrophobe Struktur der GDL entstehendes Reaktionswasser aus der Brennstoffzelle ausgetragen. Die GDL besteht aus zwei Schichten: in der Regel aus einer Basisschicht (BL), die üblicherweise aus Wirrfasern oder non-crimped Fasern besteht, und einer mikroporösen Schicht (MPL), die eine wesentlich feinere Struktur hat. Häufig besteht die MPL aus gesinterten Kohlestoffpartikeln. Beide Schichten sind mit einem hydrophoben Binder imprägniert. Bei den hydrophoben Bindemitteln handelt es sich normalerweise um fluoriertes Ethylenpropylen (FEP), Polyvinylidendifluorid (PVDF) oder Polytetrafluor-

ABBILDUNG 24 Darstellung des Materials für die Gasdiffusionslage, qualitative Bewertung und Kennzahlen einer Gasdiffusionslage



ethylen (PTFE), die durch Nassbeschichtungsverfahren aufgebracht werden. GDLs sind verfügbar in Dicken zwischen 180 µm und 320 µm. Die Dicke ist abhängig vom Anpressdruck und daher ebenfalls entscheidend in der Stackauslegung.

Die GDL-Produktion ist im Vergleich zu den anderen MEA-Komponenten bereits höher skaliert. Durch die Ähnlichkeit des BL mit Papier können Prozesse aus der Papierherstellung genutzt werden. Der Auftrag des MPL ist ebenfalls ein aus der Papierveredlung bekannter Prozessschritt, der durch Unternehmen aus der Faserverbundindustrie auf die GDL appliziert wurde.

Aufgrund ihrer papierartigen Struktur müssen GDLs um Walzen mit großem Biegeradius gelegt werden, um nicht zu irreversibel verformt zu werden. Eine diskrete Verarbeitung ist daher üblicher und eine kontinuierliche Verarbeitung daher nur bedingt möglich. Folglich ist es üblicher, die GDL als bereits zugeschnittene Komponente auf die MEA zu legen. Fixiert werden kann diese durch ein Heißpressvorgang oder durch Klebstoff. Die kontinuierliche Applikation der GDL ist Gegenstand der Forschung.

Literatur

- James, B. et al.: Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2017 Update. 2017
- https://www.sainc.com/assets/site_18/files/publications/sa%202017%20transportation%20fuel%20cell%20cost%20analysis.pdf
- Center for Fuel Cell Industrialization 2020

Dichtung

Neben der BPP und der MEA hat das Dichtungskonzept auch einen großen Einfluss auf die Gesamtkonstruktion und damit auf den gesamten BZ-Stack. Neben dem Dichtrahmen spielt die Dichtung eine wichtige Rolle bei der Trennung der Reaktionsgase. Sie ist das Dichtungsmittel zwischen der BPP und der MEA, welches das Austreten von Fluiden aus dem Stack verhindert. Um ihren Zweck zu erfüllen, muss die Dichtung unabhängig von der Oberflächenrauigkeit ausreichend abdichten, Höhenunterschiede innerhalb vorgegebener Toleranzen ausgleichen und Vibrationen, Stauchungen und Druckabfall während des Einsatzes standhalten. Neben den mechanischen Anforderungen ist auch die chemische Beständigkeit, insbesondere in saurer Umgebung, bei unterschiedlicher Feuchtigkeit und hohen Ionenkonzentrationen, eine wichtige Voraussetzung. Auch eine breite thermische Stabilität in Bezug auf den Kaltstart der Brennstoffzelle und mögliche Temperaturgradienten sind für eine lange Lebensdauer unerlässlich.

ABBILDUNG 25 Darstellung und qualitative Bewertung einer Dichtung



Quelle: Center Fuel
Cell Industrialization /
Fraunhofer IPT

Viele Materialien können die gegebenen Anforderungen erfüllen, von denen nur einige weithin verfügbar und kosteneffizient zu verwenden sind. Abhängig von den Materialien können Dichtungen auf die BPP, auf die MEA oder als eingelegte Dichtung in der Stackmontage ausgelegt werden. Mit Blick auf die schnellen Taktzeiten bietet es sich an, Dichtungen vor der Stackmontage auf entweder die BPP oder die MEA zu applizieren. Häufiger werden jedoch die BPP als Untergrund gewählt, da sie einfacher in der Handhabung sind. Mögliche Aufbringungsverfahren sind Spritzguss, Siebdruck und Dispensen. Spritzguss bietet den Vorteil, beliebig komplexe Geometrien fertigen zu können, während die Zu- und Abführung sowie das Werkzeug im Vergleich zu Siebdruck und Dispensen komplexer sind. Dispensen bietet den Vorteil der schnellen Anpassung an neue Geometrien. Siebdruck hingegen kann dies mit einem geringen Kostenaufwand auch und verknüpft die Flexibilität mit einer guten Skalierbarkeit, wie in der Halbleiterbranche bewiesen wurde.

Literatur

- Properties and Degradation of the Gasket component of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell A Review; J. Jose, C. Nah, K. Jeong
- Fuel Cell and Hydrogen Association: Recommended Standard Test Methods for Fuel Cell Gasket Materials, S. 30, 2011
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1464285909702949>
- S. Pehlivan Davis: Polymer electrolyte membrane (PEM) Fuel cell seals durability, Loughborough University, October 2015, S.44–45

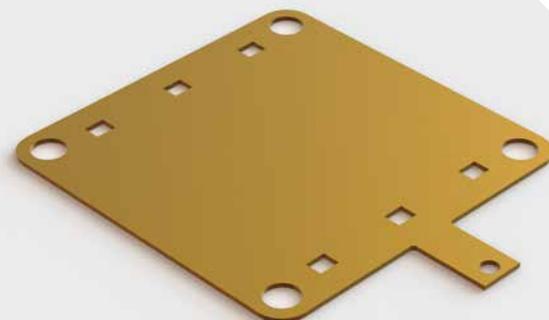
Stromkollektor

Die Stromkollektoren sind keine Wiederholeinheit wie die vorher beschriebenen Komponenten. Sie befinden sich an den äußeren Enden zwischen der letzten BPP und der Endplatte. Sie werden genutzt, um den äußeren Stromkreis (den Verbraucher) zu kontaktieren, und müssen daher eine ausreichende große Kontaktierungsfläche besitzen, um die Ströme zu- und abzuleiten. Dementsprechend ist die elektrische Leitfähigkeit die wichtigste Eigenschaft des Stromkollektors. Üblicherweise besteht er daher aus Kupfer. Das bevorzugte Herstellungsverfahren ist das Stanzen. Ebenfalls möglich sind Stromkollektoren aus Edelstahl. Für die Luftfahrt bieten sich analog zu den BPP Titanlegierungen aufgrund des geringeren Gewichts an. Da reines Titan an der Luft passivierende Oxidschichten bildet, ist eine Oberflächenbeschichtung nötig.

Literatur

- B. D. James et al. "Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update
- Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie 2020

ABBILDUNG 26 Darstellung und qualitative Bewertung eines Stromkollektors



Quelle: Fraunhofer IPT

Endplatte

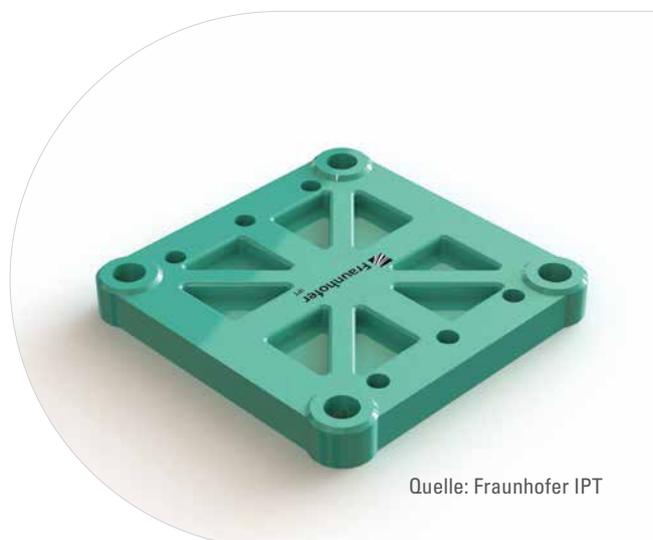
Die Endplatte bildet den Abschluss des Brennstoffzellenstacks auf beiden Seiten und wird ebenfalls nur zweimal pro Stack benötigt. Die wichtigsten Anforderungen an die Endplatte sind die richtigen mechanischen Eigenschaften, um die Spannung der Zugstäbe oder Bänder, die den Stack zusammenhalten, homogen über die Fläche zu verteilen. Der homogene Anpressdruck ist essenziell für das Dichtkonzept und ebenso wichtig, um Degradation durch inhomogene Kompression von z. B. GDLs zu vermeiden. Des Weiteren muss die Platte die Vorspannung halten, die sich durch die Elastizität der einzelnen Wiederholeinheiten einstellt und ebenfalls wichtig für die Dichtwirkung ist. In ihr werden Anschlüsse für Reaktionsgase und Kühlmittel angebracht. Damit ist sie auch Medienschnittstelleneinheit für die peripheren BoP-Systeme und muss daher ebenfalls

Eigenschaften aufweisen wie die Widerstandsfähigkeit gegenüber den Reaktionsmedien, insbesondere Wasserstoff. Die Herstellung der Endplatte erfolgt üblicherweise über Druckguss für Polymere oder Fräsen im Falle von metallischen oder polymerischen Bauteilen mit anschließender Aufbringung von Kunststoff zur Beschichtung.

Literatur

- B. D. James et al. "Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update
- Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie 2020

ABBILDUNG 27 **Darstellung und qualitative Bewertung einer Endplatte**



Quelle: Fraunhofer IPT



Fazit

Der PEMFC-Stack besteht aus mehreren Bauteilen, wobei nur die BPP, die MEA, die GDL und die Dichtung sich wiederholende Bauteile sind. Anhand der durchgeführten qualitativen Bewertungen jeder Komponente können diese nun bezüglich der drei Dimensionen Kosten, Komplexität und Haltbarkeit verglichen werden. Die Übersicht ist in Abbildung 28 dargestellt.

Die Membran-Elektroden-Einheit (MEA) ist basierend auf der qualitativen Bewertung die komplexeste Komponente. Das liegt einerseits an der komplexen Produktionstechnik, die nötig ist, um den schwierig zu handhabenden Ionomer beidseitig mit geringen Toleranzen zu beschichten, andererseits am nötigen Know-how, um die MEA für den späteren Betrieb korrekt auszulegen. Die Dicken der katalytisch aktiven Schichten auf dem Ionomer müssen zusätzlich im unteren zweistelligen μm Bereich mit hoher Genauigkeit appliziert werden, um eine effiziente Betriebsweise und keinen unnötigen elektrischen oder ionischen Widerstand zu haben. Mit sinkenden Schichtdicken haben Degradationen eine größere Auswirkung und müssen daher bei Auslegung und Produktion bedacht werden. Die hohe Komplexität der Auslegung und Herstellung verbunden mit den Anforderungen an die Haltbarkeit und damit die nötigen teuren Materialien wie Ionomer und Platin führt zu den höchsten Herstellkosten von allen Komponenten in einem Brennstoffzellenstack.

Die Gasdiffusionsschicht (GDL) ist weniger komplex, aber ebenso wichtig bezüglich der Haltbarkeit. Insbesondere die elektrische Kontaktierung zwischen MPL und CL muss lange und zuverlässig bestehen, um den Kontaktwiderstand gering zu halten. Die Kosten sind geringer als die der MEA. Grund dafür sind die bereits skalierten Produktionsprozesse aus der Papierindustrie und die niedrigeren Materialkosten.

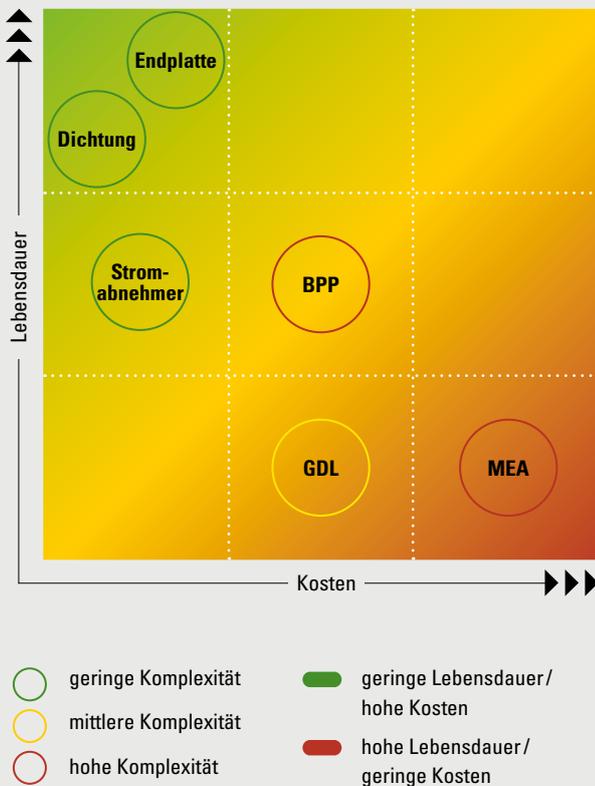
Ebenso komplex wie die MEA ist die BPP. Die beiden Komponenten müssen perfekt aufeinander abgestimmt sein und bedürfen einer hochgenauen Produktionstechnologie, um eine lange Betriebszeit zu ermöglichen. Die Kosten für die BPP sind geringer als die der MEA, hauptsächlich aufgrund der niedrigeren Materialpreise.

Dichtungen befinden sich zwischen der BPP und der MEA und sind daher auch in großer Stückzahl im Stack vorhanden. Die Komplexität im Vergleich zu den BPP und MEA ist gering, da sich Geometrie durch BPP und MEA ergibt. Die Materialauswahl kann auf Basis der Herstellerangaben erfolgen. Die Haltbarkeit ist ein wichtiger Faktor der Dichtung, aber weit weniger limitierend als die Haltbarkeit der MEA und daher etwas geringer eingestuft.

Der Stromkollektor spielt eine entscheidende Rolle bei der Haltbarkeit des Stacks und kann vorzeitig durch elektrochemische Korrosion ausfallen. Die Produktionskosten sind jedoch deutlich geringer im Vergleich zu der BPP oder der MEA. Insbesondere, da nur zwei Stromkollektoren pro Stack benötigt werden, bietet diese Komponente kaum ein Kostensenkungspotenzial.

Ähnlich wie die Stromkollektoren bieten die Endplatten nur ein kleines Kostensenkungspotenzial, da sie nur zweimal im Stack verbaut werden. Sie sind potenziell aus teuren Materialien gefertigt, aber durch die geringe Menge von zwei Stück pro Stack skalieren die Materialkosten weniger stark mit der Stückzahl als andere Komponenten. Die Komplexität ist relativ gering, da nur Gasanschlüsse und Druckverteilung berücksichtigt werden müssen. Die homogene Kraftverteilung könnte komplex sein, ist aber stark abhängig vom Design.

ABBILDUNG 28 Zusammenfassung der qualitativen Bewertungen der PEMFC-Stack Komponente



3.2.4 Komponenten der PEMFC-BoP

Die Balance-of-Plant (BoP) der PEMFC stellt die Versorgung des Brennstoffzellenstacks mit den für den Betrieb erforderlichen Medien und ihre Abführung aus dem Stack sicher.

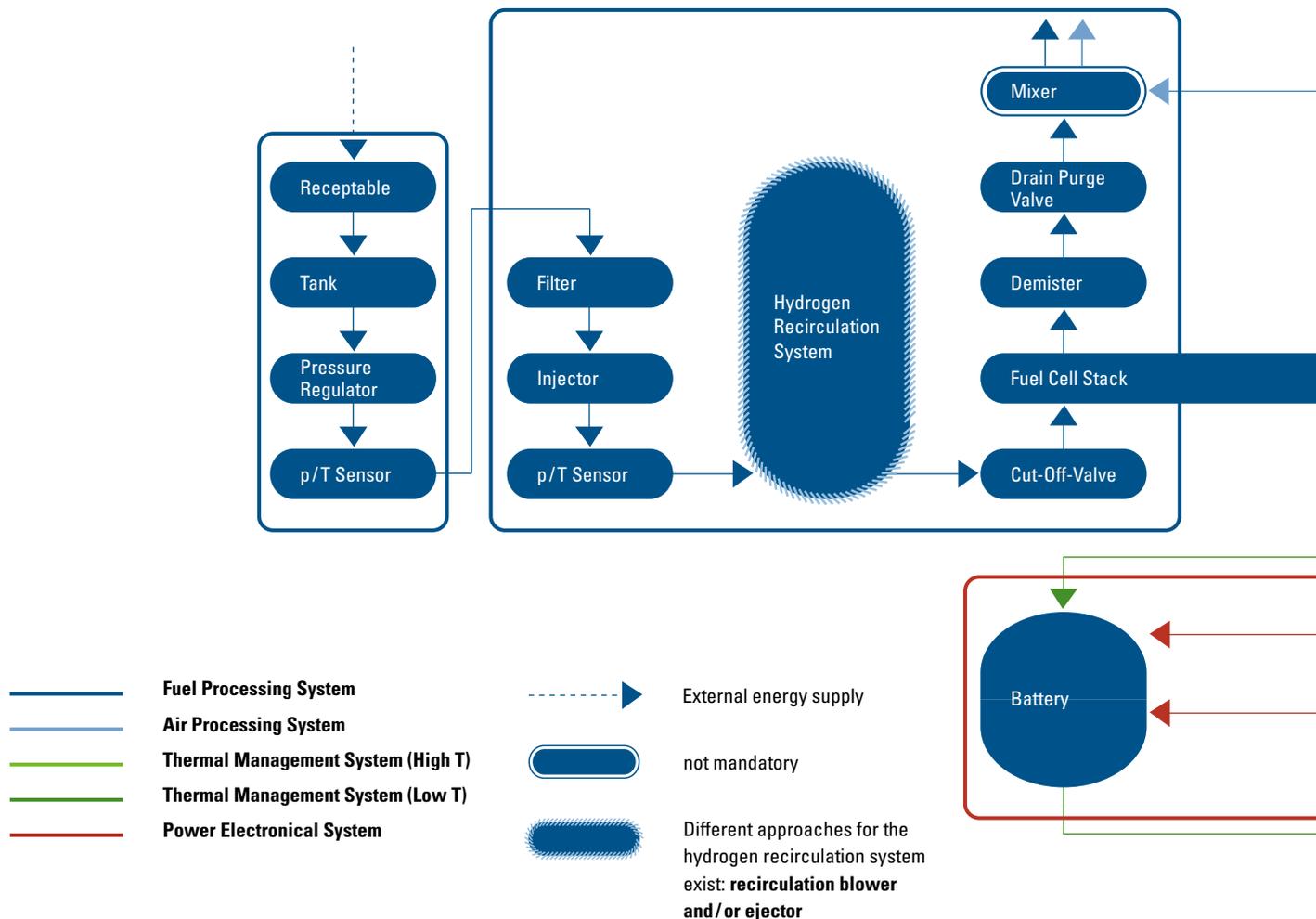
Sie besteht aus den folgenden drei Subsystemen (siehe Abbildung 29):

- Wasserstoffkreislauf
- Luftkreislauf
- Kühlsystem

Das Tanksystem und die Komponenten der Leistungselektronik werden in dieser Studie nicht der Balance-of-Plant im engeren Sinn zugerechnet und separat betrachtet.

Der Wasserstoffkreislauf und der Luftkreislauf dienen der Bereitstellung der zur elektrochemischen Reaktion benötigten Reaktanden. Beim Kühlsystem kann zwischen dem Hoch- und dem Niedertemperaturkreislauf unterschieden werden. Während der Hochtemperaturkreislauf im Wesentlichen zur Kühlung und damit auch zur optimierten Prozessführung der Brennstoffzelle dient, werden im Niedertemperaturkreislauf Peripheriekomponenten im Gesamtsystem wie die Batterie, die elektrischen Wandler, der Luftkompressor und der Elektromotor gekühlt. Je nach Systemdesign kann der Ladeluftkühler am Hoch- oder am Niedertemperatursystem angeschlossen sein.

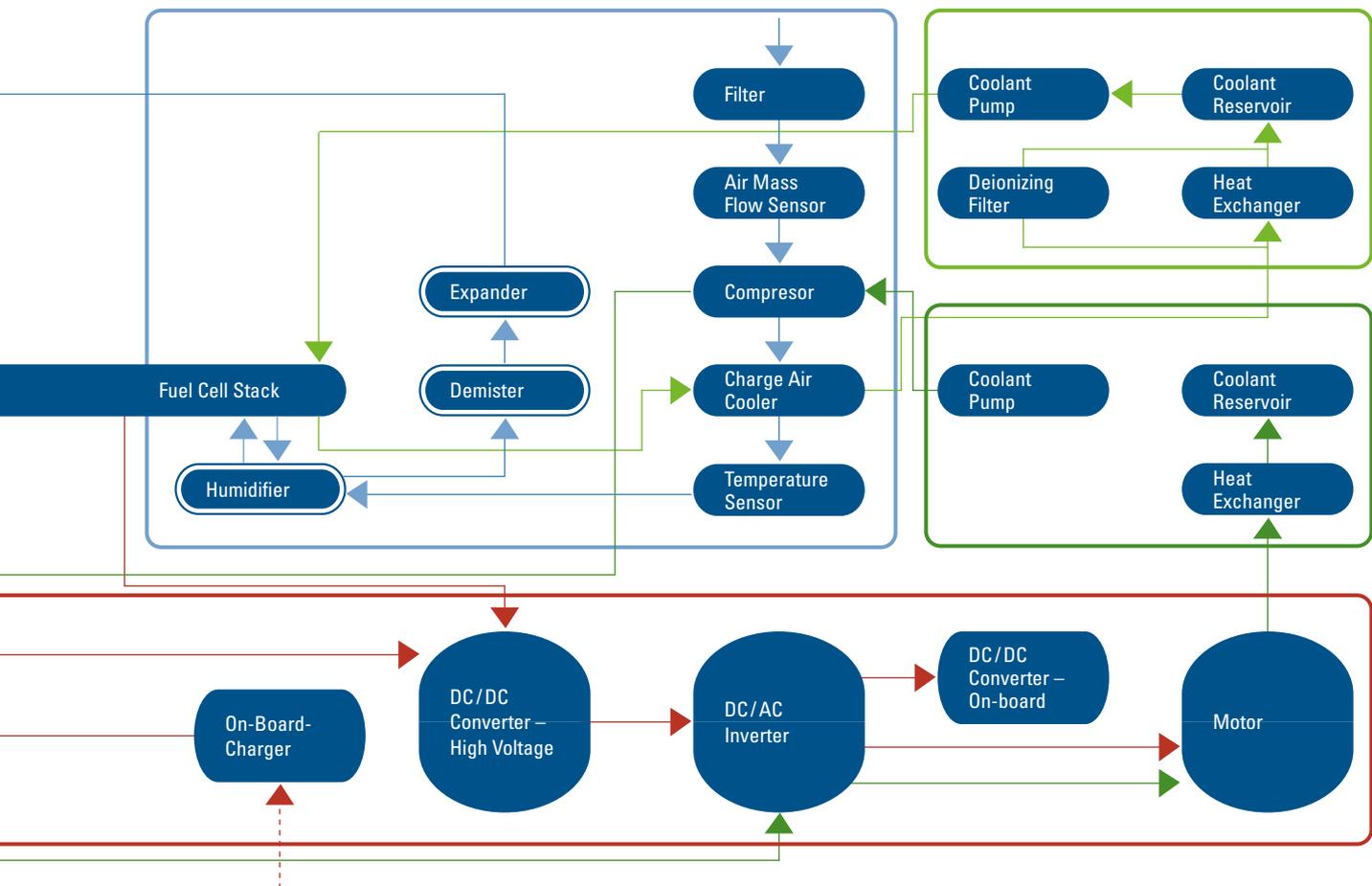
ABBILDUNG 29 Übersicht des Gesamtsystems PEMFC mit Subsystemen und ihren Kreisläufen



Wasserstoffkreislauf

Der Wasserstoffkreislauf bzw. Anodenkreislauf führt den Wasserstoff aus dem Hochdrucksystem des Tanks in einen Zwischendruckbereich, der schließlich in den Niederdruckbereich geleitet wird. Das Zwischendruckniveau von ca. 10 bis 20 bar wird über ein geeignetes Druckregulationssystem am Tank erreicht und dient der vereinfachten Steuerung des Niederdruckbereichs. Der Übergang in den Niederdruckbereich erfolgt über ein steuerbares Ventil, den Injektor, über den der Wasserstoff der Brennstoffzelle zugeführt wird. Das Rezirkula-

tionssystem hat die Aufgabe, nicht umgesetzten Wasserstoff aus der Brennstoffzelle wieder dem Kreislauf zuzuführen und somit die Effizienz des Gesamtsystems zu erhöhen. Der Aufbau des Rezirkulationssystems unterscheidet sich je nach Anwendungsfall deutlich. Neben dem aktiven Systemaufbau mit einem Rezirkulationsgebläse sind auch Systemaufbauten mit einer Strahlpumpe (engl. Ejector), mit einer Kombination von Strahlpumpe und Rezirkulationsgebläse oder mit zwei Strahlpumpen denkbar. Im Folgenden werden die beiden Hauptkomponenten des Wasserstoffkreislaufs beschrieben.



Due to the high number of possibilities, the connections of the power electronics to the components are not shown.

Quelle: KEX AG

Rezirkulationsgebläse

Das Rezirkulationsgebläse ist ein Bauteil des Wasserstoffkreislaufs und befindet sich an der Anodenausgangsseite der Zelle. Um die Rückführung des nicht verbrauchten Wasserstoffs in das System zu ermöglichen, hat das Gebläse die Aufgabe, den durch das Durchströmen der Zelle bedingten Druckabfall des Wasserstoffs auszugleichen. Aufgrund der elektrischen Steuerung kann das Gebläse flexibel auf unterschiedliche Lastzustände reagieren. Gleichzeitig kann das Gebläse zum Spülen des Stacks genutzt werden.

Die Stromversorgung der Gebläse kann unabhängig vom Leistungsniveau erfolgen. Hierzu können sowohl das Niederspannungsnetz als auch das Hochspannungsnetz des Brennstoffzellensystems genutzt werden. Dies hat den Vorteil, dass die Gebläse bereits in der Kaltstartphase des Systems arbeiten können und die Kaltstartfähigkeit des Systems verbessert wird. Da das Gebläse über rotierende Bauteile verfügt, ist die Lebensdauer des Gebläses begrenzt. In aktuellen Systemauslegungen für hohe Betriebsstunden in Schwerlastanwendungen stellt der Einsatz von Rezirkulationsgebläsen eine Herausforderung dar.

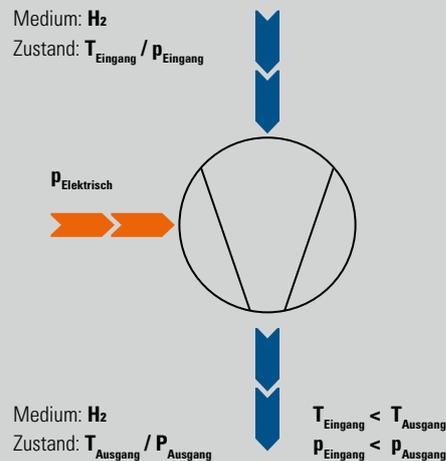
ABBILDUNG 30 Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Rezirkulationsgebläses


Kosten

Lebensdauer

Komplexität
Kennzahlen

Durchflussmenge	$1 \leq 900 \text{ l/min}$
Druckanstieg	$\leq 150 \text{ mbar}$
Leistungsaufnahme	$\leq 900 \text{ W}$
Kosten (Stückzahl 1.000)	700 – 800 €
Kosten (Stückzahl 10.000)	450 – 600 €
Kosten (Herstellerangaben)	250 – 1.800 €



Als Verdichtertechnologien für das Rezirkulationsgebläse kommen mehrere Konzepte infrage. Die Gesamtkonstruktion des Rückführungssystems kann durch die gewählte Verdichtertechnologie des Gebläses beeinflusst werden. So ist neben der Verwendung von Roots-Kompressoren auch der Einsatz von Zentrifugal-, Schrauben- oder Linear-Kompressoren denkbar.

- <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/powertrain/fuel-cell-electric/anode-recirculation-blower/>
- https://barber-nichols.com/wp-content/uploads/2019/11/hydrogen_recirculation_compressor.pdf
- https://www.schaeffler.com/en/news_media/press_releases/press_releases_overview.jsp?filter=language:167&page=1
- <https://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/18336/1/FullText.pdf>

Literatur

- B. D. James et al. "Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update"
- Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie 2020
- <https://www.rheinmetall-automotive.com/presse/presseinformationen/news-detail/news/innovationspreis-fuer-wasserstoff-rezirkulationsgeblaese-von-pierburg/>
- <https://www.rheinmetall-automotive.com/en/press/press-releases/news-detail/news/rheinmetall-automotive-receives-order-for-fuel-cell-components/>

Strahlpumpe

Eine energieeffizientere Methode der Wasserstoffrückführung als Rezirkulationspumpen bieten Strahlpumpen an, da diese rein passiv arbeiten. Strahlpumpen erzeugen ein Vakuum nach dem Venturi-Prinzip. Hierbei wird das Stoffgemisch, das die Anode der Brennstoffzelle verlässt, durch ein in der Pumpe erzeugtes Vakuum in den Kreislauf rückgeführt. Da die Strahlpumpe ohne bewegliche Teile funktioniert, ist diese Komponente einfach, robust, wartungsarm, verschleißarm und im Vergleich zu Rezirkulationsgebläsen kostengünstiger.

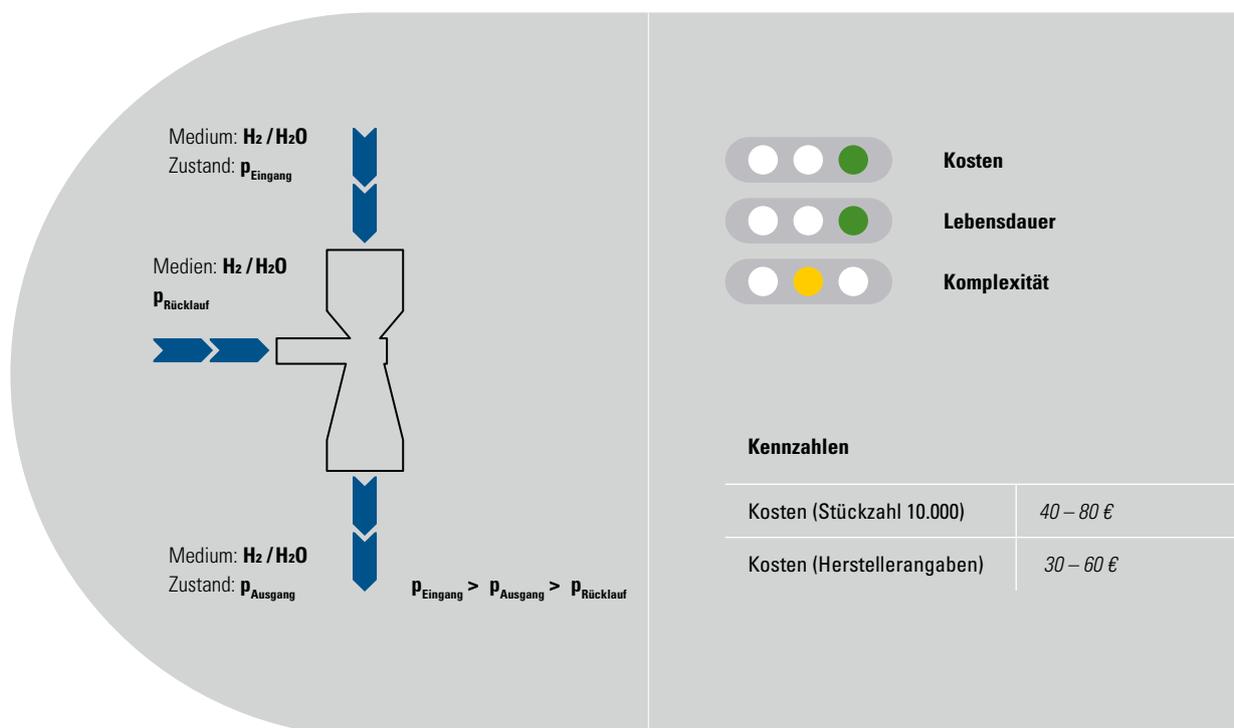
Trotz des einfachen Aufbaus hat die Strahlpumpe den Nachteil der geringeren Regelbarkeit der rezirkulierten Wasserstoffmenge. Gleichzeitig ist sie in Kaltstart- oder Start/Stop-Phasen weniger flexibel als beispielsweise Rezirkulationsgebläse einsetzbar. Die

optimale Auslegung der Strahlpumpe auf den jeweiligen Anwendungsfall stellt daher eine Herausforderung dar. Hinsichtlich der Langlebigkeit liegen jedoch noch keine Daten für einen Betrieb mit dem Medium Wasserstoff vor. Bereits im Serieneinsatz befindliche Systeme, die mit Erdgas betrieben werden, lassen jedoch den Schluss zu, dass die geforderte Laufleistung für Brennstoffzellenanwendungen erreichbar ist.

Literatur

- B. D. James et al. "Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update
- <https://www.hoerbiger.com/upload/ebook/2019/hoerbiger-motion/1-DE/39/>
- <https://www.foxvalve.com/air-gas-steam-vacuum-ejectors/fuel-cell-ejectors>
- <http://www.sonijector.com/products.html>
- https://www.researchgate.net/publication/24293974_A_Simple_Model_of_Pulsed_Ejector_Thrust_Augmentation

ABBILDUNG 31 Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen einer Strahlpumpe



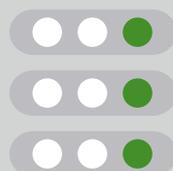
Injektor

Die Wasserstoffeinspritzdüse ist eine der wichtigsten Komponenten im peripheren Wasserstoffkreislauf einer PEMFC. Der Injektor dosiert auf Anforderung des Brennstoffzellen-Steuergerätes die benötigte Wasserstoffmenge für den Brennstoffzellenstack. Der Injektor ist an den Mitteldruckbereich des Wasserstoffkreislaufes angeschlossen (10–20 bar) und drosselt den Wasserstoffdruck für die Nutzung in der Zelle (1–3 bar). Die erforderliche Durchflussmenge kann mit ca. 0,02 g/s für 1 kW Brennstoffzellenleistung veranschlagt werden.

Literatur

- <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/powertrain/fuel-cell-electric/hydrogen-gas-injector/>
- <https://www.hoerbiger.com/en1/pages/103#center>
- <https://www.hoerbiger.com/upload/ebook/2019/hoerbiger-motion/1-EN/34/>
- <https://www.magnet-schultz.com/en/valves-for-hydrogen-storage-and-fuel-cell-systems/flow-control-valve>
- <https://www.hydrogen-valve.com/de/#start>
- <https://www.keihin.co.jp/en/product/4003/>

ABBILDUNG 32 Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Injektors



Kosten

Lebensdauer

Komplexität

Kennzahlen

Maximale Durchflussmenge	3 g/s
Maximaler Einlassdruck	20 bar
Kosten (Stückzahl 10.000)	50 – 70 €
Kosten (Herstellerangaben)	30 – 40 €

Medium: **H₂**
Zustand: **p_{Eingang}**



Medium: **H₂**
Zustand: **p_{Ausgang}**

p_{Eingang} > p_{Ausgang}

Systemaufbau des Wasserstoffkreislaufs

Systemaufbau – Rezirkulationsgebläse

Zurzeit wird meist ein aktives System zur Rezirkulation verwendet, d. h., ein Gebläse, das sogenannte Rezirkulationsgebläse, treibt den Wasserstoff von der Ausgangsseite der Brennstoffzelle zur Eingangsseite. Da solch ein Gebläse im Betrieb mit elektrischer Energie versorgt werden muss und aufgrund der rotierenden Komponenten im Allgemeinen eine kritische Lebensdauer aufweist, ist man bestrebt, diese Systeme zu optimieren bzw. zu ersetzen.

Systemaufbau – Eine Strahlpumpe

Eine Alternative zum Rezirkulationsgebläse stellt der Einsatz einer Strahlpumpe dar. Diese nutzt die Druckunterschiede zwischen dem Eingang und dem Ausgang der Anoden, um nach dem „Venturi-Prinzip“ den Wasserstoff der Anodenausgangsseite zur Anodenzugangsseite zu transportieren. Strahlpumpen enthalten keine beweglichen Bauteile und sind bereits aus anderen Industrien bekannt. Der große Vorteil der Strahlpumpe liegt in der hohen Lebensdauer. Zudem

kann auf eine Versorgung mit elektrischer Energie verzichtet werden. Nachteilig zu nennen ist jedoch, dass insbesondere im unteren Lastbereich die Effektivität der Pumpe aufgrund der geringen Druckdifferenzen zwischen den beiden Teilbereichen (Ein/Ausgang am Stack) sinkt, wodurch die Gesamteffizienz der Rezirkulation abnimmt. Zudem ist sie weniger flexibel einsetzbar als ein aktiv steuerbares System.

Systemaufbau – Rezirkulationsgebläse & Strahlpumpe

Ein Ansatz, den Nachteil der sinkenden Effektivität und Flexibilität bei geringen Lasten zu umgehen, stellt die Kombination eines Rezirkulationsgebläses mit einer Strahlpumpe dar. Bei niedrigen Lasten wird die Strahlpumpe von den aktiven Gebläsen unterstützt und somit die Rezirkulationseffizienz gesteigert. Das Gebläse kann in diesem Fall kleiner dimensioniert werden und wird weniger stark belastet. Durch die Kombination der beiden Technologien soll der Energieverbrauch des Wasserstoffkreislaufs gesenkt, die Lebensdauer der Teilkomponenten erweitert und die Flexibilität der Rückführung erhöht werden.

TABELLE 6 Charakteristika verschiedener Rezirkulationssysteme

	Technologische Reife	Komplexität	Kosten	Parasitäre Last	Lebensdauer	Rezirkulations-effizienz
Rezirkulationsgebläse						
Strahlpumpe						
Rezirkulationsgebläse + Strahlpumpe						
Zwei-Strahlpumpendesign					N/A	

Systemaufbau – Zwei Strahlpumpen

Ein ähnliches Konzept wie die Kombination aus Rezirkulationsgebläse und Strahlpumpe stellt das Zwei-Strahlpumpendesign dar. Auch hierbei soll die Rezirkulationseffizienz auf Kosten der Systemkomplexität verbessert werden. Der Grundgedanke ist, dass eine Strahlpumpe für die Belastung am Arbeitspunkt ausgelegt ist, während die zweite Strahlpumpe für den Niedriglastbereich ausgelegt ist. Dieses Konzept hat den Vorteil, dass beide Pumpen ohne elektrische Energie arbeiten und die Lebensdauer aufgrund der geringeren Einzellasten erhöht werden kann. Dieses Design besitzt zum heutigen Zeitpunkt die geringste technologische Reife.

Luftkreislauf

Der Luftkreislauf bzw. Kathodenkreislauf hat die Aufgabe, den Brennstoffzellenstack im Betrieb mit Sauerstoff zu versorgen. Um die Komplexität und die Kosten der Peripheriekomponenten möglichst gering zu halten, wird in der Regel Sauerstoff aus der Umgebungsluft für die chemische Reaktion verwendet. Um der Brennstoffzelle in jedem Betriebspunkt genügend Luft und damit auch Sauerstoff zur Verfügung stellen zu können und die maximal erreichbare Leistung zu steigern, wird die Umgebungsluft mithilfe eines Luftverdichters komprimiert, bevor sie in die Zelle gelangt. Mit Anstieg des Drucks steigt auch die Temperatur der angesaugten Luft durch die Verdichtung. Im nachgelagerten Ladeluftkühler wird die Luft auf ein für die Brennstoffzelle optimales Temperaturniveau reguliert. Für eine Optimierung der Zelleistung und eine Erhöhung der Leifähigkeit der verbauten Polymembranen ist relative Luftfeuchtigkeit der angesaugten Luft von großer Bedeutung. Gleichzeitig können Degradationseffekte in der Zelle durch einen optimierten Wasserhaushalt

verlangsamt werden. Die meisten Brennstoffzellenkonzepte sehen daher den Einsatz eines Luftbefeuchters vor, der die komprimierte Umgebungsluft vor Eintritt in die Brennstoffzelle mit Wasser anreichert. Als Wasserquelle dient das Prozesswasser aus der Abluft der Brennstoffzelle.

Ein weiteres Konzept zur Gasbefeuchtung stellt die zellinterne Befeuchtung des PEMFC dar. In diesem Fall kann auf eine externe Befeuchtung mit Befeuchter verzichtet werden. Zur Reduzierung der parasitären Last des Luftkreislaufes kann hinter die Brennstoffzelle ein Expander in das Brennstoffzellensystem integriert werden. Dieser nutzt das hohe Druckniveau der Abluft, indem er die Abluft weiter entspannt und somit Energie für den Kompressor bereitstellt. Um die metallischen Turbinenschaufeln im Expander vor Korrosion zu schützen, muss die Abluft vor dem Eintritt in die Expandereinheit stark entfeuchtet werden, wodurch sich die Komplexität des Gesamtsystems erhöht. Der Einsatz eines Expanders stellt immer eine Abwägung zwischen Systemeffizienz und Komplexität dar. Expandereinheiten werden zum heutigen Zeitpunkt nur selten in kommerziell verfügbaren Fahrzeugen verbaut, sind jedoch bei Zulieferern bereits verfügbar.

Im Folgenden sollen der Verdichter und der Befeuchter als Hauptkomponenten des Luftkreislaufes näher beschrieben werden.

Befeuchter

Der Befeuchter im Luftkreislauf reichert die komprimierte Luft mit Wasser aus der Abluft des Brennstoffzellenstacks an. Dies verhindert eine vorzeitige Degradation durch Austrocknung des Elektrolyten und erhöht die Zellperformance. Dazu strömt im Befeuchter die warme Abluft aus der Kathode mit hoher Wasserdampfkonzentration an einer Membran im Gegenstrom zur trockenen Umgebungsluft. Dieser Aufbau hat den Vorteil, dass das Prozesswasser wieder genutzt werden kann. Eine gängige Materialgruppe für die Membran im Befeuchter sind Polysulfone und Polyimide.

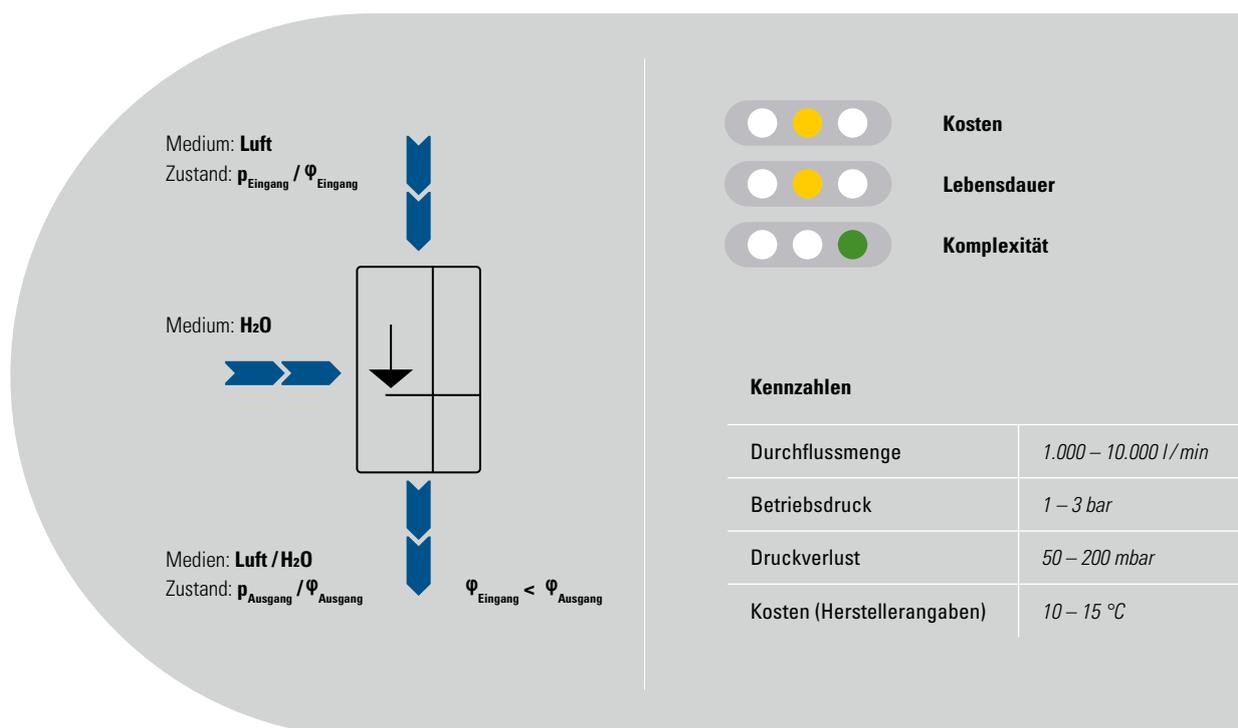
Aufgrund der verwendeten mehrschichtigen Membranmaterialien ist der Befeuchter bei kleinen Stückzahlen sehr kostenintensiv in der Herstellung. Es ist jedoch

zu erwarten, dass bei einer hochskaligen Produktion die Kosten für den Befeuchter deutlich zurückgehen werden.

Literatur

- B. D. James et al. "Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update
- <https://www.freudenberg-filter.com/en/world-of-automotive/products/fuel-cell-solutions/>
- https://www.fumatech.com/NR/rdonlyres/0B9A1C7F-5BA6-4409-A003-5C4E79CD61AB/0/FUMATECH_BWT_GmbHMembrane_Humidifiers.pdf
- <https://engineeredfiltration.pentair.com/en/products/humidipower%20fuel%20cell%20humidifier>

ABBILDUNG 33 Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Befeuchters



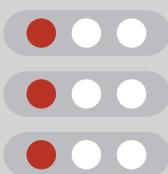
Verdichter

Zur Erzielung einer höheren Leistungsdichte und zur Sicherherstellung einer ausreichenden Sauerstoffversorgung in der Brennstoffzelle wird die Zuluft in einem elektrischen Luftverdichter komprimiert, bevor sie in den Befeuchter geleitet wird. Das grundlegende Funktionsprinzip des eingesetzten elektrischen Verdichters ähnelt dem des in Fahrzeugen mit klassischem Verbrennungsmotor eingesetzten Turbo-Verdichters, jedoch wird anstelle eines Turbinenrades im Abgasstrom ein Elektromotor für die Erbringung der Verdichtungsleistung eingesetzt. Die Anforderungen an den Verdichter sind deutlich höher als im klassischen Verbrennungsmotor. So muss er bei einem vergleichsweise geringen Massenstrom in Brennstoffzellensystemen ein hohes Druckverhältnis zwischen Verdichtereingang und -ausgang erzeugen. Eine weitere Herausforderung stellt die Lagerung des Verdichters

dar. Da an die in den Brennstoffzellenstack eintretende Luft hohe Reinheitsanforderungen gestellt werden, muss sichergestellt werden, dass keine Schmiermittel aus der Lagerung in die verdichtete Luft gelangen. Dies ist u. a. durch die Nutzung von Luft- oder Magnetlagern zu erreichen. Diese Lagerungsarten sind jedoch sehr kostenintensiv.

Der Verdichter hat einen hohen Einfluss auf die maximale Netto-Gesamtleistung des Brennstoffzellensystems. Gleichzeitig benötigt der Verdichter zur Kompression der Zuluft einen großen Anteil der Bruttoleistung des Brennstoffzellenstacks. So kann die an der Verdichterwelle anliegende Leistung bei einem 150 kW-System bis zu 20 kW betragen. Hinsichtlich der im Verdichter umzusetzenden Massenströme kann pro kW Brennstoffzellenleistung von einem Luftmassenstrom von 1 g/s ausgegangen werden.

ABBILDUNG 34 Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Verdichters



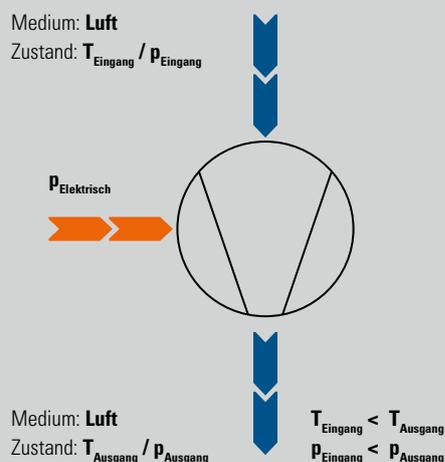
Kosten

Lebensdauer

Komplexität

Kennzahlen

Maximale Druckdifferenz	4
Maximale Durchflussrate	190 g/s
Elektrische Effizienz	58 – 71 %
Leistungsverhältnis	0,1 – 0,15 kWVerdichter/kWBrennstoffzelle
Kosten (Stückzahl 1.000)	450 – 600 €
Kosten (Stückzahl 10.000)	250 – 1.800 €



In einem Brennstoffzellensystem ist der Kompressor aufgrund der hohen Anzahl an beweglichen Bauteilen eine kritische Komponente mit einer vergleichsweise hohen Ausfallwahrscheinlichkeit. Die durch den erhöhten Verschleiß reduzierte Lebensdauer, die vergleichsweise hohen Produktionskosten und der hohe Leistungsbedarf machen den Verdichter zu einem anspruchsvollen Bauteil in der Brennstoffzellentechnologie.

Literatur

- B. D. James et al. "Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update
- <https://www.celeroton.com/en/new-ct-2x-series/>
- <https://www.celeroton.com/wp-content/uploads/Datasheet-CC-550-7500.pdf>
- <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/powertrain/fuel-cell-electric/electric-air-compressor/>
- <https://trythomasumps.com/pdf/6025SE.pdf>
- <https://www.garrettmotion.com/electric-hybrid/twostage-electric-compressor-for-fuel-cells/>
- <https://airsquared.com/markets/clean-energy/fuel-cell/>
- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118878330>

Kühlsystem

Das Kühlsystem in Brennstoffzellensystemen wird üblicherweise in einen Hochtemperaturkreislauf und einen Niedertemperaturkreislauf aufgeteilt. Beide Kreisläufe bestehen aus einer Kühlmittelpumpe, einem Kühlmittelbehälter und einem Wärmetauscher.

Hochtemperaturkreislauf

Der Hochtemperaturkreislauf dient der Abführung der Reaktionswärme des Brennstoffzellenstacks und ist für die optimale Temperierung des Stacks verantwortlich. Der Hochtemperaturkreislauf verfügt zusätzlich einen Deionisierungsfilter, der das zur Temperierung der Zellen verwendete Kühlmittel deionisiert.

Eine Brennstoffzelle erzeugt aufgrund der höheren Effizienz bei gleicher Nennleistung weniger Wärme als ein vergleichbarer Verbrennungsmotor. Im Falle des Verbrennungsmotors wird etwa die Hälfte der im Verbrennungsprozess entstehenden Wärme über das Abgas abgeführt. Dies ist bei der Brennstoffzelle nicht der Fall. Hier muss ein Großteil der das Kühlsystem im Vergleich zum System eines Verbrennungsmotors größer ausgelegt werden.

Niedertemperaturkreislauf

Der Niedertemperaturkreislauf ist für die Kühlung der BoP-Komponenten verantwortlich. Zu diesen zählen:

- Luftkompressor
- Ladeluftkühler (evtl. über Hochtemperaturkreislauf kühlbar)
- DC/AC-Wechselrichter
- DC/DC-Wandler
- Pufferbatterie
- Elektromotor

Die optimale Kühlung der einzelnen Komponenten stellt bei der Entwicklung des Thermomanagements eine der Hauptherausforderungen dar.

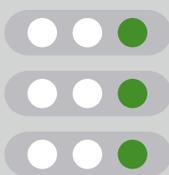
Neben der Kühlung des Stacks und der diversen Einzelkomponenten der BoP wird über das Kühlsystem das Energiemanagement des Gesamtsystems realisiert. Zum Energiemanagement gehören zum Beispiel die Klimatisierung des Fahrgastinnenraums von Brennstoffzellenfahrzeugen und die Temperierung des Gesamtsystems bei einem Kaltstart. Dafür sind in der Regel spezielle Heizsysteme und intelligente Betriebsstrategien erforderlich.

Im Folgenden wird näher auf die im Kühlsystem verbauten Komponenten Wärmetauscher und Ionenfilter als spezifische Komponenten für Brennstoffzellensysteme eingegangen.

Wärmetauscher

Die Wärmetauscher sind neben der Kühlpumpe zentrale Bestandteile des Kühlsystems des Brennstoffzellensystems. Die Wärmetauscher bestehen aus einer variablen Anzahl an Platten, die es ermöglichen, die entstehende Prozesswärme aus einem primären Kühlkreislauf in einen sekundären Kühlkreislauf zu übertragen. Da die beiden Kühlkreisläufe des Brennstoffzellensystems mit unterschiedlichen Temperaturen betrieben werden, werden mehrere Wärmetauscher im Kühlsystem verwendet. Die Auslegung der Wärmetauscher ist von der erforderlichen Wärmeabfuhr aus dem primären Kühlkreislauf und vom allgemeinen Temperaturniveau abhängig.

ABBILDUNG 35 Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Wärmetauschers



Kosten

Lebensdauer

Komplexität

Kennzahlen

Maximale Wärmeleistung	150 kW (stark vom Design abhängig)
Maximale Durchflussrate	460 l/min

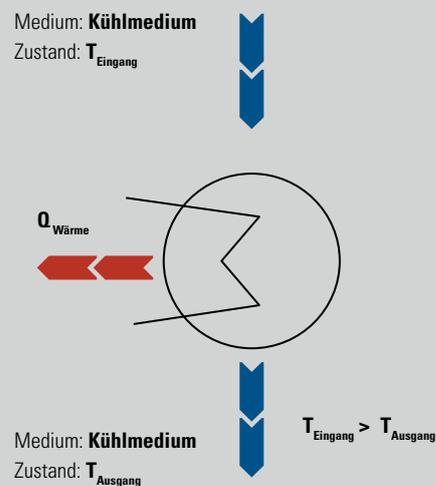
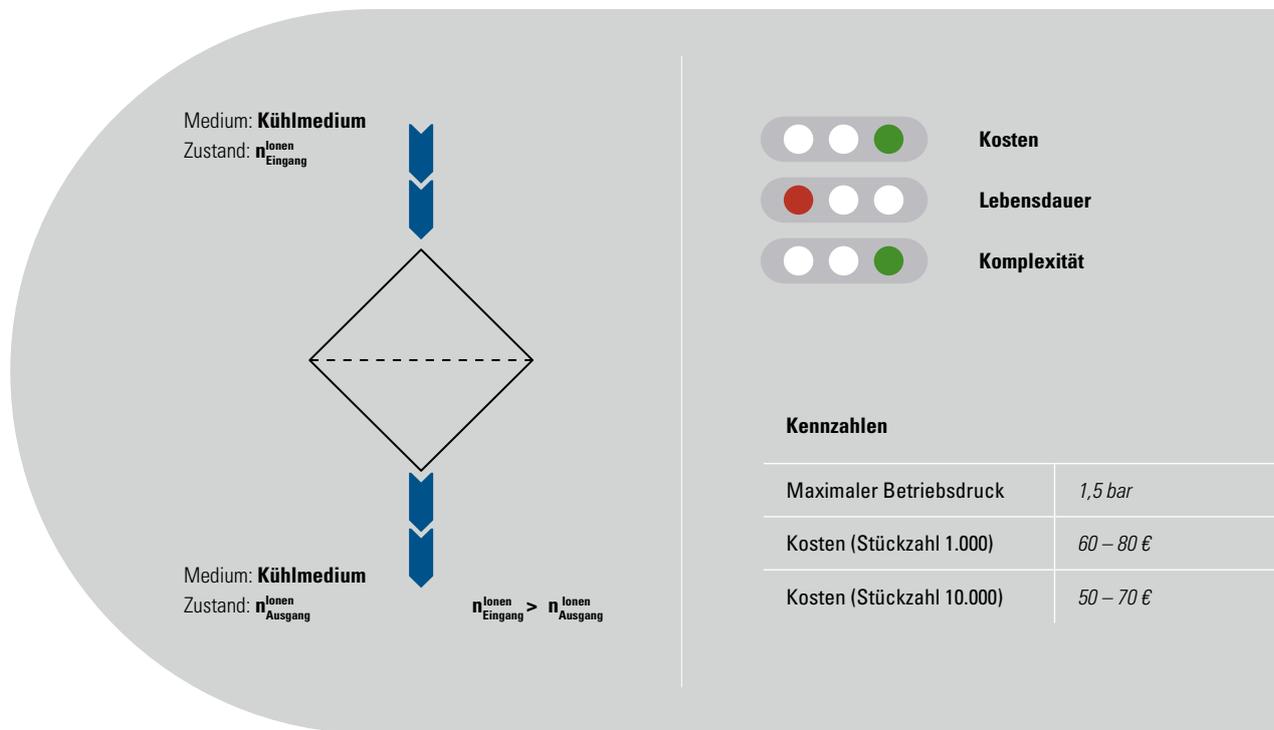


ABBILDUNG 36 Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Ionenfilters



Der im Hochtemperaturkreislauf eingesetzte Wärmetauscher kommt mit dem in der Brennstoffzelle verwendeten deionisierten Wasser in Kontakt, was zusätzliche Anforderungen an die im Wärmetauscher verwendeten Komponenten stellt.

Literatur

- https://www.swep.net/applications/energy-industry/fuel-cells/?_%2ga=2.132344777.698705531.15730364261027453961.1573036426
- https://www.kaori-bphe.com/uploads/editor/files/FuelCell_en.pdf
- <https://www.kelvion.com/us/company/fairs-media/downloads/plate-heat-exchangers/>

Ionenfilter

Der Ionenfilter wird im Hochtemperaturkreislauf des Kühlsystems eingesetzt und ist für die Deionisierung des Kühlmittels, das die Brennstoffzelle durchströmt, verantwortlich. Durch die Deionisierung des Kühlmittels wird seine Leitfähigkeit reduziert, wodurch ungewollte Störströme in der Zelle vermieden werden. Mit zunehmendem Alter verliert der Ionenfilter jedoch seine Effektivität.

Dies führt dazu, dass Fehlströme im Stack auftreten können und Alterungsprozesse in den Zellen beschleunigt werden. Um eine lange Lebensdauer der Stacks zu gewährleisten, sollte der Ionenfilter daher regelmäßig ausgetauscht werden. Als vergleichsweise kostengünstiges Bauteil stellt sein Austausch keine große finanzielle Herausforderung dar. Bei der Konstruktion

des BoP ist lediglich darauf zu achten, dass diese Komponente leicht zugänglich ist, um die Arbeitskosten für den Filterwechsel gering zu halten.

Literatur

- James, B. et al.: Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update
- <https://oem.mann-hummel.com/en/applications/fuel-cells.html>
- <https://oem.mann-hummel.com/de/oem-produkte/filterloesungen-elektrische-antriebe/brennstoffzellen/ionentauscher-filter.html>
- <https://www.cumminsfiltration.com/coolantfiltration#tab663>
- <https://napafilters.com/filters/coolant%20filters/>
- https://www.swep.net/applications/energy-industry/fuel-cells/?_%20ga=2.132344777.698705531.15730364261027453961.1573036426
- https://www.kaori-bphe.com/uploads/editor/files/FuelCell_en.pdf
- <https://www.kelvion.com/us/company/fairs-media/downloads/plate-heat-exchangers/>

3.2.5 Komponenten der Leistungselektronik

Die Leistungselektronik eines Brennstoffzellensystems besteht im Wesentlichen aus den Komponenten

- Pufferbatterie
- Elektromotor mit DC/AC-Wechselrichter
- DC/DC-Wandler im Niedervoltbereich
- DC/DC-Wandler im Hochvoltbereich

Die Pufferbatterie, der Elektromotor und der Niedervolt-DC/DC-Wandler sind aus batterieelektrischen Fahrzeugen bekannt und können aus technologischer Sicht übernommen werden. Die Pufferbatterie wird zumeist in einer seriellen Verschaltung mit der Brenn-

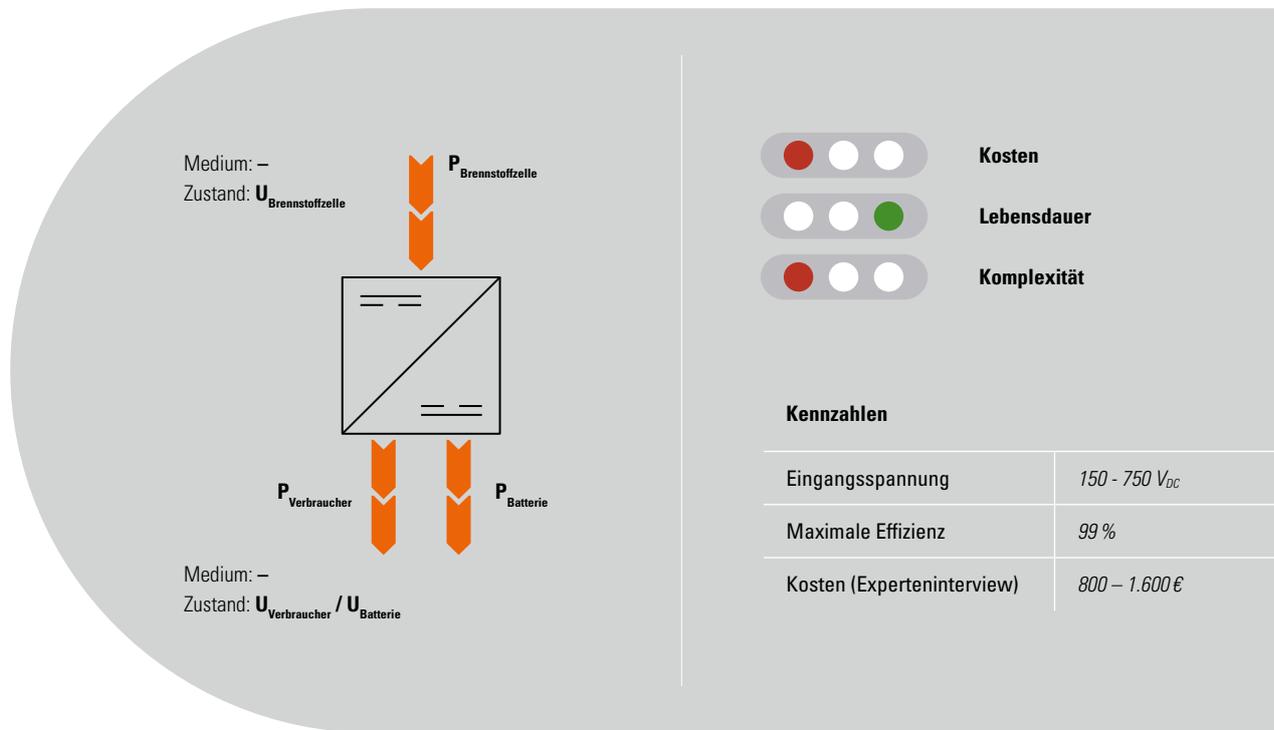
stoffzelle verbaut, sodass Lastspitzen und dynamische Lastwechsel, wie sie im Fahrbetrieb vorliegen, von der Batterie abgefangen werden können. Je nach Auslegung des Antriebssystems kann die Pufferbatterie deutlich kleiner als in batterieelektrischen Fahrzeugen dimensioniert werden. Dies ist insbesondere bei Systemen der Fall, in denen der größte Teil des Leistungsbedarfs über die Brennstoffzelle bereitgestellt wird. Die Pufferbatterie wird in allen Antriebsauslegungen über die Brennstoffzelle oder über die Rückgewinnung von Bremsenergie geladen.

Ein besonderes Bauteil der Leistungselektronik ist der DC/DC-Wandler im Hochvoltbereich. Dieser Wandler wird auch als Aufwärtswandler bezeichnet und verbindet die Brennstoffzelle als Eingangsquelle mit der Batterie und den am elektrischen Verbraucher verbauten DC/AC-Wechselrichter als Ausgang.

DC/DC-Wandler

Der in Brennstoffzellensystemen verbaute DC/DC-Wandler hat die Aufgabe, ein Gleichgewicht zwischen der elektrischen Energieversorgung und der Energienachfrage im System herzustellen und gleichzeitig die verschiedenen Spannungsniveaus auszugleichen. Er ist auf der einen Seite mit der Brennstoffzelle als reine Leistungsquelle und der Pufferbatterie sowie dem am elektrischen Verbraucher verbauten DC/AC-Wechselrichter als Leistungsquelle und auch senke verbunden. Wird vom Verbraucher kurzfristig mehr Leistung abgerufen, als die Brennstoffzelle bereitstellen kann, wird über den Wandler zusätzliche Energie aus der Pufferbatterie bereitgestellt. Hierbei fungieren Brennstoffzelle und Pufferbatterie als Leistungsquelle. Wird hingegen die von der Brennstoffzelle bereitgestellte Leistung nicht vollständig über den Verbraucher abgerufen, wird diese zum Laden der Pufferbatterie genutzt. Die Batterie wird durch die Überschussleistung geladen.

ABBILDUNG 37 Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines DC/DC-Wandlers



Dies geschieht auch, wenn im Fahrbetrieb (bei FCEV) Bremsenergie über den Elektromotor rekuperiert wird. Die so erzeugte elektrische Energie wird über den DC/DC-Wandler in die Pufferbatterie eingespeist.

Der Umrichter besteht aus mehreren Teilen wie einem Leistungsmodul, Steuerplatinen, Induktoren, diversen Kühlkomponenten und dem Schutzgehäuse. Die wichtigsten Entwicklungsbereiche neben dem Schaltungslayout sind die in den Schaltmodulen verwendeten Materialien wie MOSFETs und IGBTs¹. Zukünftige Automobilumrichter müssen nicht nur die hohen Anforderungen an Leistungsdichte und Leistung erfüllen, sondern sind auch in Volumen und Gewicht beschränkt. Eine generelle Redundanz durch Mehrfach- oder Konstruktionslösungen ist aufgrund der hohen Sicherheitsstandards und -vorschriften erforderlich. DC/DC-Wandler sind sehr komplexe Kompo-

ponenten der Leistungselektronik und auf das jeweilige Brennstoffzellensystem abgestimmt. Die Auslegung des Systems wird u. a. von den abgerufenen Leistungsspitzen, der Kapazität der Pufferbatterie und der Leistung des Brennstoffzellensystems beeinflusst. Unterschiedliche Antriebsstrang- und Systemkonzepte erfordern daher einen an die spezifischen Anwendungen und ihre Anforderungen angepassten Wandler. Da der Einsatz dieser Art DC/DC-Wandler aktuell nur in Brennstoffzellensystemen erfolgt, sind zum heutigen Zeitpunkt noch keine hohen Skaleneffekte erreicht worden. Durch die hohe Komplexität, die hohen Materialkosten und die ausbleibenden Skaleneffekte sind DC/DC-Wandler aktuell sehr teuer in der Produktion.

¹ MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor; IGBT: Insulated-Gate Bipolar Transistor

Literatur

- https://www.tame-power.com/sites/default/files/tame-power/pdf/CONV-DCDC-xxKW-xxxx-xx-x_Air_ED05.pdf
- <https://www.kostal-industrie-elektrik.com/de-de/produkte/electronics/dc-dc-wandler/>
- A. Kolli et al. "A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications" *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT* 105 (2015) 716–730
- Guilbert et al. "Interactions between fuel cell and DC/DC converter for fuel cell electric vehicle applications: Influence of faults" *IECON 2013 39th ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY* (2013) 912–917

3.2.6 Komponenten des Tanksystems

Das Tanksystem dient der Mitführung des Wasserstoffs und umfasst alle Komponenten, die zur Befüllung des Tanksystems erforderlich sind. Bei Hilfsaggregaten (engl. Auxiliary Power Unit (APU)) wird meist ein fossiler Kraftstoff von einem Haupttanksystem zur Verfügung gestellt, der vor dem Einsatz in der PEMFC zu Wasserstoff reformiert werden muss. Dieses Haupttanksystem wird nicht dem originären Tanksystem des Brennstoffzellensystems zugerechnet. Analog zur Betrachtung eines Brennstoffzellensystems kann beim Tanksystem zwischen dem eigentlichen Wasserstofftank und den dazugehörigen Peripheriekomponenten unterschieden werden. Im Folgenden soll der Tank als Hauptkomponente des Systems näher beschrieben werden.

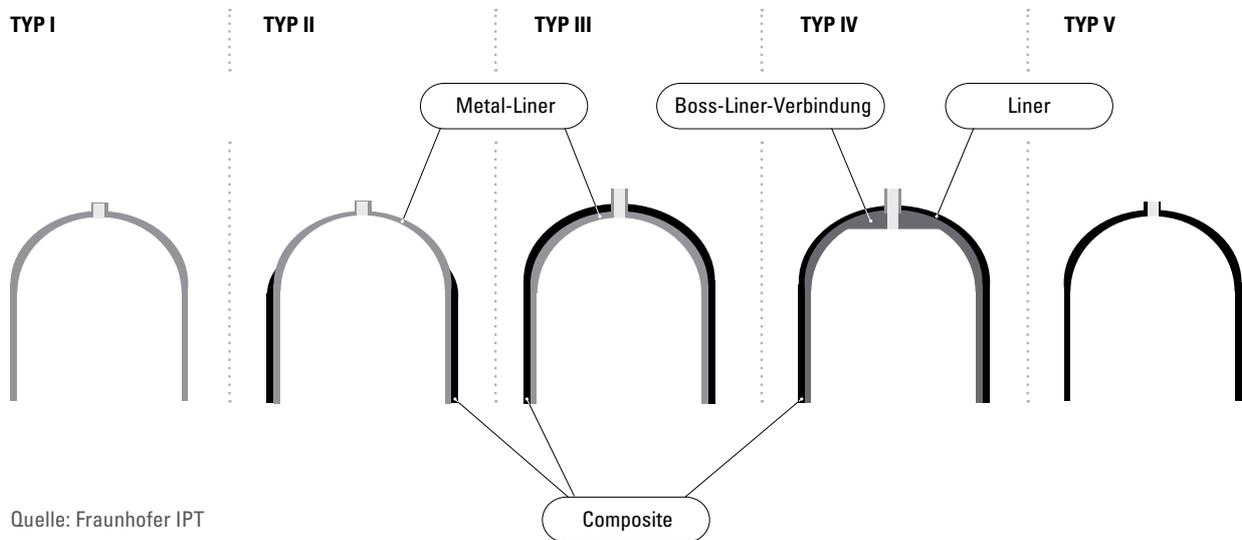
Tank

In der Regel werden zur Wasserstoffspeicherung in heutigen mobilen und stationären Anwendungen Drucktanks verwendet. Der Wasserstoffdrucktank hat die Funktion, den zum Betrieb der Brennstoffzelle notwendigen Wasserstoff zu speichern und zur Verfügung zu stellen. Hierbei wird zwischen unterschiedlichen Drucktanktypen nach Art der verwendeten Materialien unterschieden. Typ I ist ein voll metallischer Tank. Typ II besteht aus mehreren Schichten unterschiedlichen Materials. Dieser Tanktyp hat eine metallische innere Schicht, den sogenannten Liner, die im Zylinderbereich mit einer Schicht aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) verstärkt ist. Die Lasten werden sowohl von dem metallischen Liner als auch von der FVK-Verstärkung getragen. Typ III hat ebenfalls einen metallischen Liner, jedoch vollständig mit FVK umwickelt. Hier übernimmt die FVK-Komponente den maßgeblichen Anteil an den mechanischen Lasten. Typ IV besteht aus einem Kunststoffliner, der mit FVK umwickelt wird. Hier übernimmt der Liner die Funktion der Wasserstoffbarriere und des Wickelkerns. Typ V besteht vollständig aus FVK ohne Liner.

In heutigen Anwendungen für die Wasserstoffspeicherung werden hauptsächlich Typ IV-Drucktanks verwendet. Dies liegt daran, dass man durch den Polymerliner eine wirksame Barriere gegen Wasserstoffdiffusion realisieren kann. Bei der Verwendung von metallischen Linern ist die Wasserstoffdiffusion von signifikantem Ausmaß. Außerdem kann es bei der Verwendung von metallischen Werkstoffen zur Versprödung dieser kommen, wenn sie Wasserstoff ausgesetzt werden.

Typ IV-Drucktanks werden typischerweise in FVK-Wickelverfahren hergestellt, bei denen der Liner als Werkzeug auf einer Wickelachse montiert ist und mit

ABBILDUNG 38 Darstellung der verschiedenen Typen von Drucktanks



Quelle: Fraunhofer IPT

Verstärkungsfasern aus Kohlenstoff umwickelt wird. Aktuell kommen hierbei hauptsächlich Nasswickel- oder Towpreg-Wickelverfahren zum Einsatz. Diese unterscheiden sich dadurch voneinander, dass beim Nasswickelverfahren die Imprägnierung der Fasern mit dem Kunststoffharz direkt vor dem Wickeln stattfindet, während beim Towpreg-Wickeln vorimprägnierte Garne verwendet werden, um einen schnelleren Wickelprozess realisieren zu können.

Da zur Tankherstellung große Mengen an kostenintensiven Kohlenstofffasern verwendet werden, beschäftigen sich laufende Entwicklungsaktivitäten damit, die Kosten zur Tankherstellung durch schnellere Faserablage und fortschrittliche Tankdesigns zu reduzieren. Ein anderer Ansatz ist die Verwendung von thermoplastischen Bandhalbzeugen zur Umwicklung der Liner, der neben dem Einsparpotenzial von Kohlenstofffasern auch die Möglichkeit einer erhöhten Recyclingfähigkeit und einer nachhaltigeren Produktion bietet.

Die Kunststoffliner werden für Großserien in den meisten Fällen im Blasformen hergestellt. Ein alternatives großserientaugliches Verfahren ist das Spritzgießen. Für kleinere Serien oder Prototypen kommen auch Rotationsgießverfahren zum Einsatz. Die metallischen Anschlüsse des Tanks an das Wasserstoffversorgungssystem werden entweder direkt bei der Linerherstellung integriert oder nachträglich an den Liner angebracht. Sie werden bei der Herstellung der FVK-Schicht mit eingewickelt, um sie fest in das Gesamtsystem zu integrieren.

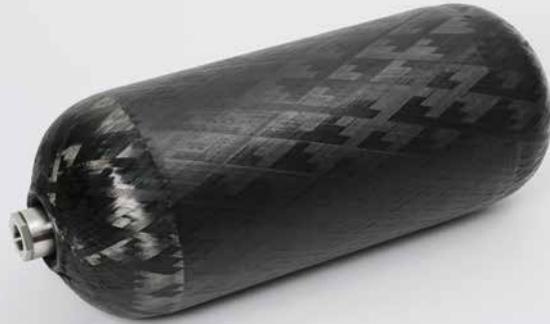
ABBILDUNG 39 Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Wasserstoffdrucktankes



Kennzahlen

Gravimetrische Tankkapazität	1,48 kWh/kg
Volumetrische Tankkapazität	0,83 kWh/l
Druckniveau	350 bar oder 700 bar
Kosten (Typ IV / 500.000 Stück/Jahr)	11,83 \$/kWh

Quelle: DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2019)



Typ IV-Wasserstoffdrucktank
aus thermoplastischem FVK /
Quelle: Fraunhofer IPT

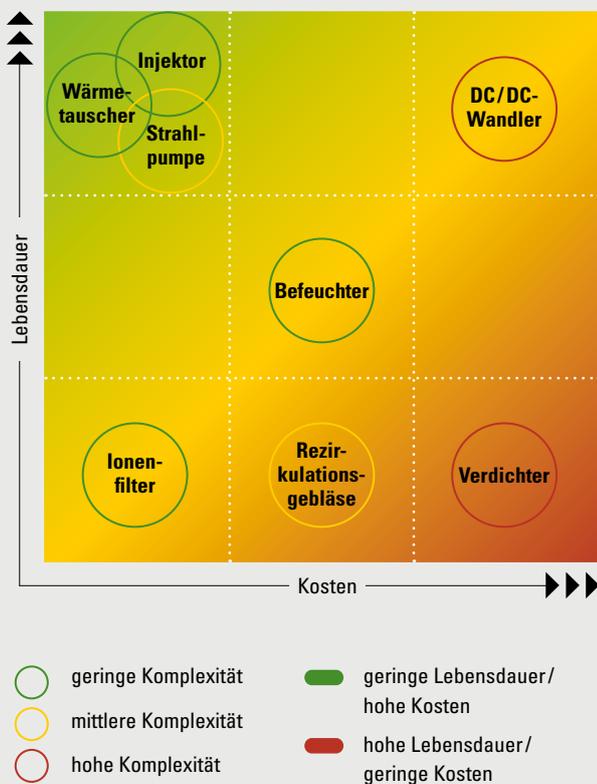
Literatur

- https://www.researchgate.net/publication/251104697_Hydrogen_Production_Storage_and_Fuel_Cells
- <https://www.compositesworld.com/articles/pressure-vessel-tank-types>
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6630991/>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319916305559>
- <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/compressed-hydrogen-storage>
- https://h2tools.org/sites/default/files/2019-08/paper_-_part_1.pdf
- https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15013_onboard_storage_performance_cost.pdf
- https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19008_onboard_storage_cost_performance_status.pdf
- https://www.researchgate.net/publication/304076222_Compressed_and_Liquid_Hydrogen_for_Fuel_Cell_Vehicles
- <https://www.springerprofessional.de/compressed-hydrogen-high-pressure-hydrogen-tanks/10660814>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319916330336>
- <https://www.sciencedirect.com/book/9780128120361/hydrogen-infrastructure-for-energy-applications>
- <https://www.compositesworld.com/articles/the-markets-pressure-vessels-2022>

Fazit

Sowohl die BoP als auch die Leistungselektronik der PEMFC bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten. Anhand der durchgeführten qualitativen Bewertungen jeder Komponente können diese nun bezüglich der drei Dimensionen Kosten, Komplexität und Haltbarkeit bewertet werden. Die Übersicht ist in Abbildung 40 dargestellt.

ABBILDUNG 40 Zusammenfassung der qualitativen Bewertungen der BoP-Komponenten der PEM FC



Der Luftkompressor ist in Hinblick auf Kosten, Lebensdauer und Verlässlichkeit die anspruchsvollste Komponente. Insbesondere der Aufbau des Verdichters und seine Regelung sind sehr anspruchsvoll. Der Kompressor versorgt die Brennstoffzelle mit ausreichend Umgebungsluft und stellt damit den Betrieb der PEMFC sicher. Die hohe Anzahl an beweglichen Bauteilen begünstigt einen hohen Verschleiß und damit eine verminderte Lebensdauer der Komponente.

Im Wasserstoffkreislauf ist das Rezirkulationsgebläse die kostenintensivste Komponente. Das Gebläse muss optimal auf die jeweiligen Betriebsbedingungen im System abgestimmt sein, um eine effiziente Nutzung des verwendeten Brennstoffes zu ermöglichen. Die technologische Umsetzung der Wasserstoffverdichtung und die Integration des Gebläses in den Wasserstoffkreislauf können sich durchaus als komplex gestalten. Aufgrund der rotierenden Komponenten weist das Gebläse im Allgemeinen eine kritische Lebensdauer auf. Dies erschwert den Einsatz in Anwendungen mit einer hohen Anzahl an Betriebsstunden.

Sowohl der Injektor als auch der Ejektor verfügen im Gegensatz zum Rezirkulationsgebläse über keine rotierenden Teile und gelten daher als zuverlässig und wenig komplex. Gleichzeitig sind die Kosten für die Bauteile vergleichsweise gering.

Der Aufbau und die Struktur des Befeuchters sind nicht sehr komplex. Ein Versagen des Befeuchters führt jedoch zu einer verstärkten Degradation der Zellmembran, was zur Folge hat, dass die Lebensdauer des Stacks nicht mehr gewährleistet werden kann. Die Lebensdauer des Humidifiers ist daher ein wichtiger

Faktor. Trotz der simplen Struktur verursacht der Humidifier aufgrund des teuren Membranmaterials nicht zu vernachlässigende Kosten.

Der Ionenfilter, der für die Deionisation des Kühlmittels verantwortlich ist, weist aktuell nicht die Lebensdauer auf, die für Langzeitanwendungen gefordert wird. Aufgrund der geringen Kosten und der Bauteilkomplexität ist ein Austausch der Komponente durchaus während der Betriebszeit denkbar, sodass der Ionenfilter als Serviceteil betrachtet werden kann.

Der Wärmetauscher muss im Vergleich zu einem entsprechenden System mit Verbrennungsmotor etwas größer ausgelegt werden. Der Aufbau des Wärmetauschers ist weniger komplex. Da diese Technologie bereits aus verschiedenen anderen Anwendungsbereichen gut bekannt ist, ist der Wärmetauscher ein zuverlässiges und kostengünstiges Bauteil.

Der DC/DC-Wandler ist eine der komplexesten Komponenten der Leistungselektronik, da er auf die jeweiligen Rahmenbedingungen und weiteren Komponenten abgestimmt sein muss. Die Individualisierung und die Abstimmung auf ein bestimmtes System führen zu hohen Kosten bei geringen Stückzahlen. Seine Lebensdauer kann jedoch, wie die aller anderen relevanten elektronischen Komponenten, als unkritisch angesehen werden.

3.3 Festoxidbrennstoffzelle

Festoxid-Brennstoffzellen (engl. Solid Oxide Fuel Cell, (SOFC)) eignen sich aufgrund ihres hohen Wirkungsgrads und der Möglichkeit des Einsatzes verschiedener Energieträger hervorragend für die stationäre Energiewandlung. Insbesondere mit der Nutzung der Abwärme könnten SOFCs perspektivisch Blockheizkraftwerke ersetzen (engl. Combined Heat and Power (CHP)).

Neben der stationären Verwendung sind auch mobile Anwendungen denkbar. Durch die im Vergleich zur PEMFC langsame Anpassung an Last muss die abgefragte Leistung allerdings über eine lange Zeit konstant gehalten werden. Ein Hilfsaggregat (engl. Auxiliary Power Unit (APU)), das konstant Leistung zur Unterstützung liefert, findet beispielsweise in Lkw, in Flugzeugen und auf Schiffen Anwendung. Die Charakteristika in Tabelle 7 zeigen generelle Eckdaten für eine APU.

TABELLE 7 **Verschiedene Anwendungen einer APU**

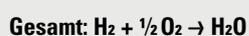
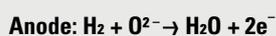
Anwendung	Leistung [kW]
Lkw	3 – 5
Schiff	250 – 500 + CHP
Flugzeug	400 – 500

TABELLE 8 Charakteristika von SOFC-Systemen

	Leistung [in kW]	Ziel Lebensdauer [in 1.000 h]	Zyklen	Systemeffizienz [in %]
Mikro-CHP	1	90	> 100	40 (elekt.) + 50 (therm.)
Gewerbebauten	5	90	> 100	40 (elekt.) + 50 (therm.)
APU + Range Extenders	5 – 30	> 10	> 1.000	40 – 50 (elekt.)
Kraftwerke	> 100	> 40	> 50	40 – 50 (elekt.)

3.3.1 Grundlagen und Funktion

Wie bei der PEMFC findet auch in der SOFC im Stack die elektrochemische Reaktion des Wasserstoffs und Sauerstoffs zu Wasser statt. Wesentliche Veränderung bezüglich der Reaktionskinetik ist, dass der Elektrolyt nicht Wasserstoff-Ionen, sondern Sauerstoff-Ionen leitet. An der Kathode wird der molekulare Sauerstoff aufgespalten und anschließend zweifach reduziert. Diese doppelt negativ geladenen Ionen wandern durch den keramischen Elektrolyten und bilden auf der Anodenseite mit dem Wasserstoff Wasser unter Abgabe zweier Elektronen. Aufgrund des elektrisch isolierenden Elektrolyten müssen die Elektronen über einen äußeren Kreis zur Kathode fließen. Die sich bewegendenden Elektronen sind der nutzbare Strom. Die chemische Reaktion findet wie folgt statt:



Während sich also bei der PEMFC das Wasser auf der Kathodenseite bildet, entsteht dieses bei der SOFC auf der Anodenseite. Da die ionische Leitfähigkeit von Keramiken bei Raumtemperatur klein ist, muss die Zelle bei hohen Temperaturen betrieben werden, um eine akzeptable Leitfähigkeit zu gewährleisten. Typische Betriebstemperaturen liegen im Allgemeinen bei über 650 °C. Diese hohen Temperaturen haben verschiedene Auswirkungen: Die Thermodynamik sagt aus, dass die theoretisch zu erreichende Effizienz der Wasserproduktion mit Erhöhung der Temperatur sinkt. Gleichzeitig erhöht eine steigende Temperatur nach Butler-Volmer die Reaktionskinetik an den Grenzflächen der Elektroden zum Elektrolyten. In Summe ist der Einfluss der Steigerung der Temperatur auf die Effizienz in der Regel positiv, d. h., Hochtemperatur-Brennstoffzellen (neben der SOFC z. B. auch die Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (engl. Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)) haben die höchsten Effizienzen. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei höheren Temperaturen auch günstigere Katalysatoren eingesetzt werden können, folglich benötigt die SOFC kein Platin (Pt), sondern benutzt stattdessen das wesentlich günstigere Nickel (Ni) auf der Anodenseite.

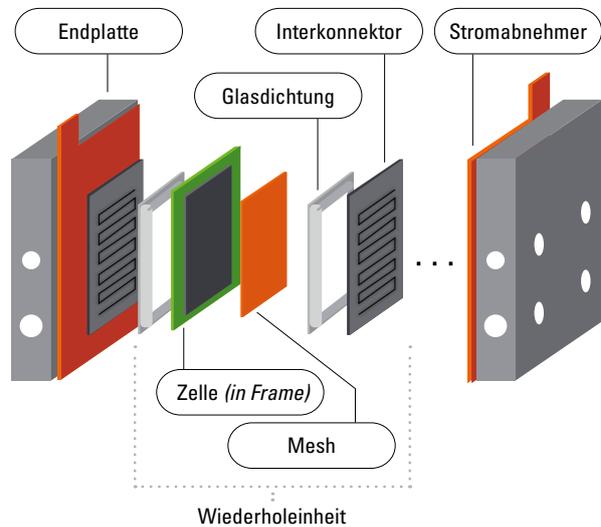
Literatur

- S. Mukerjee et al. "Chapter 9: Life and Reliability of Solid Oxide Fuel Cell Based Products: A Review"
- J. Rechberger et al. "Demonstration of the first European SOFC APU on a heavy duty truck" TRANSPORTATION RESEARCH PROCEEDIA 14 (2016) 3676 3685
- O. Singh et al. "Thermodynamic evaluation of SOFC GT hybrid power and cooling system" ENERGY SOURCES, PART A: RECOVERY, UTILIZATION, AND ENVIRONMENTAL EFFECTS
- M. Stellen PhD thesis "Thermodynamic Modeling and Experimental Investigation of Operating Conditions for a SOFC/ GT Hybrid Power Plant" (2019)
- Battelle Memorial Institute "Manufacturing Cost Analysis of 1, 5, 10 and 25 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications" (2017)

3.3.2 Aufbau einer SOFC

Ein SOFC-Stack setzt sich aus vielen einzelnen Wiederholeinheiten zusammen. Diese Einheiten bestehen meistens aus einem Interkonnektor und einem groben Metallgewebe zur Verteilung der Gase, einer Zelle zur elektrochemischen Umsetzung der Gase sowie Rahmen und Dichtung, um die Reaktionsgase im Stack zu halten. Bezüglich der Zelle unterscheidet man zwischen anodengestützten Zellen (engl. Anode Supported Cell (ASC)) und elektrolytgestützten Zellen (engl. Electrolyte Supported Cell (ESC)). Handelt es sich bei dem Zelltyp um eine ASC, kann die Anode in zwei Bereiche unterschieden werden: das Anodensubstrat und die anodenaktive Schicht. Das Anodensubstrat bildet die Grundschrift, auf der nacheinander die anodenaktive Schicht, der Elektrolyt, eine Sperrschicht und die Kathode aufgebracht werden. Im Gegensatz zur ASC ist bei der ESC der Elektrolyt die dickste Schicht, welche die anderen Schichten trägt. ESCs sind in der Regel nur für Forschungszwecke gedacht,

ABBILDUNG 41 Schematische Darstellung eines SOFC-Stacks



Quelle: Fraunhofer IPT

da die ohmschen Verluste in Elektrolyten viel höher sind als in den Elektroden und ESCs daher geringere Wirkungsgrade haben. Im Folgenden wird daher ausschließlich die ASC betrachtet.

3.3.3 Komponenten der SOFC

Im Folgenden werden die Komponenten einzeln vorgestellt und auf einige Kennzahlen und mögliche Produktionstechnologien wird eingegangen. Es wird dabei erst die Komponente beschrieben und anschließend mithilfe einer Ampel bewertet, wie hoch der Einfluss auf die finalen Kosten des Stacks, wie kritisch die Komponente bzgl. der Gesamtlebensdauer des Stacks und wie komplex die Herstellung ist. Grün steht dabei jeweils für einen geringeren Anteil an den finalen Kosten, bedeutet nicht Lebenszeit einschränkend und meint eine einfache Fertigung. Rot steht für einen höheren Anteil an den Stackkosten, kurze Lebensdauer und komplexere Herstellungsprozesse. Anschließend werden die möglichen und üblichen Produktionstechnologien vorgestellt.

ABBILDUNG 42 Ein mögliches Prozessschema für die Produktion von metallischen Interkonnektoren

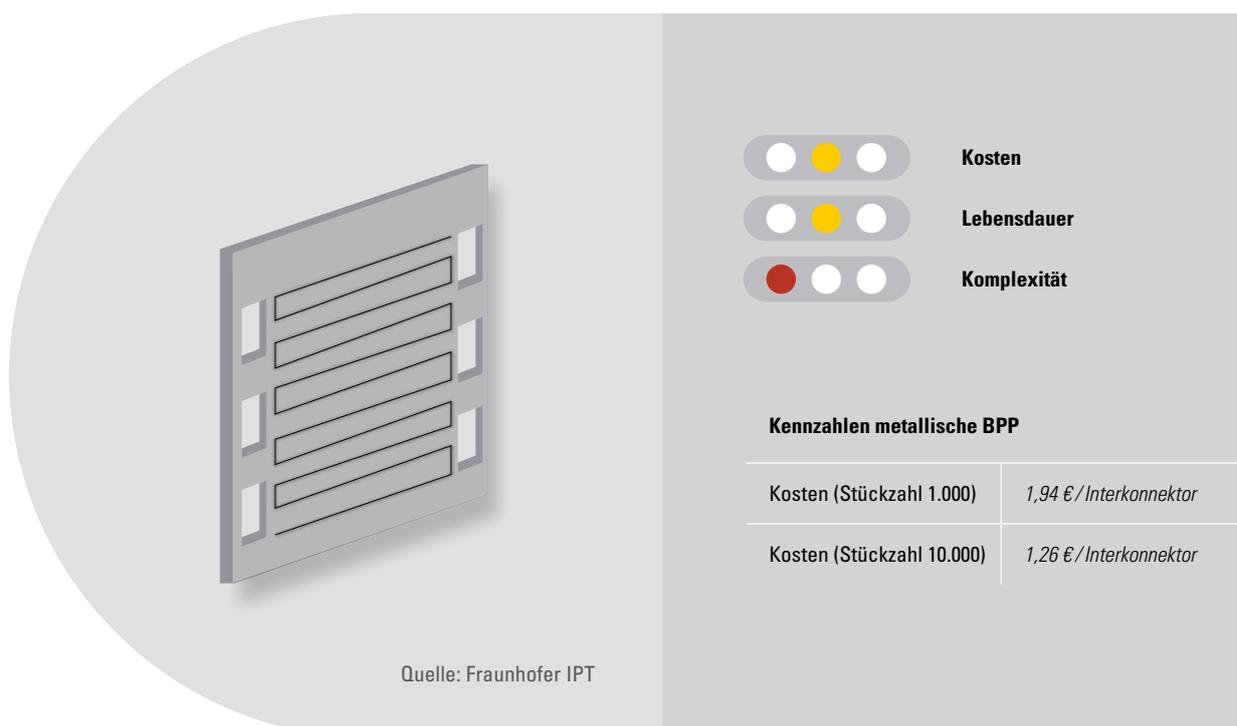


Interkonnektor

Der Interkonnektor verbindet zwei einzelne Zellen miteinander und fungiert somit als Elektronenakzeptor; er muss daher elektrisch leitfähig sein. Zusätzlich leitet er die Reaktionsgase möglichst gleichmäßig in die Zelle ein. Da der Interkonnektor sowohl mit dem Luftkanal als auch mit dem Brennstoffkanal in Kontakt steht, muss er unter oxidierenden und reduzierenden Atmosphären stabil sein. Als Werkstoff werden vor

allem ferritische Stähle verwendet. Diese neigen zum Leaching von Chrom, das mit dem Strontium im kathodischen LSCF-Material reagiert. Das so gebildete Strontiumchromat SrCrO_4 , das in die Grenzfläche zwischen Kathode/Interkonnektor wandert und eine isolierende Barriere bildet, erhöht den inneren Widerstand des Systems. Die ferritischen Stähle Crofer[®] 22 H und Crofer[®] 22 APU enthalten einen gewissen Mangananteil, was zu einer Chrom-Mangan-Spinellstruktur auf dem Interkonnektor führt. Diese Schicht

ABBILDUNG 43 Schematische Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines metallischen Interkonnektors



behindert die Chrom-Verdampfung und führt somit zu einem konstanten Widerstand in der Zelle. Eine weitere Alternative zum Korrosionsschutz ist die Herstellung von Interkonnektoren aus Chrompulver. Dies führt einerseits zu höheren Kosten, andererseits aber zu einer besseren Leistung des Gesamtsystems.

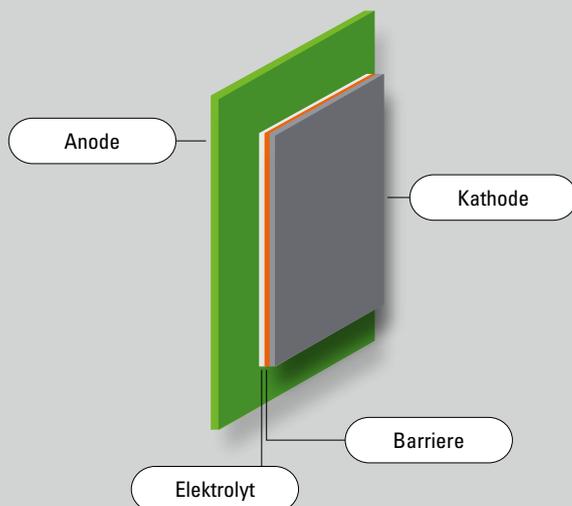
Literatur

- Battelle Memorial Institute "Manufacturing Cost Analysis of 1, 5, 10 and 25 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications" (2017)
- Harboe et al. "Manufacturing cost model for planar 5 kWel SOFC stacks at Forschungszentrum Jülich" International Journal of Hydrogen Energy 45 (2020) 8015 8030
- Fang et al. "SOFC stack performance under high fuel utilization" International Journal of Hydrogen Energy 40 (2015) 1128 1136

Zelle

Die ASC besteht aus mehreren keramischen Schichten, die im Folgenden einzeln vorgestellt werden. Das mehrschichtige Bauteil wird in einen Rahmen eingesetzt und mit dem Interkonnektor verbunden. Die Herstellung der ASC erfolgt ausgehend vom Anodensubstrat, auf das schrittweise die Schichten des aktiven Anodenbereiches, des Elektrolyten, der Barrierschicht und schließlich der Kathode aufgebracht werden.

ABBILDUNG 44 Schematische Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen einer Zelle (ASC)



Kennzahlen metallische BPP

Kosten (Stückzahl 1.000)	8,63 €/Zelle
Kosten (Stückzahl 10.000)	6,18 €/Zelle

Elektrolyt

Die Hauptanforderungen an den Elektrolyten sind Gasdichtheit, hohe ionische Leitfähigkeit und geringe elektrische Leitfähigkeit. Er muss sowohl unter oxidierenden als auch unter reduzierenden Atmosphären elektrochemisch stabil und undurchlässig für Wasserstoff sein. Zirkondioxid (ZrO_2) als ein mögliches Material ist sehr gebräuchlich, da es sich kostengünstig und einfach herstellen lässt. Die Einarbeitung von Yttriumoxid (Y_2O_3) stabilisiert die vorteilhafte kubische Phase bis hinunter zu Umgebungstemperaturen und erhöht die Leitfähigkeit für Sauerstoff-Ionen. Aus dem aus yttriumstabilisierten Zirkoniumoxid (YSZ) wird unter Zugabe eines Bindemittels und Wasser ein Gemisch hergestellt, das auf die Anode aufgetragen werden kann.

Anode

Die Anode muss porös sein, damit die Wasserstoffmoleküle an den katalytischen Bereichen wechselwirken können. Die reduzierende Atmosphäre stellt hohe Anforderungen an die verwendeten Materialien. Edelmetalle sind geeignet, aber zu teuer. Die übliche Wahl ist eine Matrix aus YSZ und Übergangsmetallen. Der beste Kandidat ist Nickel, da es den größten chemischen Stabilitätsbereich und die höchste elektrochemische Aktivität für die Wasserstoffoxida-tionsreaktion besitzt. Diese Keramik-Metall-Komposition wird als Cermet bezeichnet. Das Nickel bietet die elektronische Leitfähigkeit, während das YSZ die Leitbahnen für die Sauerstoff-Ionen bereitstellt. Wie bereits erwähnt, kann die Anode in zwei Bereiche unterschieden werden: das Anodensubstrat und die anodenaktive Schicht. Der Hauptunterschied ist die Ni/YSZ-Mikrostruktur, die in der aktiven Schicht am Elektrolyten feiner und im Substrat am Interkonnektor

größer ist. Der Nickelanteil liegt bei mindestens 40 %, um eine ausreichende elektronische Leitfähigkeit zu gewährleisten. Das Substrat dient als stabiler Träger; andere Materialien werden durch Druckverfahren schichtweise darauf aufgebracht. Nickeloxid und YSZ werden ebenfalls mit Wasser, Bindemitteln und ggf. weiteren Zusätzen zu einem Gemisch verarbeitet, das dann weiterverarbeitet werden kann.

Kathode

Die Hauptaufgabe der Kathode ist es, eine hohe katalytische Aktivität für die Reduktion von Sauerstoff bereitzustellen. Daher muss die Elektrode ein elektrischer und ionischer Leiter sein und sie muss porös für die ankommenden Sauerstoffmoleküle sein. Edelmetalle sind unter stark oxidierenden Atmosphären stabil, aber zu teuer. Daher werden Oxidmaterialien bevorzugt, die elektronisch leitfähig sind. Besonders die Oxidmaterialien mit Übergangsmetallen sind gute Kandidaten, da sie mehrere Wertigkeitszustände bieten. Viele dieser Materialien haben eine Perowskit-Struktur (ABO_3 -Struktur). Die Perowskit-Struktur benötigt mindestens zwei verschiedene Materialien plus Sauerstoffatome, die in der Regel mittels Oxidverbindungen eingebracht werden. Die A-Kationen sind an zwölf und die B-Kationen an sechs Sauerstoffatomen koordiniert.

Einen guten Kompromiss zwischen elektrischer und ionischer Leitfähigkeit, thermischem Ausdehnungskoeffizienten, Reaktivität mit YSZ und elektrochemischer Aktivität bieten Materialien auf Lanthan (La)-Basis.

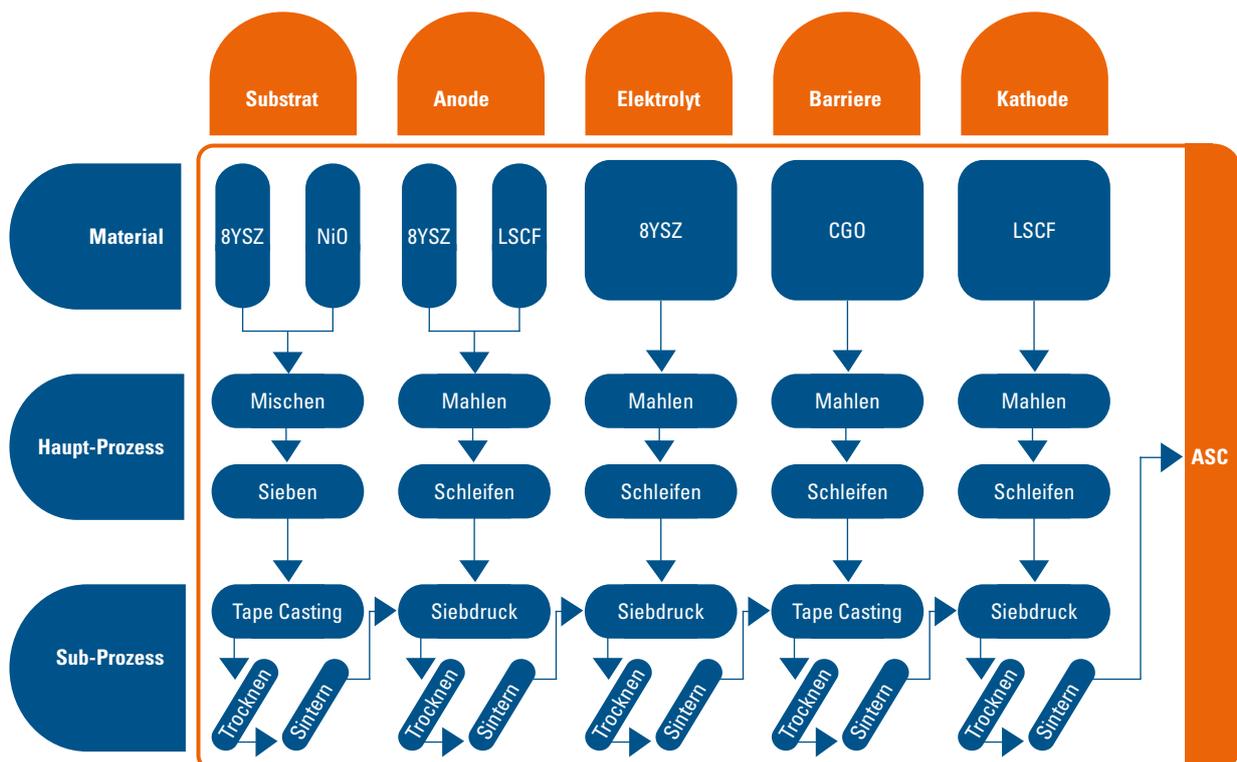
Barrierschicht

Durch die Reaktion des Strontiums (Sr) in der Kathode mit dem ZrO_2 im Elektrolyten bildet sich eine ionische Sperrschicht aus Strontium-Zirkonoxid ($SrZrO_3$) aus, die den Eintritt von Sauerstoff-Ionen in den Elektrolyten verhindert und somit die elektrochemische Hauptreaktion unterbindet. Eine Lösung für dieses Problem bietet eine Barrierebeschichtung, die ionisch leitfähig und elektrisch isolierend sein muss. Eine gängige Wahl ist CGO, ein Material, das ähnliche Eigenschaften wie YSZ aufweist. Diese Schicht verringert das $SrZrO_3$ -Wachstum, hält es aber nicht vollständig auf, da an den LSCF/CGO- und CGO/YSZ-Grenzflächen aufgrund der Korngrenzendiffusion durch die CGO-Schicht immer noch eine Reaktion des Sr mit dem ZrO_2 stattfinden kann.

Produktion der Zelle

Die Produktion der ASC erfolgt durch wiederkehrendes Zerkleinern, Mischen, Beschichten und anschließendem Trocknen bzw. Sintern. Diese Prozesse werden meist durch ähnliche Produktionsmaschinen abgedeckt, lediglich für die Fertigung des Substrates werden schnellere bzw. einfachere Anlagen genutzt. Grund dafür ist, dass das Substrat nicht die Feinporigkeit der restlichen Schichten erreichen muss. Deshalb erscheint es ausreichend, dass die Rohstoffe (YSZ und NiO) in einem Taumelmischer unter Zugabe der Bindemittel und Additive homogenisiert werden. Durch ein Sieb wird eine hinreichende Homogenisierung sichergestellt. Anschließend wird das Gemisch mittels Foliengießen inklusive anschließender Trocknung und Sintern zu der Substratfolie weiterverarbeitet.

ABBILDUNG 45 Prozessschema der ASC-Produktion



Die folgenden Materialien sind wesentlich dünner und benötigen eine höhere Homogenität. Deshalb werden ihre Edukte in zwei Schritten gemahlen. Anschließend werden sie per Siebdruckverfahren aufgebracht und zwischen jedem Schritt getrocknet und gesintert. Das Prozessschema ist in Abbildung 45 dargestellt. Im Folgenden soll auf den Foliengießprozess und den Siebdruckprozess eingegangen werden.

Foliengießen

Foliengießen ist eine Methode zur Herstellung großflächiger Folien auf Trägerfolien oder anderen Substraten. Die definierte Dicke wird hauptsächlich durch die Spaltgröße der Klinge zur Oberfläche gesteuert. Für die Verarbeitung im Labormaßstab wird die Klinge über eine ebene Fläche bewegt. Für großflächige Rolle-zu-Rolle-Prozesse wird die Klinge über dem sich bewegenden Substrat fixiert. Die Tinte wird vor die feste Klinge aufgetragen und das Substrat bewegt sich relativ zur Klinge. Die Gießgeschwindigkeit wird durch die Materialeigenschaften des Gemisches begrenzt, da ein zu schneller Lauf zu einer ungleichmäßigen Abscheidung führen kann.

Siebdruck

Der Siebdruck ist eine Methode, eine definierte Geometrie auf ein Substrat zu beschichten, und hat einen einfachen Aufbau, bestehend aus einem Sieb, einer Rakel und einem Bett. Je nach Produktionsvolumen sind zwei verschiedene Herstellungsverfahren anwendbar: Bei kleinen Batchgrößen wird der Siebdruck als Flachbettverfahren und bei großen Batchgrößen als Rotationssiebdruck ausgeführt. Beim Flachbettsiebdruck wird die auf das Sieb gegossene keramische Formulierung durch das Sieb gedrückt und so durch die Schablonenöffnungen auf das darunterliegende Substrat übertragen. Flachbettsiebe können

bei der kontinuierlichen Verarbeitung durch Rotationsiebe ersetzt werden, während sich die Rakel und die keramische Formulierung im Inneren des Zylinders befinden.

Literatur

- Battelle Memorial Institute "Manufacturing Cost Analysis of 1, 5, 10 and 25 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications" (2017)
- Harboe et al. "Manufacturing cost model for planar 5 kWel SOFC stacks at Forschungszentrum Jülich" International Journal of Hydrogen Energy 45 (2020) 8015 8030
- Fang et al. "SOFC stack performance under high fuel utilization" International Journal of Hydrogen Energy 40 (2015) 1128 1136
- L. Kröll et al. "Degradation Mechanisms in Solid-Oxide Fuel and Electrolyzer Cells: Analytical Description of Nickel Agglomeration in a Ni/YSZ Electrode" PHYSICAL REVIEW APPLIED 7 (2017) 04407
- Y. Chen-Wiegart et al. "Effect of Ni content on the morphological evolution of Ni-YSZ solid oxide fuel cell electrodes" APPLIED PHYSICS LETTERS 108 (2016) 083903
- S. Anirban et al. "Vacancy mediated ionic conduction in Dy substituted nano ceria: A structure-property correlation study" RSC ADVANCES 5 (2015)
- https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-showing-the-dense-film-solution-cast-with-a-casting-knife-10_fig9_313507533
- www.kex.net
- M. Bodner et al. "Enabling industrial production of electrodes by use of slot-die coating for HTPEM fuel cells" INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 44 (2019) 12793 –12801
- <https://nikantes.weebly.com/home/printing-types-development-of-screen-as-well-as-the-printing-procedure>

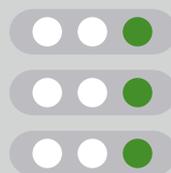
Mesh

Auf der Anodenseite des Interkonnektors wird ein Drahtgeflecht angebracht, um die elektrische Leitfähigkeit zu verbessern und den reagierenden Gasen den Zugang zum elektrochemisch aktiven Bereich der Zelle zu erleichtern. Die Maschen können sich in Drahtstärke und Maschengröße unterscheiden, was sich direkt auf die Anzahl der Schweißpunkte auswirkt. Es gibt verschiedene Konstruktionsansätze. Bei einem Ansatz wird nur eine Masche mit der Anodenseite des Interkonnektors verbunden, aber es sind auch andere Konstruktionen möglich, z. B. die Kontaktierung von zwei verschiedenen Maschen auf einer Seite oder die Kontaktierung beider Seiten mit einer Masche. Wird als Interkonnektormaterial ein Standard-Edelstahl und nicht ein für die Anwendung entwickelter Stahl wie Crofer verwendet, müssen die Interkonnektoren in der Regel von beiden Seiten beschichtet werden. Diese

Beschichtung erlaubt jedoch kein Verschweißen des Gewebes, da die Schweißstellen die Beschichtung beeinträchtigen würden. Der entsprechend höhere Schutz des beschichteten Interkonnektors wird mit einem schlechteren elektrischen Kontakt erkauft, was zu einer kürzeren Lebensdauer und einer geringeren Leistungsdichte führt. Eine Beschichtung nach Verschweißen der beiden Lagen ist Gegenstand der Forschung.

Die Masche selbst ist für die Lebensdauer unkritisch. Der einzige relevante Degradationsmechanismus kann die Verschlechterung des Kontakts sein, die auftritt, wenn die Schweißnaht nicht in ausreichender Qualität ausgeführt wurde.

ABBILDUNG 46 Schematische Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Meshs



Kosten

Lebensdauer

Komplexität

Kennzahlen

Kosten

1 – 2 €/Mesh

Quelle: Fraunhofer IPT

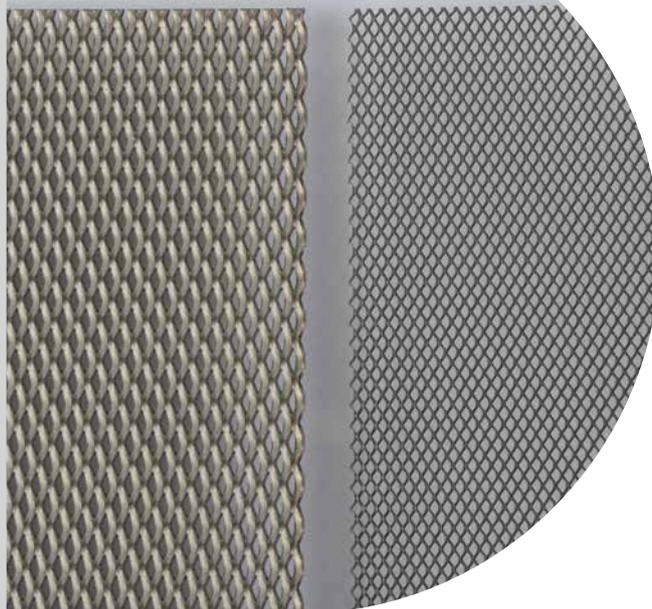


ABBILDUNG 47 Ein mögliches Prozessschema für die Produktion von metallischen Meshs



Literatur

- Battelle Memorial Institute "Manufacturing Cost Analysis of 1, 5, 10 and 25 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications" (2017)
- Harboe et al. "Manufacturing cost model for planar 5 kWel SOFC stacks at Forschungszentrum Jülich" International Journal of Hydrogen Energy 45 (2020) 8015 8030
- Fang et al. "SOFC stack performance under high fuel utilization" International Journal of Hydrogen Energy 40 (2015) 1128 1136

Glas-Dichtung

Die chemischen und thermischen Bedingungen stellen sehr hohe Anforderungen an die Werkstoffe und Dichtungen. Der Wasserstoff wirkt reduzierend und

der Luftsauerstoff oxidierend, insbesondere bei hohen Betriebstemperaturen. Diese hohen Temperaturen schließen die Verwendung der meisten Kunststoffe als Dichtungsmaterial aus. Stattdessen müssen komplexere Materialverbindungen in Betracht gezogen werden.

In der SOFC-Technologie sind Dichtungen auf Glasbasis eine Möglichkeit, bei hohen Temperaturen zuverlässig zu dichten. Zur Herstellung wird in einem ersten Schritt eine Aufschlämme aus Glaspulver, YSZ-Fasern und organischen Materialien gemischt. Aus der Aufschlämme werden im Siebdruckverfahren Grünfolien hergestellt, die zwischen die miteinander verbundenen Stahlteile gelegt werden. Zur weiteren Verarbeitung kann die Glasversiegelung in einem separaten Vorspannschritt gesintert werden, bevor der Stack vollständig zusammengesetzt wird. Eine andere Möglichkeit ist das Mitsintern im letzten Schritt des Glühens des kompletten Stacks.

Die Glasversiegelung wird während ihrer Lebensdauer nicht wesentlich beeinträchtigt. Wenn die Montage jedoch nicht die erforderliche Qualität aufweist, kann es zu Undichtheiten kommen, die sich mit der Zeit ver-

ABBILDUNG 48 Qualitative Bewertung und Kennzahlen einer Glasdichtung

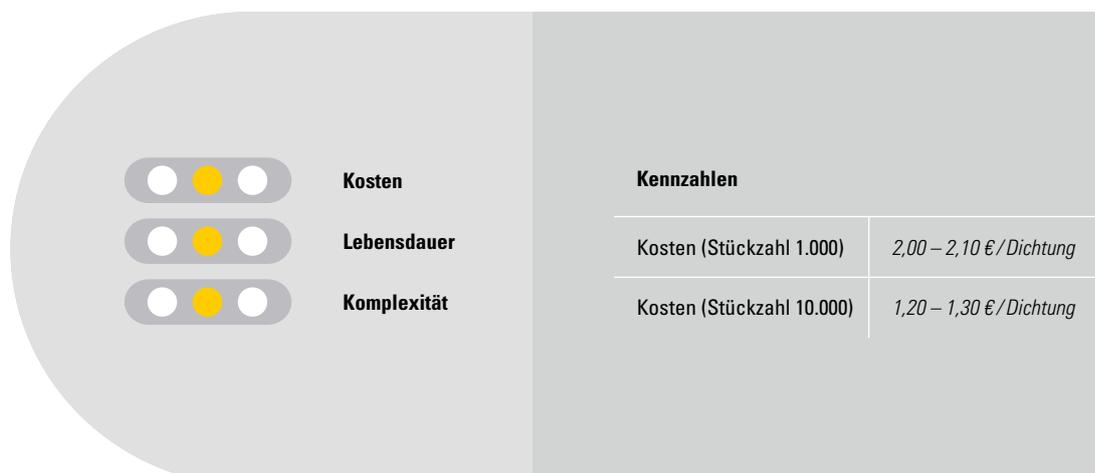


ABBILDUNG 49 Mögliches Prozessschema für die Produktion von Glasdichtungen



schlimmern können. Neben Glasdichtungen sind auch Dichtungsmaterialien auf Aluminiumbasis, Klebelösungen und Kompressionsdichtungen möglich.

Literatur

- Battelle Memorial Institute “Manufacturing Cost Analysis of 1, 5, 10 and 25 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications” (2017)
- Harboe et al. “Manufacturing cost model for planar 5 kWel SOFC stacks at Forschungszentrum Jülich” International Journal of Hydrogen Energy 45 (2020) 8015 8030
- Fang et al. “SOFC stack performance under high fuel utilization” International Journal of Hydrogen Energy 40 (2015) 1128 1136

Rahmen

Der Rahmen besteht in der Regel aus demselben Material wie die Interkonnectoren und/oder die Endplatte. Aufgrund der zentralen Aussparungen und der geringeren Dicke ist das Gewicht deutlich geringer als das eines Interkonnectors. Seine Funktion besteht hauptsächlich in der Aufnahme der Zelle und der Stabilisierung der Wiederholeinheit.

Die Anzahl der erforderlichen Produktionsschritte ist geringer als die Anzahl der Produktionsschritte, die zur Herstellung des Interkonnectors erforderlich sind. Der Einfluss der Rahmen auf die Lebensdauer wird in ers-

ABBILDUNG 50 Qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Rahmens

Kennzahlen	
Kosten (Stückzahl 1.000)	1,00 – 1,10 €/Rahmen
Kosten (Stückzahl 10.000)	0,90 – 1,00 €/Rahmen



ter Linie durch den Zusammenbau und nicht durch die Materialermüdung bestimmt. Es können auch mehrere Rahmen pro Wiederholeinheit verbaut werden. Die Anzahl der Rahmen hängt stark von der Auslegung der SOFC ab. Pro Wiederholungseinheit können bis zu drei Rahmen erforderlich sein. In manchen Fällen werden auch zwei Rahmen miteinander verschweißt, sodass aus drei Rahmen effektiv zwei werden.

Literatur

- Battelle Memorial Institute “Manufacturing Cost Analysis of 1, 5, 10 and 25 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications” (2017)
- Harboe et al. “Manufacturing cost model for planar 5 kWel SOFC stacks at Forschungszentrum Jülich” International Journal of Hydrogen Energy 45 (2020) 8015 8030
- Fang et al. “SOFC stack performance under high fuel utilization” International Journal of Hydrogen Energy 40 (2015) 1128 1136

Endplatte

Die Endplatte dient der sicheren Befestigung bzw. dem druckhomogenen Zusammenbau des Stacks. Dementsprechend muss eine solche Platte stabil sein, um dem für die Verbindung erforderlichen Druck standhalten zu können.

Üblicherweise besteht die Endplatte aus Stahl, der auch beschichtet sein kann. Da in einem Stack nur zwei dieser Platten benötigt werden, ist der Forschungsaufwand, insbesondere hinsichtlich der Gewichtsreduzierung, im Vergleich zu anderen Stackkomponenten vergleichsweise gering. In den meisten Fällen besteht die Endplatte aus einem ähnlichen Material wie die Rahmen und Verbindungselemente. Eine gängige Wahl ist rostfreier Stahl wie SS441. Eine Alternative ist Crofer22 H, das etwas preiswerter ist als Crofer22 APU. Es sind jedoch auch Konfigurationen denkbar, bei denen die Anoden- und Kathodenendplatten aus unterschiedlichen Materialien bestehen, da nur eine Seite einer reduzierenden oder oxidierenden Atmosphäre ausgesetzt ist.

ABBILDUNG 51 Qualitative Bewertung und Kennzahlen einer Endplatte



Literatur

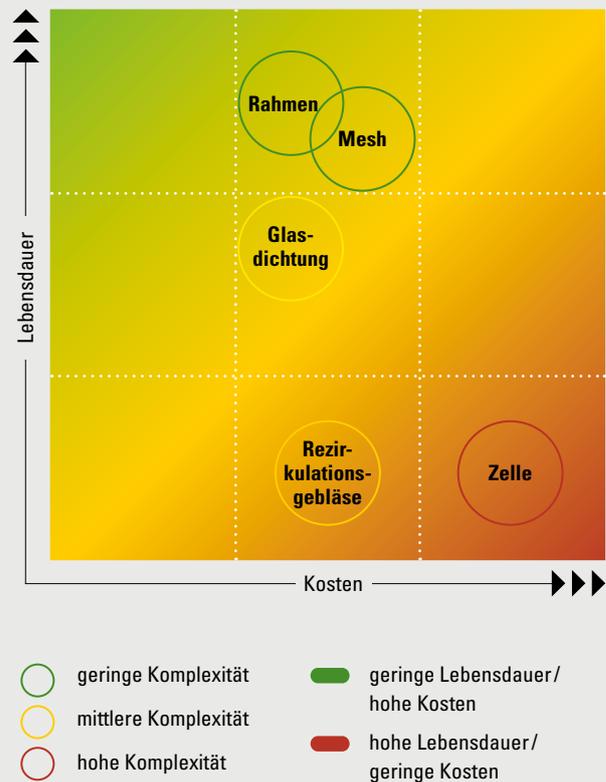
- Battelle Memorial Institute “Manufacturing Cost Analysis of 1, 5, 10 and 25 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications” (2017)
- Harboe et al. “Manufacturing cost model for planar 5 kWel SOFC stacks at Forschungszentrum Jülich” International Journal of Hydrogen Energy 45 (2020) 8015 8030
- Fang et al. “SOFC stack performance under high fuel utilization” International Journal of Hydrogen Energy 40 (2015) 1128 1136

Fazit

Der SOFC-Stack besteht aus mehreren Bauteilen, wobei nur der Interkonnektor, die Zelle, die Dichtung, der Rahmen und das Sieb sich wiederholende Bauteile sind. Anhand der durchgeführten qualitativen Bewertungen jeder Komponente können diese nun bezüglich der drei Dimensionen Kosten, Komplexität und Haltbarkeit verglichen werden. Die Übersicht ist in Abbildung 52 dargestellt.

Der Zelle, hier die ASC, ist von allen Bauteilen das kritischste. Das betrifft einerseits die Komplexität durch ihren vielschichtigen Aufbau und andererseits die Zuverlässigkeit aufgrund der harschen Umgebungsbedingungen während der Nutzung. Zusätzlich ist die ASC

ABBILDUNG 52 Zusammenfassung der qualitativen Bewertungen der SOFC-Stack-Komponente



die Komponente, für die zur Herstellung am meisten individuelle Fertigungsschritte notwendig sind. Eine mögliche Kostenreduktion könnte daher durch die Skalierung der Produktionstechnologie erreicht werden.

Der Interkonnektor ist etwas günstiger, aber genauso komplex. Beide Bauteile müssen exakt aufeinander abgestimmt sein, um eine funktionale SOFC zu erhalten. Auch der Interkonnektor muss mehrere Fertigungsverfahren durchlaufen, um alle benötigten

Funktionen zu integrieren. Daher ist auch hierbei ein potenzielles Kostensenkungspotenzial durch Hochskalierung vorhanden. Ein besonderes Augenmerk in der Produktion sollte auf die spätere Nutzung des Interkonnektoren bei hohen Temperaturen gelegt werden.

Das Mesh ist ein Bauteil, das weder komplex noch teuer oder kritisch in Bezug auf die Lebensdauer ist. Lediglich eine fehlerhafte Verbindung durch schlechtes Schweißen kann zu einer erhöhten Degradationsrate führen. Aus produktionstechnologischer Sicht ist die Herstellung bereits hochskaliert in anderen Industriezweigen.

Aufgrund der hohen Temperaturen sind herkömmliche Dichtungsmaterialien nicht für die SOFCs geeignet. Ein gängiges Material sind Dichtungen aus Glasfaser-Verbänden. Dieses Material ist aufwendiger herzustellen und auszuhärten als herkömmliche Dichtungsmaterialien und daher etwas teurer.

Die Rahmen sind genau wie die Interkonnektoren ebenfalls aus Stahl gefertigt, benötigen aber weniger Material. Die Rahmen sind daher günstiger als die Interkonnektoren. Komplexität und Verlässlichkeit sind ebenfalls geringer, da die Rahmen nur stabilisierende Funktionen haben und kein z. B. Strömungsfeld besitzt.

Die Endplatten verursachen vergleichsweise hohe Kosten bedingt durch die Masse an benötigtem Material. Da jedoch nur zwei Platten für einen Stack benötigt werden, sind die Auswirkungen auf die Gesamtkosten überschaubar.

3.3.4 Aufbau der SOFC-BoP

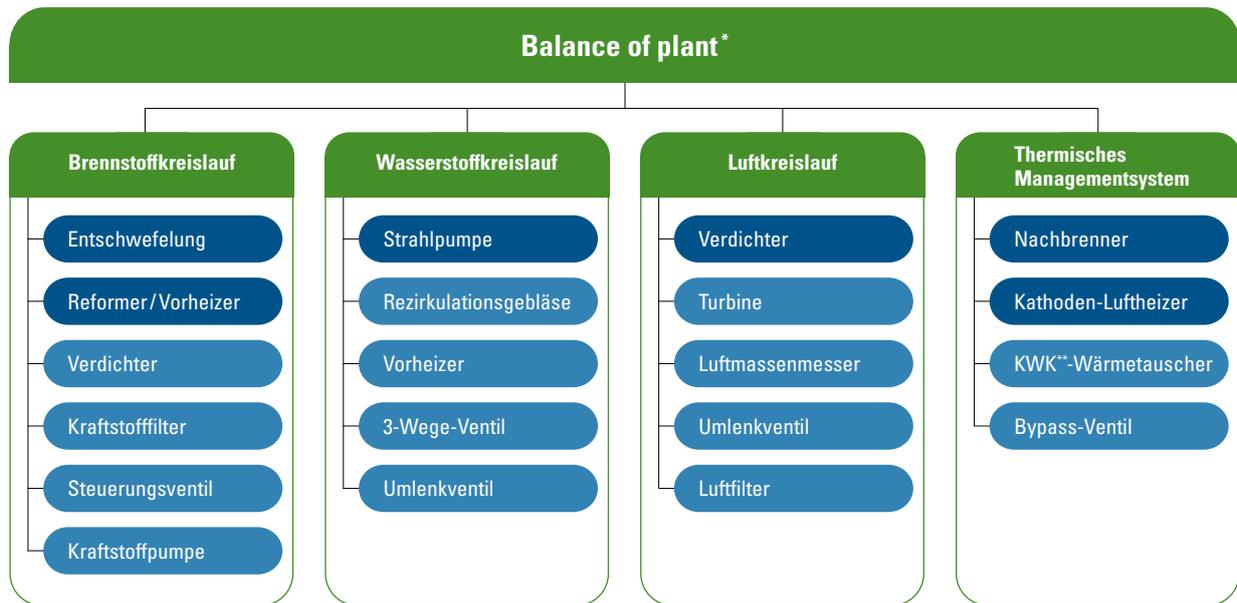
Die Balance-of-Plant (BoP) der SOFC stellt analog zur PEMFC die Versorgung des Brennstoffzellenstacks mit den für den Betrieb erforderlichen Medien und ihre Abführung aus dem Stack sicher. Die Definition und Abgrenzung der Subsysteme ist bei der SOFC jedoch weniger eindeutig als bei PEMFC-Systemen. Dies liegt vor allem darin begründet, dass sich die Gesamtsystemkonfiguration der SOFC je nach Energiequelle, Größe und Anwendung deutlich unterscheiden. Insbesondere die Nutzung der Abwärme, der Einsatz einer Turbine zur Entspannung der Prozessluft, die Auslegung des Brennstoffaufbereitungssystems und das Temperaturniveau bestimmen den Aufbau der BoP. Eine Möglichkeit, die BoP der SOFC in Subsysteme zu unterteilen bietet die Einteilung in (siehe Abbildung 53):

- Brennstoffkreislauf
- Wasserstoffkreislauf
- Luftkreislauf
- Thermisches Managementsystem

Das Tanksystem und die Komponenten der Leistungselektronik werden in dieser Studie nicht der Balance-of-Plant zugerechnet und nicht näher betrachtet.

In Berichten des amerikanischen Department of Energy wird die Abgasbrennkammer als Teil des Brennstoffkreislaufes erachtet, da die Wärme zur Reformation des Brennstoffes notwendig ist. In dieser Betrachtung wird sie dem thermischen Managementsystem zugeordnet, da die Wärme der Verbrennung auch zur thermischen Steuerung der Zelle verwendet werden

ABBILDUNG 53 Komponenten der Balance of Plant einer SOFC



* optionales Wassersystem ist nicht enthalten

■ Komponente wird in dieser Studie näher betrachtet

** KWK = Kraft-Wärme-Kopplung

■ Komponente wird in dieser Studie nicht näher betrachtet

kann. In anderen Arbeiten wird der Reformer/Vorheizer zum Wasserstoffkreislauf gezählt, da der Wasserstoff in diesem Bauteil erzeugt wird. Von dieser Unter- teilung wird hier abgesehen, da SOFC-Systeme auch unmittelbar mit Wasserstoff versorgt werden können. In diesem Fall wäre der Einsatz eines Reformers nicht erforderlich.

Brennstoffkreislauf

SOFC-Systeme können mit einer Vielzahl von gasfö- rigen oder flüssigen Energieträgern, darunter Erdgas, Wasserstoff, Kerosin oder Diesel, betrieben werden. Je nach Energieträger unterscheiden sich die Brenn- stoffkreisläufe deutlich voneinander. Erfolgt die Brenn- stoffversorgung gasförmig, kann je nach Druckniveau des Tanksystems eine Kompressionsstufe vor die weitere Behandlung des Brennstoffs geschaltet sein.

Bei einer flüssigen Brennstoffversorgung, beispie- lweise durch Kerosin im Flugzeug oder Diesel im Lkw, werden die Systeme mit zusätzlichen Kraftstoffpum- pen ausgestattet, um eine konstante Brennstoffver- sorgung gewährleisten zu können. Bevor der Brenn- stoff in den Reformer oder auf die Anode der SOFC gelangt, werden über eine Entschwefelungsanlage Schwefelverbindungen aus dem Brennstoff entfernt. Das Herzstück des Brennstoffversorgungskreislaufs ist der Reformer, der den fossilen Brennstoff zu Wasser- stoff und Kohlenmonoxid reformiert. Im Allgemeinen können auch andere Systeme auf diese Weise mit Wasserstoff versorgt werden. Die SOFC bietet jedoch den Vorteil, dass nicht reformierte Brennstoffreste intern reformiert werden können, ohne dass die Zelle langfristig geschädigt wird.

Im Folgenden werden der Prozess der Entschwefelung und die Reformierung näher beschrieben.

Entschwefelung

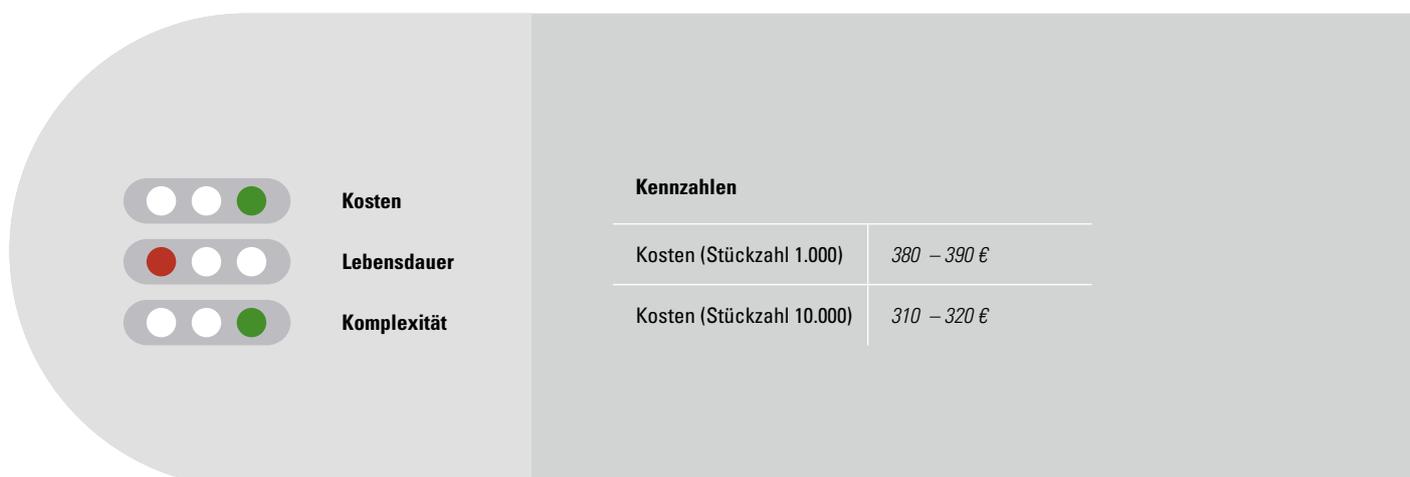
Der in das Brennstoffzellensystem eintretende Brennstoff enthält zumeist Schwefelverbindungen, die nahezu vollständig entfernt werden müssen, bevor das Gasgemisch in den Reformer oder auf die Anode der SOFC gelangt, um eine Vergiftung des Katalysators mit Schwefelwasserstoff (H₂S) zu vermeiden. Die Entschwefelung kann sich in Ausnahmefällen als herausfordernd gestalten, da die Zusammensetzung des Brennstoffes schwanken kann und oft schwefelhaltige Zusatzstoffe mit unterschiedlichen Konzentrationen zugesetzt sind. Die klassische Entschwefelung läuft in zwei Schritten ab. Zunächst werden organische Schwefelverbindungen in einem Temperaturbereich von 200 bis 400 °C in Schwefelwasserstoff und eine kohlenwasserstoffhaltige Verbindung umgewandelt. Im Anschluss wird der Schwefelwasserstoff an Zinkoxid unter der Bildung von Zinksulfid adsorbiert. Hierbei entsteht Wasser.

Die am Zink adsorbierten Schwefelrückstände sammeln sich mit der Zeit im Entschwefeler an, sodass diese Komponente regelmäßig ausgetauscht werden muss. Der Fokus bei der Entwicklung von Entschwefelungsanlagen liegt in der Steigerung der Beladungskapazitäten der Materialien und ihrer wirtschaftlichen industriellen Produktion.

Literatur

- Wahl, S.: Verfahrenstechnische Optimierung und Leistungsskalierung eines Festoxid-Brennstoffzellensystems mithilfe multiphysikalischer Modellierung und experimenteller Daten, Dissertation 2015
- <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/callux-entschwefelung-fuer-brennstoffzellen-heizgeraete/>
- <https://www.babcock.com/products/wet-scrubbers-fgd>
- <https://www.hzi-steinmueller.com/wp-content/uploads/downloads/broschure-flue-gas-cleaning-en.pdf>

ABBILDUNG 54 **Qualitative Bewertung und Kennzahlen der Entschwefelung**



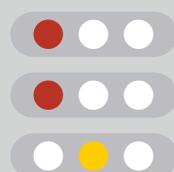
Reformer/Vorheizer

In sogenannten Reformern werden aus dem entschwefelten Brennstoff die längerkettigen Kohlenwasserstoffe in kürzere Kohlenwasserstoffe zerlegt und zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid reformiert. Bei der Reformierung kann zwischen einer vollständigen Reformierung und einer Vorreformierung unterschieden werden. Da in der SOFC ebenfalls ein interner Reformierungsprozess stattfinden kann, ist in den meisten Anwendungsfällen eine Vorreformierung ausreichend. Bei der Reformierung kann im Wesentlichen zwischen der Dampfreformierung, der partiellen Oxidation und der autothermen Reformierung unterschieden werden.

In der Startphase des Brennstoffzellensystems wird der Reformer über ein Anfahrgebläse mit Umgebungsluft und Erdgas versorgt. Der in der Luft vorhandene

Sauerstoff reagiert in einer partiellen Oxidation mit dem Erdgas zu Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid. Ein großer Vorteil der partiellen Oxidation ist die Verwendung von Sauerstoff anstelle von Wasser für die Oxidation, weshalb keine Wasserzufuhr erforderlich ist. Der Prozess ist stark exotherm. Wenn die Zelle ihren Arbeitspunkt erreicht hat, wird das entstehende Wasser mit dem ungenutzten Wasserstoff aus der Brennstoffzelle über die Anodenrückführung in den Reformer zurückgeführt. Durch den nun verfügbaren Dampf wird eine endotherme Dampfreformierung angestoßen, durch die Wasserstoff sowie Kohlenstoffmonoxid und dioxid produziert werden. Die Wärme für die endotherme Reformierungsreaktion wird durch die exotherme elektrochemische Reaktion der Zelle zur Verfügung gestellt. Die durch die Reformierung entstandenen Produkte Kohlenmonoxid und Wasserstoff werden anschließend als Edukte für die elektrochemische Reaktion der Zelle genutzt.

ABBILDUNG 55 Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Reformers/Vorheizers



Kosten

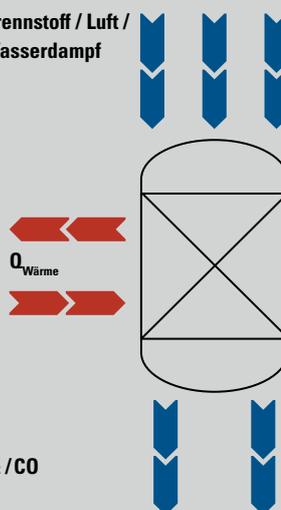
Lebensdauer

Komplexität

Kennzahlen

Kosten (Stückzahl 1.000)	1.500 – 1.600 €
Kosten (Stückzahl 10.000)	1.000 – 1.100 €

Medien: **Brennstoff / Luft /
Wasserdampf**



Der Reformer ist aufgrund seiner hohen Relevanz für das System als kritisches Bauteil einzustufen. Ein Ausfall dieser Komponenten führt zur Vergiftung der Zelle. Die Lebensdauer des Reformers wird oft mit nur 5 Jahren angegeben.

Literatur

- Wahl, S.: Verfahrenstechnische Optimierung und Leistungsskalierung eines Festoxid-Brennstoffzellensystems mit Hilfe multiphysikalischer Modellierung und experimenteller Daten, Dissertation 2015
- <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-018-2331-5>
- <https://matthey.com/en/products-and-services/chemical-processes/chemical-catalysts/catacel-ssr-catalyst>
- <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.1c04698>
- https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4939-2493-6_1020-1
- <https://www.precision-combustion.com/our-solutions/fuel-processors/sofc-fuel-processor>

Wasserstoffkreislauf

Im Falle der mit fossilen Brennstoffen betriebenen SOFC entspricht das Layout prinzipiell dem Rezirkulationskreislauf einer PEMFC, wie er in Kapitel 3.2.4 dargestellt wurde. Die Rezirkulation des unverbrauchten Wasserstoffs kann mittels eines Rezirkulationsgebläses oder einer Strahlpumpe realisiert werden. Hierbei sind mehrere Konfigurationen denkbar. Neben dem Aufbau eines aktiven Systems mit einem einzelnen Rezirkulationsgebläse oder einer Kombination aus Gebläse und Strahlpumpe ist auch ein passives System mit einer oder zwei verbauten Strahlpumpen denkbar. Die Auswahl der passenden Technologie unterliegt denselben Überlegungen wie bei der Auslegung des Wasserstoffkreislaufes bei der PEMFC. Diese sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Aufgrund

der unterschiedlichen Anwendungen und Systemgrößen der SOFC spielen die Rahmenbedingungen bei der Auslegung des Wasserstoffkreislaufes eine nicht irrelevante Rolle. Insbesondere bei Anwendungen der SOFC als APU im Luftverkehr werden an die Systeme erhöhte Sicherheitsanforderungen gestellt, weshalb im Bereich des Wasserstoffkreislaufes ein Rezirkulationsgebläse vorerst als die beste Wahl angesehen wird.

Luftkreislauf

Auch der Luftkreislauf kann prinzipiell dem Design einer PEMFC, beschrieben in Kapitel 3.2.4, entnommen werden. Analog zur Funktion in der PEMFC hat der Luftkreislauf die Aufgabe, die angesaugte Umgebungsluft zu filtern und zu verdichten. Da eine SOFC nicht so sensibel auf Verunreinigungen reagiert wie die PEMFC, hat die Luftqualität einen weniger starken Einfluss auf die Zelleistung und -degradation. Durch die hohen Prozesstemperaturen in der SOFC benötigt das System keinen Ladeluftkühler. Ebenfalls kann auf einen Befeuchter verzichtet werden, da die Zellperformance der SOFC nicht von der Feuchte der angesaugten Luft abhängig ist.

Besondere Aufbauten der Luftkreisläufe werden beispielsweise in maritimen Anwendungen und in Flugzeugen eingesetzt. Der Luftkreislauf einer APU im maritimen Bereich weist die Besonderheit auf, dass zwei Luftkompressoren integriert sind. Ein Kompressor wird für die Startphase, der zweite für den kontinuierlichen Betrieb des Systems genutzt. Im Falle der APU eines Flugzeugs wird die Abgasluft noch in der Abgasbrennkammer erwärmt, um die angekoppelte Turbine effizienter zu betreiben.

Verdichter

Viele SOFC-Brennstoffzellensysteme haben in ihrer BoP zwei Verdichter bzw. Gebläse verbaut, die unterschiedliche Funktionen besitzen. Der erste Verdichter dient dazu, den Reformer in der Startphase des Gesamtsystems mit ausreichend Umgebungsluft für die partielle Oxidation zu versorgen. Sobald die SOFC ausreichend Wasserdampf und der Nachbrenner genügend thermische Energie für die im Reformer ablaufende endotherme Dampfreformierung bereitstellen, wird der Verdichter abgeschaltet. Sobald der Stack seine Betriebstemperatur erreicht hat, versorgt der zweite Verdichter die Kathode der SOFC mit dem für die Reaktion benötigten Sauerstoff bzw. mit Umgebungsluft.

Bedingt durch die unterschiedlichen Funktionen der Verdichter sind die Anforderungen an die Komponenten sehr unterschiedlich. Während der vorgelagerte Verdichter vor allem im dynamischen Betrieb eingesetzt wird, wird der zweite Verdichter vor allem im Dauerbetrieb des gesamten Brennstoffzellensystems betrieben. Die Lebensdauernanforderungen an den zweiten Verdichter sind damit deutlich höher.

Die in der BoP verbauten Verdichter sind hinsichtlich der parasitären Last, der Kosten und der Lebensdauer als ein kritisches Bauteil der SOFC zu bewerten.

Analog zu den in PEMFC eingesetzten Verdichtern haben die Verdichter der SOFC einen hohen Anteil am Gesamtleistungsbedarf der BoP. Gleichzeitig sind sie

ABBILDUNG 56 Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Verdichters



Kosten



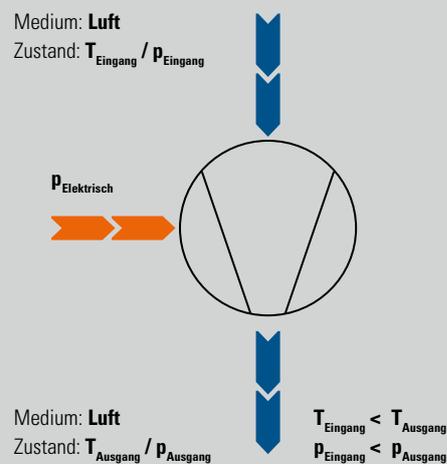
Lebensdauer



Komplexität

Kennzahlen

Maximale Druckdifferenz	4
Maximale Durchflussrate	190 g/s
Elektrische Effizienz	58 – 71 %
Leistungsverhältnis	0,1 – 0,15 kW _{Verdichter} / kW _{Brennstoffzelle}
Kosten (Stückzahl 1.000)	430 – 440 €
Kosten (Stückzahl 10.000)	390 – 400 €



aufgrund der Vielzahl an beweglichen Teilen verglichen mit dem Gesamtsystem sehr störanfällig. Hinsichtlich der Kostenentwicklung ist festzustellen, dass die Komponente auch bei einer Skalierung der Produktion langfristig ein Kostentreiber im Bereich der SOFC bleibt.

Thermisches Managementsystem

In einem Festoxid-Brennstoffzellensystem, das bei relativ hohen Temperaturen von $> 500\text{ °C}$ betrieben wird, ist das Wärmemanagement von zentraler Bedeutung: Zum einen geht es um den angemessenen und sicheren Betrieb und die Wartung des Systems, zum anderen um die effiziente Nutzung der Wärmeenergie, die für eine leistungsstarke und dezentrale Energiegewinnung erforderlich ist. Der Aufbau des thermischen Systems hängt stark von der Auslegung und der Nutzung des Brennstoffzellensystems ab. Damit sind auch die im thermischen Management verbauten Komponenten nicht eindeutig definiert. In allen SOFC-Systemen kommt in der Regel ein Kathoden-Luft-Heizer zum Einsatz, der die Aufgabe hat, die aus dem Verdichter kommende Prozessluft vorzuwärmen, bevor sie in die Zelle einströmt. Ein weiterer Hauptbestandteil des Thermischen Managementsystems ist der Nachbrenner, der unverbrannten Brennstoff thermisch umsetzt, um ausreichend thermische Energie für den Reformationsprozess bereitzustellen. Wenn die Abwärme des Systems noch nutzbar gemacht werden soll, wird ein weiterer Wärmeaustauscher am Abgaskanal integriert, der diese Wärme in einen Niedertemperaturkreislauf einspeist. Jede Komponente ist thermisch so gut wie möglich integriert, um die Wärmeverluste der einzelnen Komponenten niedrig zu halten und einen möglichst hohen Gesamtwirkungsgrad des Systems

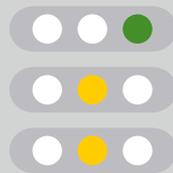
zu erzielen. Die Beanspruchungen der Bauteile des Thermischen Managementsystems durch die hohen Temperaturen sind in der Regel sehr hoch, was sich negativ auf die Lebensdauer auswirkt.

Die beiden Hauptkomponenten des thermischen Managementsystems, die Kathodenluftheizung und der Nachbrenner werden im Folgenden beschrieben.

Nachbrenner

In der Startphase des SOFC-Stacks wird die vorgelagerte Reformation des Brennstoffs über eine partielle Oxidation realisiert. Die Startphase des Stacks ist in der Regel deutlich länger als bei der PEMFC, da das Hochfahren des Systems auf Betriebstemperatur aufgrund des hohen Temperaturniveaus mehr Zeit in Anspruch nimmt. Der Reformationsprozess der partiellen Oxidation ist stark endotherm und benötigt eine große Menge an Wärmeenergie. Da die Zelle in der Startphase noch nicht ihre Betriebstemperatur erreicht, wird die für die Reformation benötigte Wärme über einen Nachbrenner bereitgestellt. Dazu wird der Brennstoff direkt in den Nachbrenner geleitet, wo er mit der Kathodenluft verbrannt wird. Die so entstehende Wärme kann im Anschluss sowohl für den Reformationsprozess als auch für die Vorwärmung der Kathodenluft genutzt werden. Durch diese thermische Verwertung stellt der Nachbrenner sicher, dass die hohen Betriebstemperaturen der SOFC ($500\text{--}1000\text{ °C}$) jederzeit aufrechterhalten werden können. Neben der direkten Verbrennung des Brennstoffs können im Nachbrenner die Überschussbrenngase aus der Anoden- und die Abgase aus der Kathodenseite thermisch verwertet werden. Dies erhöht den Gesamtwirkungsgrad des Systems deutlich.

ABBILDUNG 57 Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Nachbrenners


Kosten
Lebensdauer
Komplexität
Kennzahlen

Kosten (Stückzahl 1.000)	350 – 360 €
Kosten (Stückzahl 10.000)	320 – 330 €

 Medien: **Brennstoff / H₂ / Luft / Abgase**
 $Q_{\text{Wärme}}$

 Medien: **H₂ / CO**
 $T_{\text{Eingang}} < T_{\text{Ausgang}}$

Die durch die hohen Temperaturen induzierten mechanischen Spannungen sind in der Regel sehr hoch, was sich negativ auf die Lebensdauer des Bauteils auswirkt. Die Kosten für den Nachbrenner sind vergleichsweise moderat, da die Technologie bereits in vielen Anwendungen zum Einsatz kommt. Dadurch können Synergien zwischen den Einzelentwicklungen gezogen und Kostensenkungspotenziale realisiert werden.

Literatur

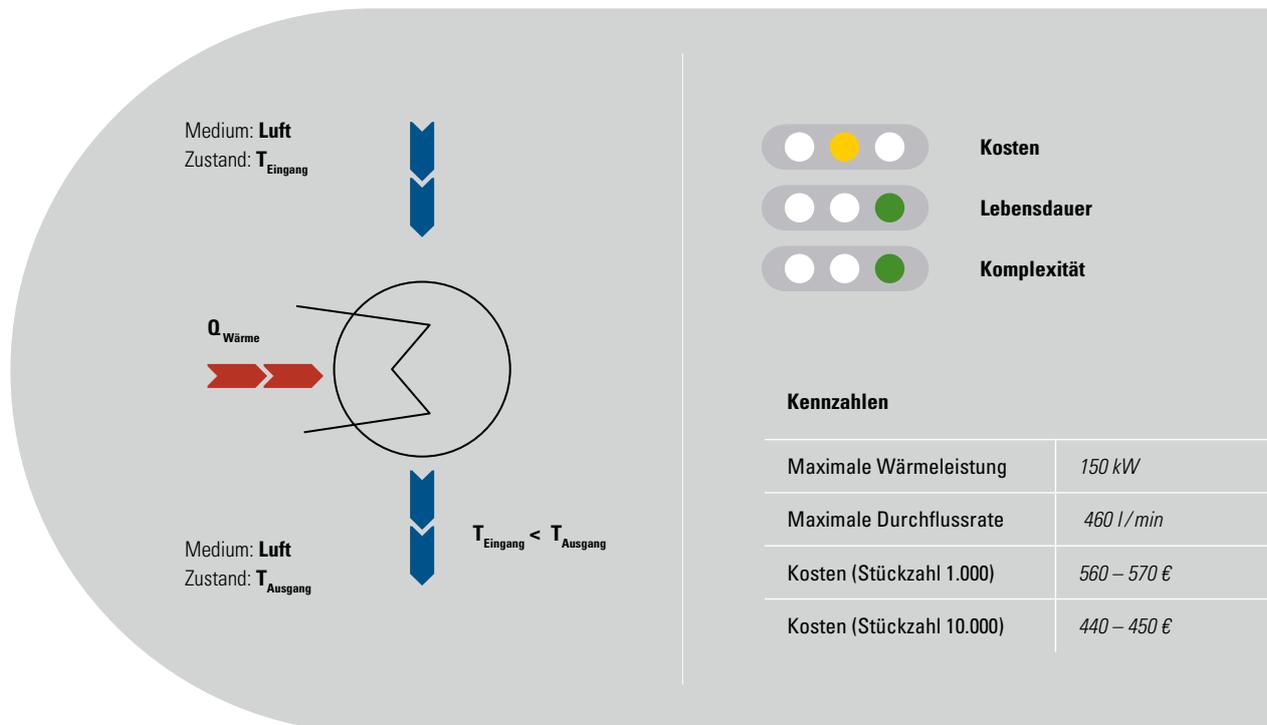
- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/fuce.200900152>
- <https://heating.bekaert.com/en/burners/duonit>
- https://www.researchgate.net/publication/319338480_Numerical_investigation_of_a_novel_burner_to_combust_anode_exhaust_gases_of_SOFC_stacks

Kathoden-Luftheizer

Der Kathoden-Luftheizer regelt über die Temperatur der zugeführten Kathodenluft maßgeblich die Betriebstemperatur der SOFC.

Der Kathoden-Luftheizer ist ein Hochtemperaturwärmetauscher, der die Aufgabe hat, die in den SOFC-Stack einströmende Kathodenluft vorzuheizen. Der Wärmetauscher besteht aus einer variablen Anzahl an Platten, die es ermöglichen, die Wärmeenergie aus einem primären Kreislauf in einen sekundären Kreislauf zu übertragen. Die erforderliche Wärmeenergie kann dabei sowohl vom Nachbrenner als auch vom Reformer bzw. Vorheizer bezogen werden. Insbesondere in der Startphase, in welcher der Reformer für die endotherme partielle Oxidation Wärmeenergie benötigt, wird ein Großteil der Energie vom Nachbren-

ABBILDUNG 58 Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Kathodenluftheizers



ner bereitgestellt. Sobald der Reformer in den Dauerbetriebsmodus wechselt und das Brenngas über eine exotherme Dampfreformierung reformiert wird, kann der Kathoden-Luftheizer seinen Energiebedarf über den Reformer decken.

Der als Kathoden-Luftheizer eingesetzte Wärmetauscher ist durch die hohen Prozesstemperaturen erhöhten Belastungen ausgesetzt. Die Technologie ist jedoch ausgereift und daher vergleichsweise kostengünstig.

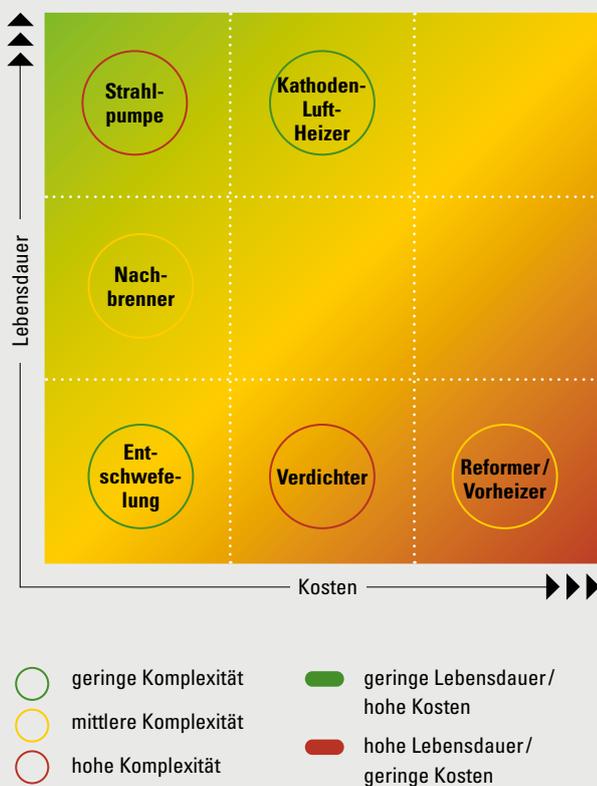
Literatur

- https://www.swep.net/applications/energy-industry/fuel-cells/?_ga=2.132344777.698705531.1573036426-1027453961.1573036426
- https://www.kaori-bphe.com/uploads/editor/files/FuelCell_en.pdf
- <https://www.kelvion.com/us/company/fairs-media/downloads/plate-heat-exchangers/>
- <https://www.bosal.com/en/products-services/industrial-market/heat-exchangers/high-temperature-heat-exchangers>

Fazit

Die BoP der SOFC bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten. Der Umfang und der Aufbau der Subsysteme der BoP sind stark von der Funktion und dem Anwendungsgebiet der Brennstoffzelle abhängig. Anhand der durchgeführten qualitativen Bewertungen der betrachteten Komponente können wir diese nun bezüglich der drei Dimensionen Kosten, Komplexität und Haltbarkeit clustern. Die Übersicht ist in Abbildung 59 dargestellt.

ABBILDUNG 59 Zusammenfassung der qualitativen Bewertungen der BoP Komponenten der SOFC



Die im Brennstoffversorgungsreislauf eingesetzte Entschwefelung ist ein sehr günstiges und weniger komplexes Bauteil. Die Entschwefelung des Brennstoffes verhindert eine Vergiftung des Katalysators mit Schwefelwasserstoff. Daher muss die Komponente eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen. Da sich die adsorbierten Schwefelrückstände mit der Zeit im Entschwefeler ansammeln, muss dieses Bauteil regelmäßig ausgetauscht werden.

Der Reformer/Vorheizler ist das teuerste Bauteil in der Gesamtkostenrechnung einer SOFC. In ihm werden die verwendeten Brennstoffe konditioniert und in Wasserstoff reformiert. Er ist damit für die ordnungsgemäße Funktion der Gesamtzelle verantwortlich. Er muss ebenso zuverlässig wie die Entschwefelung arbeiten, da ein Ausfall ebenfalls zu einer allmählichen Vergiftung der Zelle führt.

Die in der SOFC verwendeten Gebläse sind hinsichtlich der Lebensdauer, des Verschleißes und der Komplexität anspruchsvolle Komponenten. Die Gebläse befähigen zum einen die Reformation des Brennstoffes in der Startphase, zum anderen stellen sie die Sauerstoffversorgung der Zelle sicher. Die hohe Anzahl an beweglichen Bauteilen begünstigt einen hohen Verschleiß und damit eine verminderte Lebensdauer der Komponente. Da die Ansprüche an das Gebläse weniger hoch sind als in der PEMFC, sind die Kosten moderat.

Der Nachbrenner ist über einen langen Zeitraum hohen thermischen Belastungen ausgesetzt, was sich negativ auf die Lebensdauer der Komponente auswirken kann. Da diese Technologie bereits aus verschiedenen anderen Anwendungsbereichen gut bekannt ist, ist der Nachbrenner ein vergleichsweise kostengünstiges Bauteil.

Der Kathodenluftvorwärmer ist ein Hochtemperaturwärmetauscher. Er ist für die Temperierung des Stacks verantwortlich. Die Kosten für den Vorwärmer sind relativ gering, da die Komponente nicht sehr komplex ist und die Technologie als ausgereift gilt. Sowohl die Lebensdauer des Wärmetauschers als auch der Einfluss der Komponentenfunktion auf die Lebensdauer des Stacks wird als unkritisch bewertet.

4 Die Kostenanalyse der Wertschöpfungskette

Eine Einführung alternativer Antriebssysteme in mobile Anwendungen wird insbesondere dann attraktiv, wenn sie eine wirtschaftliche Alternative zu bestehenden Antriebssystemen darstellen. Neben den laufenden Betriebskosten spielen hierbei vor allem die Anschaffungskosten der Systeme eine große Rolle. Trotz der bereits langen Entwicklung bis hin zu serienreifen Systemen sind die Kosten für Brennstoffzellensysteme am Markt weithin konstant hoch und liegen deutlich über den Kosten von beispielsweise batterieelektrischen Antriebssystemen. Dies führt dazu, dass Brennstoffzellensysteme bisher wenig in mobilen Anwendungen eingesetzt werden. So stehen den ca. 685.000 in Deutschland zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeugen nach Daten des Kraftfahrtbundesamtes nur ca. 1.300 zugelassene Fahrzeuge mit Brennstoffzellensystemen gegenüber.

In diesem Kapitel werden die Kostenstrukturen und entwicklungen von PEMFC und SOFC näher beleuchtet, um zu einem tieferen Verständnis bezüglich Kostenverteilungen zu gelangen, Kostensenkungspotenziale zu identifizieren und gleichzeitig einen Ausblick über die zu erwartende Kostenentwicklung von Brennstoffzellensystemen zu geben.

4.1 Methodik und Auswahl der Datenbasis

4.1.1 Methodik

Im Rahmen dieser Studie wird eine Metaanalyse zu den Kostenstrukturen und der Kostenverteilungen bei PEM- und SO-Brennstoffzellen durchgeführt. Ziel der Metaanalyse ist es, auf Basis von Produktionsszenarien und theoretischen Abschätzungen die **Soll-Herstellkosten** für die Brennstoffzellensysteme zu ermitteln und mit realitätsnahen **Ist-Herstellkosten** auf Basis von Marktpreisen und Experteninterviews abzugleichen. Die Soll-Kosten werden auf Basis der Kostenprognosen ausgewählter internationaler Studien ermittelt. Hierbei werden auch die getroffenen Annahmen zu den anvisierten Stückzahlen näher betrachtet und ihre Auswirkungen auf die Kosten analysiert. Die in den Studien aufgezeigten Kostenentwicklungen wurden im Anschluss durch Gespräche mit Vertretern aus Forschung und Industrie validiert, um mögliche Diskrepanzen zwischen den getroffenen Annahmen und der realen Entwicklung aufzudecken.

Dieser Abgleich soll gleichzeitig Ursachen für die auftretenden Diskrepanzen aufzuzeigen und als Basis für weitere Handlungsempfehlungen dienen.

4.1.2 Auswahl der betrachteten Komponenten

Für die Auswahl geeigneter Komponenten zur Analyse der Differenz zwischen Soll- und Ist-Kosten werden Bauteile mit einem hohen Anteil an den Stack-Gesamtkosten betrachtet. Auf diese Weise kann ein Großteil der Stackkosten untersucht werden.

Unabhängig vom Funktionsprinzip der Brennstoffzellen gibt es Bauteile, die in hoher Anzahl von bis zu mehreren Hundert Stück pro Stack verbaut werden. Diese Bauteile sind durch ihre hohen Stückzahlen ein wesentlicher Kostentreiber für den Stack. Beispielsweise ist eine Endplatte zwar deutlich teurer in der Herstellung als eine einzelne MEA, die kumulierten

ABBILDUNG 61 Qualitative Bewertung der BoP-Komponenten der PEMFC und der SOFC

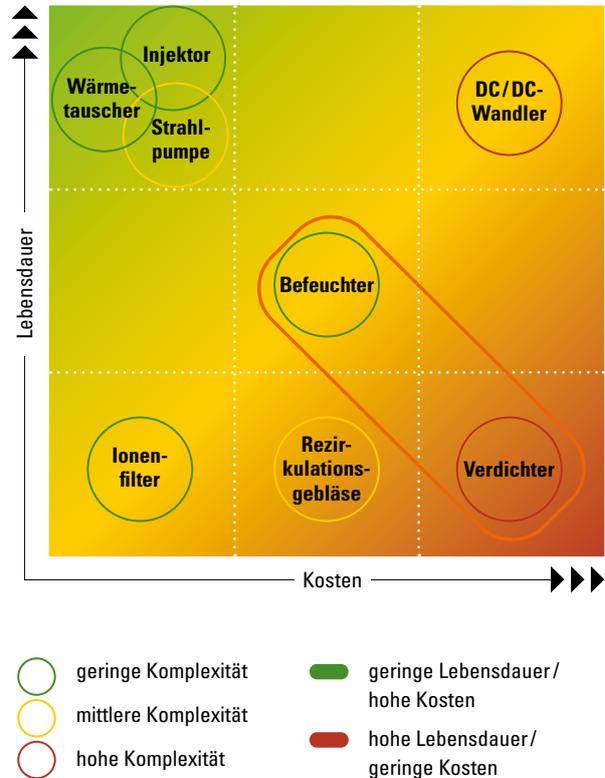
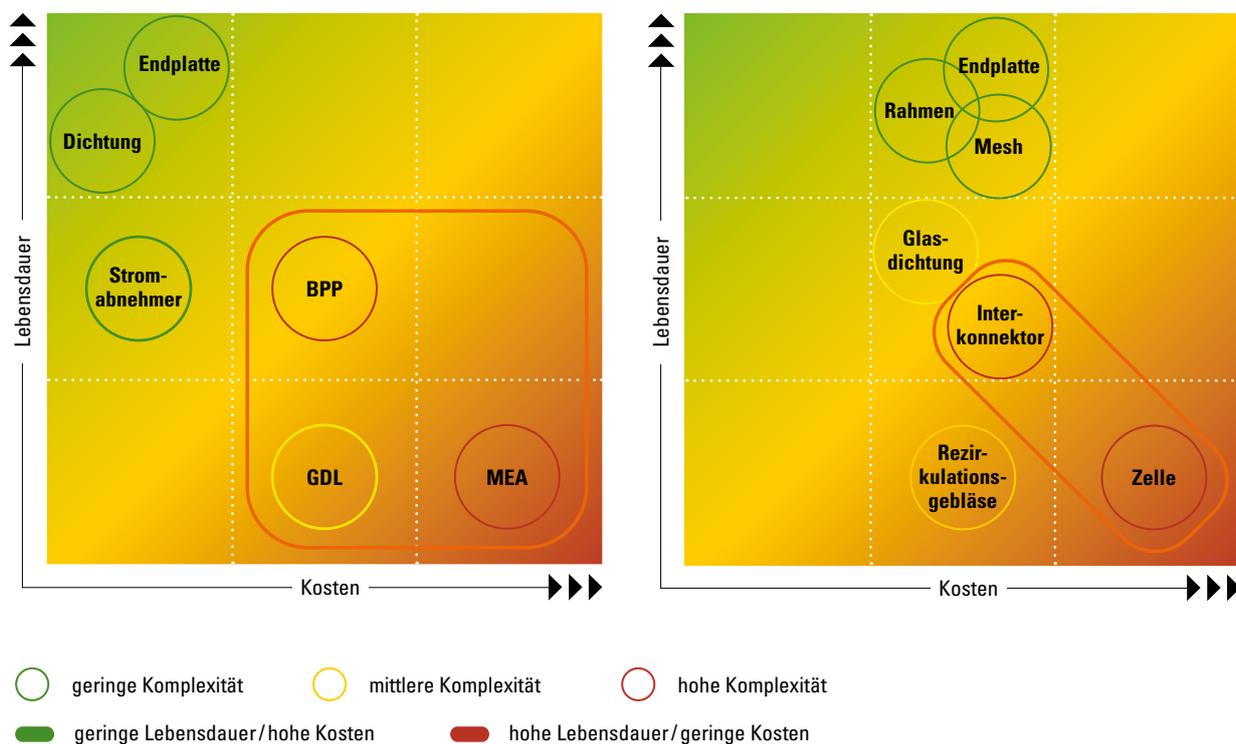


ABBILDUNG 60 Qualitative Bewertung der PEMFC- und SOFC-Stack-Komponenten



Kosten aller verbauten MEAs liegen jedoch deutlich über jenen für die Endplatten. Mit Hinblick auf den Stack werden daher auf Basis der in Kapitel 3 diskutierten Brennstoffzellensysteme Komponenten mit mittleren bis hohen Kosten und hoher Komplexität untersucht. Zur Analyse der PEMFC werden daher die MEA, die BPP und die GDL näher betrachtet. Für die SOFC werden die Zelle sowie der Interkonnektor betrachtet.

Bezüglich der Analyse von BoP-Komponenten wird der Fokus ebenfalls auf kostenintensive Komponenten gelegt. Dabei werden die Kosten der PEMFC-BoP analysiert, nicht aber die der SOFC. SOFC-Systeme sind durch verschiedene Designs der BoP nur bedingt vergleichbar. Bezogen auf die PEMFC stellt der Luftkreislauf mit dem Verdichter und dem Befeuchter den größten Kostenanteil der gesamten BoP dar. Daher wird dieser in den folgenden Kapiteln näher untersucht.

4.1.3 Auswahl der Datenbasis

Für die Betrachtung der Soll-Kosten wurden in einem ersten Schritt 25 internationale Veröffentlichungen und Studien, die zwischen 2003 und 2021 entstanden sind, analysiert. Um ein detailliertes Bild über die prognostizierten Soll-Kosten zu erhalten, wurden bei der Auswahl der Studien für die Metaanalyse folgende drei Auswahlkriterien herangezogen:

- **Technische Detailtiefe:** Die betrachtete Kostenstudie sollte eine ausreichende Detailtiefe und Analyseebene aufweisen. Insbesondere muss aus der Studie hervorgehen, welche Rahmenbedingungen bei den Kostenprognosen angenommen

worden sind. Die Detailtiefe und die Quantifizierung sollten dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.

- **Reale Herleitung der Soll-Kosten:** Die Bestimmung der Systemkosten sollte auf Basis einer Bottom-up-Kostenkalkulation von Produktionskosten erfolgen. Hierzu ist es notwendig, alle für die Produktion relevanten Kostenparameter wie Materialkosten und Investitionskosten der Produktionsmaschinen in der Studie zu betrachten.
- **Zeitlicher Horizont:** Der zeitliche Betrachtungshorizont sollte die Entwicklung der Systemkosten über die letzten Jahre abdecken und gleichzeitig zukünftige Entwicklungen aufzeigen. Die Kostenberechnungen sollten auf validierten Annahmen beruhen und eine Aussage über die angenommenen Soll-Kosten der Systeme im aktuellen Betrachtungshorizont ermöglichen. Der Vergleich der in der Vergangenheit berechneten Soll-Kosten mit den tatsächlichen Ist-Kosten ermöglicht eine Bewertung der Qualität der Vorhersagen sowie die Überprüfung der angenommenen Kosteneffekte und entwicklungen.

Aus den insgesamt 25 betrachteten Studien wurden in einem nächsten Schritt vier internationale Kostenstudien ausgewählt, die in der Metaanalyse näher analysiert werden. Im Folgenden werden die ausgewählten und näher analysierten Studien vorgestellt:

- **Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan – 2017**

Das amerikanische Department of Energy (DOE) hat in diesem Mehrjahresplan technische Zielsetzungen für PEMFC-Stacks und -BoP festgelegt. Für stationäre und mobile Anwendungen werden

einzuhaltende Zielvorgaben bis zum Jahr 2020 vorgegeben, um mit etablierten Technologien konkurrieren und diese auch zukünftig ersetzen zu können. Der Fokus der Betrachtung liegt auf dem Vergleich der aktuellen technisch realisierbaren Kosten mit den zu erreichenden Zielen. Für den Einsatz der PEMFC in mobilen Anwendungen wird von einem Produktionsvolumen von 500.000 Systemen p. a. ausgegangen.

- **Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: Update 2018 – 2018**

Die Autoren dieser Studie haben zwischen den Jahren 2015 und 2020 Studien zu den Herstellkosten von PEMFC- und einer Vielzahl von BoP-Komponenten erstellt. In den Berechnungen wird basierend auf idealen Produktionsketten für verschiedene Anwendungsfälle bzw. dem damit assoziierten Zelldesign stückzahl- und systemabhängig berechnet, welche Kosten in der Produktion von PEMFC zu erwarten sind. Die für verschiedene Betrachtungsjahre und Stückzahlen betrachteten Kosten ergeben sich dabei durch eine Bottom-up-Kostenanalyse der Produktionsketten. Bei den Anwendungsfällen wird zwischen dem Einsatz der PEMFC im Pkw und im Lkw unterschieden. Die Unterscheidung zwischen den beiden Anwendungen ermöglicht es, den Einfluss der Rahmenbedingungen auf die Entwicklung der Systemkosten darzustellen. Während im Pkw lediglich ein Stack mit einer Nettoleistung von 80 kW_{netto} betrachtet wird, setzt sich das Brennstoffzellensystem im Lkw aus zwei Stacks mit einer Gesamtleistung von 160 kW_{netto} zusammen. Für die Anwendung im Lkw wird ein geringer Grad an vertikaler Integration der Produktionskette angenommen. Daher werden zusätzlich zu den Herstellkosten Margen auf die Subkomponenten in die Kostenbetrachtung auf-

genommen. Diese Margen werden in der vorliegenden Metaanalyse nur beim direkten Vergleich der Kosten zwischen den Anwendungen berücksichtigt. Bei der Betrachtung der Kostenstrukturen werden diese Margen herausgerechnet.

- **A Total Cost of Ownership Model for Solid Oxide Fuel Cells in CHP and Power-Only Applications – 2015**

Anders als die vorherigen Studien betrachten Scataglini et al. Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC) statt PEMFC. In der Studie wird ein Total-Cost-of-Ownership-Modell für stationäre SOFC-Systeme für die Kraft-Wärme-Kopplung (engl. Combined Heat and Power (CHP)) gezeigt. Es werden zwei Systeme mit Leistungen von 10 kW_{netto} und 50 kW_{netto} betrachtet. Die Studie beinhaltet eine detaillierte Abschätzung für Material- und Maschinenkosten in der Produktion der betrachteten Systeme. Als Rahmenbedingungen für die Kostenbetrachtung werden verschiedene Stückzahlenszenarien zugrunde gelegt, die den Einfluss produktionstechnischer Skaleneffekte berücksichtigen. Unterschiede zu anderen Betrachtungen sind in den Kapiteln der jeweiligen Komponenten aufgeführt.

- **Manufacturing Cost Analysis of 100 and 250 kW FC Systems for Primary Power and CHP Applications – 2016**

Der Bericht des Battelle Memorial Institute enthält ein umfangreiches Kostenmodell zur Kostenschätzung für die Herstellung von 120 kW_{netto}- und 300 kW_{netto}-Brennstoffzellensystemen für die Kraft-Wärme-Kopplung und für Primärstromanwendungen. Dabei werden sowohl PEMFC als auch SOFC berücksichtigt. Die SOFC-Stacks bestehen jeweils aus vier 30 kW_{netto} bzw. zehn 30 kW_{netto} Stacks. In einem ersten Schritt wird zunächst der

Markt abgeschätzt. Darauf aufbauend erfolgt eine Definition des Systemdesigns, bevor eine Kostenanalyse durchgeführt wird. Zusätzlich werden durch eine Sensitivitätsanalyse die Parameter mit dem größten Einfluss auf die Systemkosten ermittelt. Unterschiede zu anderen Betrachtungen sind in den Kapiteln der jeweiligen Komponenten aufgeführt.

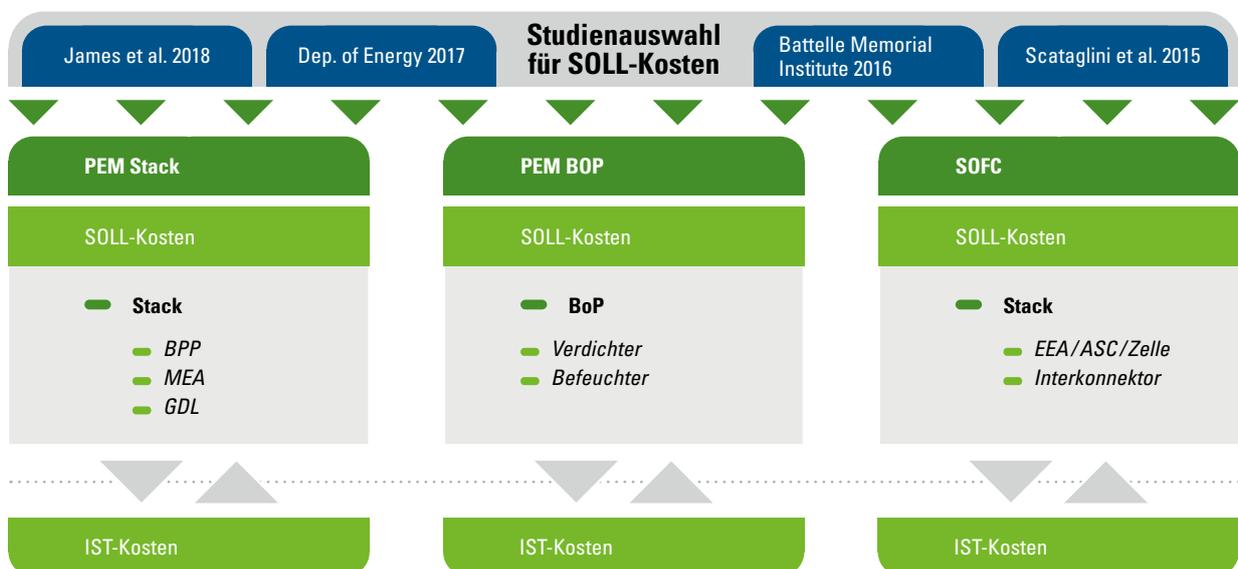
Zur Konsolidierung der Studienergebnisse werden die Kostenbetrachtungen in dieser Metastudie auf eine einheitliche Bezugsgröße normiert. Hierzu werden alle erhobenen Daten auf die spezifischen Kosten [$\text{€}/\text{kW}_{\text{brutto}}$] umgerechnet. Dies stellt zum einen sicher, dass alle Verlustleistungen des Stacks und der BoP in die Kostenanalyse einbezogen werden. Zum anderen entfällt durch die Normierung der Einfluss von Rahmenbedingungen wie der geforderten Ausgangsleistung oder Stackgröße auf die Kostenbetrachtung.

Die Referenzeinheit $\text{€}/\text{kW}_{\text{brutto}}$ ermöglicht es, die unterschiedlichen Kostenstudien miteinander zu vergleichen und normierte Aussagen über die spezifische Kostenentwicklung zu treffen.

Im Folgenden wird gezeigt, dass ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Gesamtkosten sowohl für die Komponenten der PEMFC als auch für die der SOFC die angenommene Produktionsmenge der Komponenten ist. Im Rahmen der Metaanalyse werden daher die in den Studien zugrunde gelegten Stückzahlen detailliert betrachtet.

Die Daten zur Soll-Kostenentwicklung werden in einem zweiten Schritt mit aktuellen Ist-Kosten verglichen. Die Abschätzung der Ist-Kosten erfolgt anhand öffentlich zugänglicher Informationen sowie von Expertengesprächen.

ABBILDUNG 62 Betrachtete Studien und Detaillevel der durchgeführten Metastudie



Der Überblick über öffentlich zugängliche Informationen wird durch die gezielte Suche nach Pressemitteilungen und wissenschaftlichen Publikationen erarbeitet. Insbesondere zwei Studien spielen hierbei eine zentrale Rolle. So enthält James et al. detaillierte Informationen zu den Kosten des Toyota Mirai 1. Weiterhin wird in Thompson et al. eine detaillierte Bottom-up-Kalkulation der Produktionskosten der einzelnen Komponenten auf Grundlage von Herstellerangeboten, Fertigungszeiten und weiterer Parameter durchgeführt. Beide Studien wurden bereits 2016 bzw. 2018 veröffentlicht und geben somit nur einen begrenzt aktuellen Einblick in einen dynamischen Markt. Vor allem die Kostendaten zum Mirai 1 stellen vielmehr eine Obergrenze für die einzelnen Komponenten als den aktuellen Ist-Stand dar. Hier liefern die Expertengespräche vertiefte und aktuelle Einblicke. Für diese Gespräche wurden gezielt zentrale Akteure für die jeweiligen Komponenten (Stack, Bipolarplatte etc.) aus dem deutschsprachigen Raum angesprochen und um ihre Einschätzung zu den prognostizierten Kostenentwicklungen, zu den in ihren Augen zentralen technischen und marktseitigen Herausforderungen sowie zu den politischen Rahmenbedingungen gebeten. Auch wenn die Gespräche mit den Industrievertretern selten quantifizierbare Aussagen zu den Kosten zulassen, zeichnen diese Gespräche ein aktuelles Stimmungsbild der Industrie und zentraler wissenschaftlicher Partner.

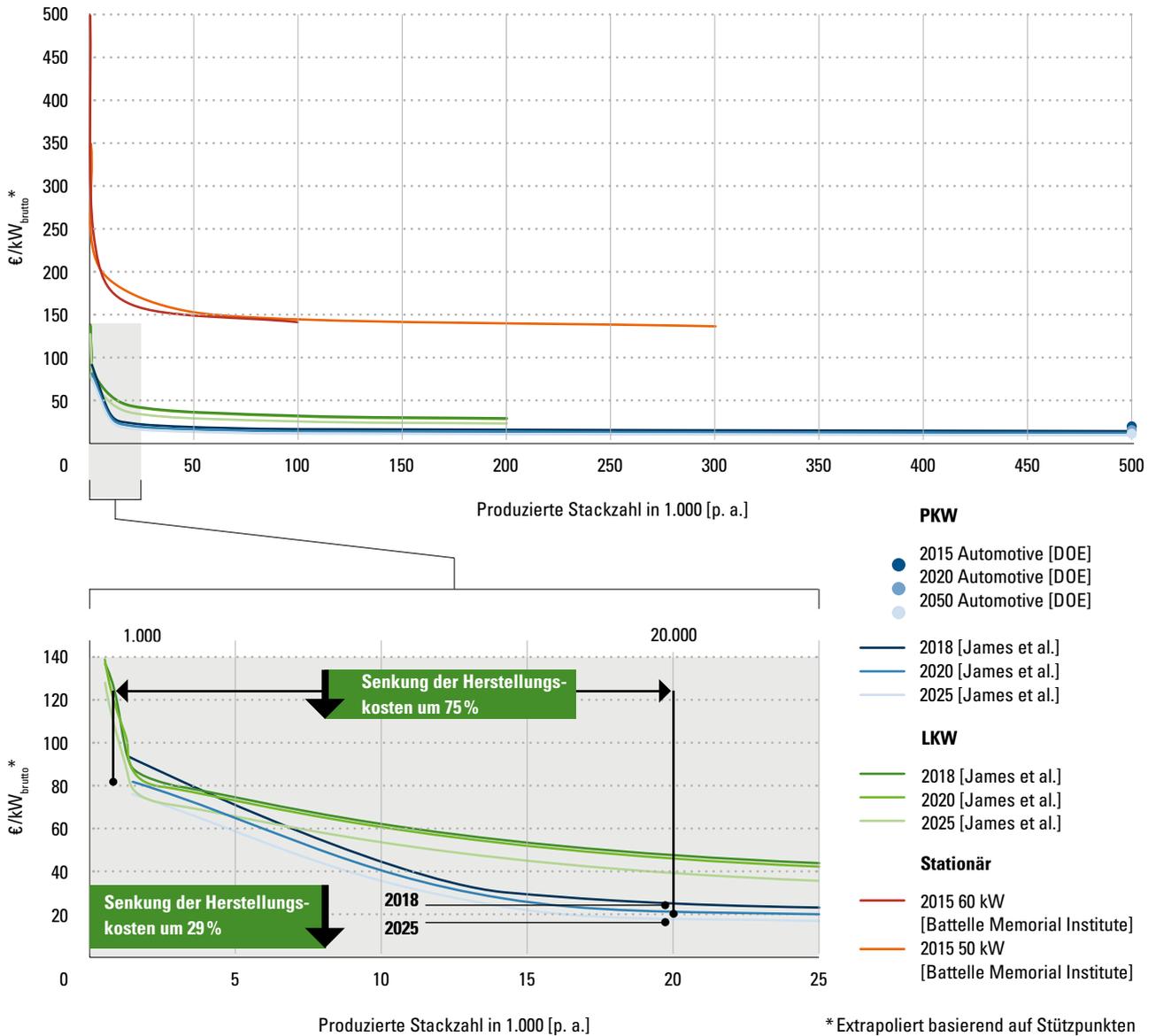
4.2 PEMFC-Stack

Im vorliegenden Kapitel werden zunächst die Soll-Kosten der PEMFC-Stacks auf Basis der in Kapitel 4.1.3 vorgestellten Studien betrachtet. Bei der Analyse der Kosten wird zwischen verschiedenen Betrachtungsjahren, Anwendungen und Stückzahlannahmen unterschieden. Die Stückzahlannahmen werden in den Studien zumeist als diskrete Werte angegeben. Für

die grafische Aufbereitung der Kosten in der Metaanalyse werden die Werte zwischen diesen Stützstellen interpoliert. Im Anschluss an die Soll-Kostenbetrachtung werden die anvisierten Kostenprognosen mit Einschätzungen aus der Industrie verglichen. Diese Vorgehensweise wird für alle betrachteten Komponenten angewendet.

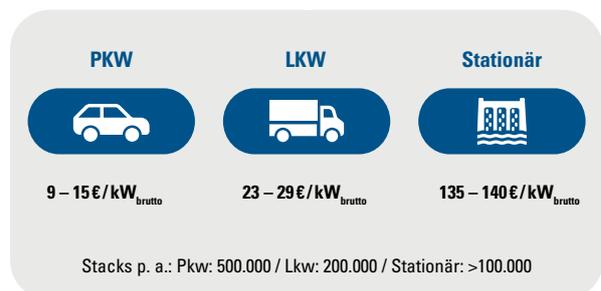
Die Produktionskosten für einen PEMFC-Stack unterscheiden sich je nach betrachtetem Anwendungsfall deutlich. Während die Stackkosten für den Einsatz in mobilen Anwendungen einer ähnlichen Entwicklung unterliegen, sind deutlich höhere Herstellkosten für stationäre Anwendungen zu erwarten. Aus Abbildung 63 wird ersichtlich, dass der Einfluss fortschreitender technologischer Entwicklung über die Betrachtungsjahre bei gleichbleibendem Produktionsvolumen gegenüber den Skaleneffekten vergleichsweise gering ist. So ist durch die technologische Entwicklung im Brennstoffzellensystem zwischen 2018 und 2025 bei einer angenommenen Stückzahl von 20.000 Stacks ein Kostenrückgang von ca. 29 % bei Systemen für die Anwendung im Pkw zu erwarten. Das erheblich größere Kostensenkungspotenzial bietet die Hochskalierung des Produktionsvolumens. Für das Betrachtungsjahr 2020 können durch eine Skalierung von 1.000 auf 20.000 jährlich produzierte Einheiten die spezifischen Produktionskosten um 75 % gesenkt werden. Mit zunehmendem Produktionsvolumen sinkt der Einfluss der Stückzahl auf die Kosten jedoch deutlich. Es ist zu erwarten, dass die Produktionskosten bei hohen Stückzahlen (für alle Betrachtungsjahre) gegen die in Abbildung 64 genannten Minimalkosten konvergieren.

ABBILDUNG 63 Übersicht spezifische Stackkosten



Im Jahr 2017 wurden vom Department of Energy Zielwerte für die Stackkosten für die Jahre 2020 und einen langfristigen Betrachtungshorizont formuliert. Diese liegen für automobiler Anwendungen bei 15,11 €/kW_{brutto} für das Jahr 2020 und bei 11,33 €/kW_{brutto} als langfristiges Kostenziel.²

ABBILDUNG 64 Herstellkosten für PEMFC-Stacks für verschiedene Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)



² Annahme: Großserienproduktion mit 500.000 Stacks p. a., Umrechnungsfaktor 0,85 €/ \$

Kostenstruktur

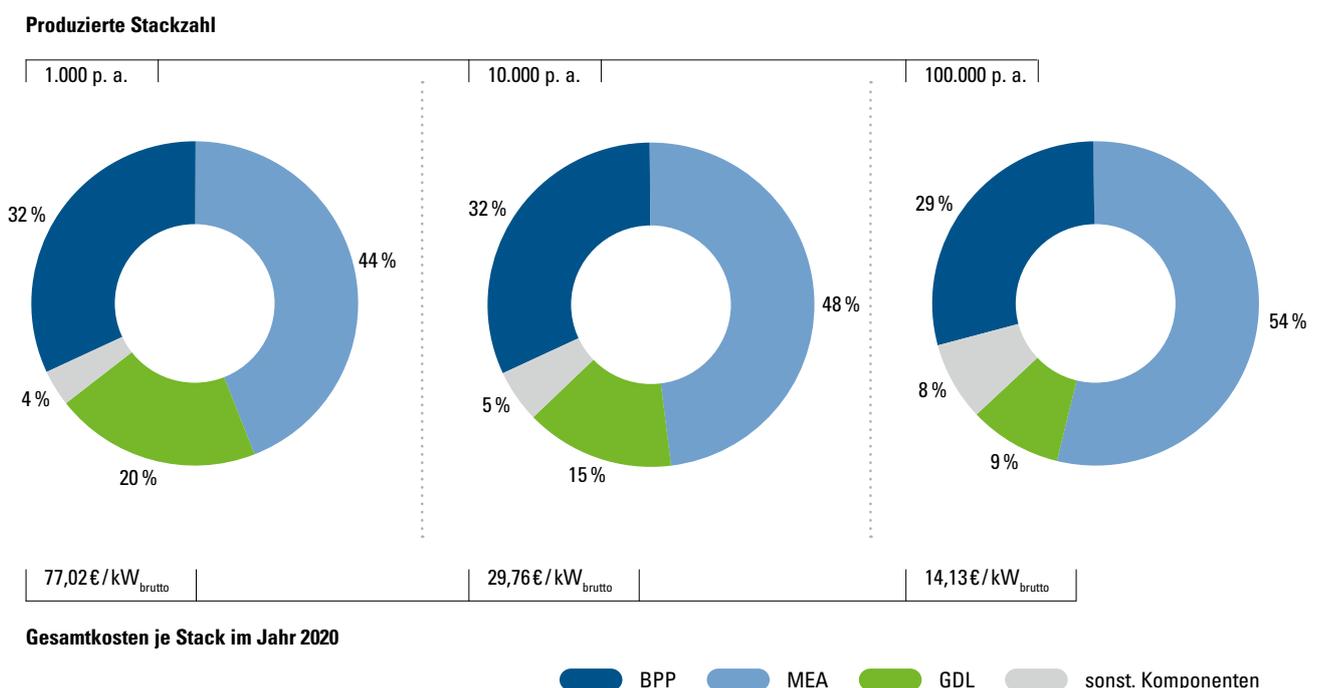
Abbildung 65 bis Abbildung 67 sind die Kostenstrukturen unterschiedlicher PEMFC-Stacks für verschiedene Stückzahlen abgebildet. Bei der Unterteilung der Kosten wird zwischen den Komponenten BPP, MEA, GDL unterschieden. Weitere Kostenfaktoren wie Endplatten, Stromkollektoren und die Kosten für die Montage werden unter der Kostenart „Sonstige Komponenten“ zusammengefasst.

Pkw

Im Rahmen der Kostenanalyse für einen PEMFC-Stack für Pkw-Anwendungen wurde von einem Brennstoffzellensystem mit einer elektrischen Netto-Leistung von 80 kW und einer Brutto-Leistung von 88,4 kW aus-

gegangen. Die Brutto-Leistung liegt über der Netto-Leistung des Systems, da die Energieversorgung der BoP-Komponenten direkt über die abgegebene Leistung des Brennstoffzellenstacks erfolgt und damit die abrufbare Netto-Leistung des Systems reduziert. Der Brennstoffzellenstack für die Pkw-Anwendung ist auf eine Lebensdauer von minimal 5.000 Betriebsstunden ausgelegt. Die Herstellkosten für den PEMFC-Stack für Pkw-Anwendungen (siehe Abbildung 65) sinken mit einer Skalierung der Produktion deutlich. So können die Produktionskosten bei einer Skalierung der Produktionsmenge von 1.000 auf 10.000 Stacks pro Jahr um 61 % auf 29,76 €/kW_{brutto} reduziert werden. Durch eine weitere Erhöhung der Produktionsmenge auf 100.000 Stacks pro Jahr können Produktionskosten von 14,13 €/kW_{brutto} realisiert werden. Der größte Anteil der Kosten wird über alle betrachteten Stückzahlen durch die MEA verursacht, ihr Kostenanteil nimmt mit

ABBILDUNG 65 Kostenstruktur des PEMFC-Stacks für Pkw-Anwendungen

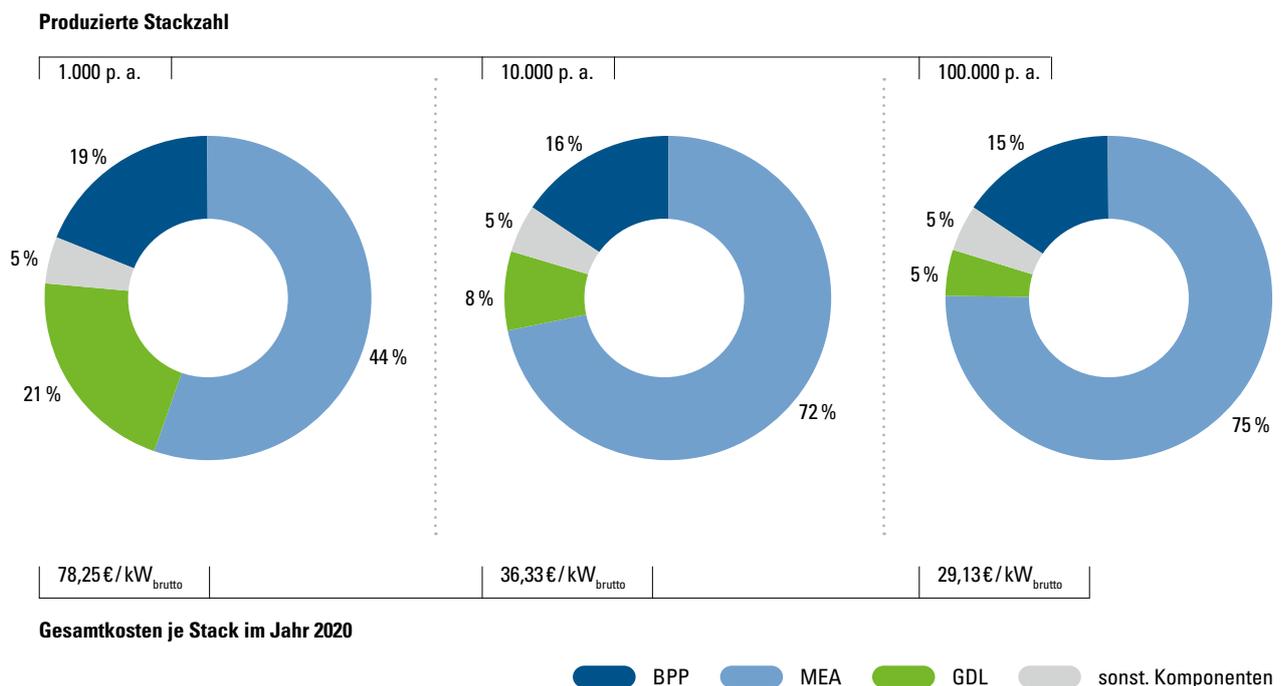


steigender Stückzahl zu und macht ungefähr die Hälfte der Gesamtkosten des Brennstoffzellenstacks aus. Den zweitgrößten Kostenfaktor stellt die BPP dar, die ca. ein Drittel der Gesamtkosten verursacht. Der relative Kostenanteil an den Gesamtkosten bleibt über die betrachteten Produktionsvolumina nahezu konstant. Mit zunehmender Stückzahl sinken die Produktionskosten der GDL, wobei sich ihr Kostenanteil bei einer Skalierung von 1.000 bis 100.000 Stacks pro Jahr halbiert. Die Kostenentwicklungen für diese Komponenten werden in den Folgekapiteln nochmals detaillierter betrachtet. Die weiteren Komponenten des Stacks tragen in allen Stückzahlenszenarien nur unwesentlich zu den Stackkosten bei. Es ist jedoch erkennbar, dass sich ihr Kostenanteil an den Gesamtkosten bei hohen Stückzahlen auf 8 % der Gesamtkosten verdoppelt.

Lkw

In Abbildung 66 ist die Kostenstruktur für einen PEMFC-Stack für Anwendungen im Schwerlastverkehr dargestellt. Für diesen Anwendungsfall wird angenommen, dass zwei baugleiche Brennstoffzellenstacks mit einer Leistung von je $80 \text{ kW}_{\text{netto}} / 94,65 \text{ kW}_{\text{brutto}}$ zusammen ein Brennstoffzellensystem mit einer Gesamtleistung von $160 \text{ kW}_{\text{netto}} / 189,3 \text{ kW}_{\text{brutto}}$ bilden. Anders als beim Pkw werden in den Lkw-Anwendungen höhere Lebensdauern von über 25.000 Stunden angestrebt. Analog zur Entwicklung der Stackkosten für Pkw-Anwendungen sinken die Stackkosten mit steigender Stückzahl erkennbar. Während die Kosten bei einer Stückzahl von 1.000 Stacks pro Jahr mit ca. $78 \text{ €/kW}_{\text{brutto}}$ angegeben werden, sinken diese bei einer Hochskalierung der Produktionsmenge auf 100.000 Stacks auf $29,13 \text{ €/kW}_{\text{brutto}}$. Im Vergleich zur Pkw-Anwendung sind insbesondere bei mittleren und hohen Stückzahlen die Kosten auf einem höheren Niveau.

ABBILDUNG 66 Kostenstruktur des PEMFC-Stacks für Lkw-Anwendungen

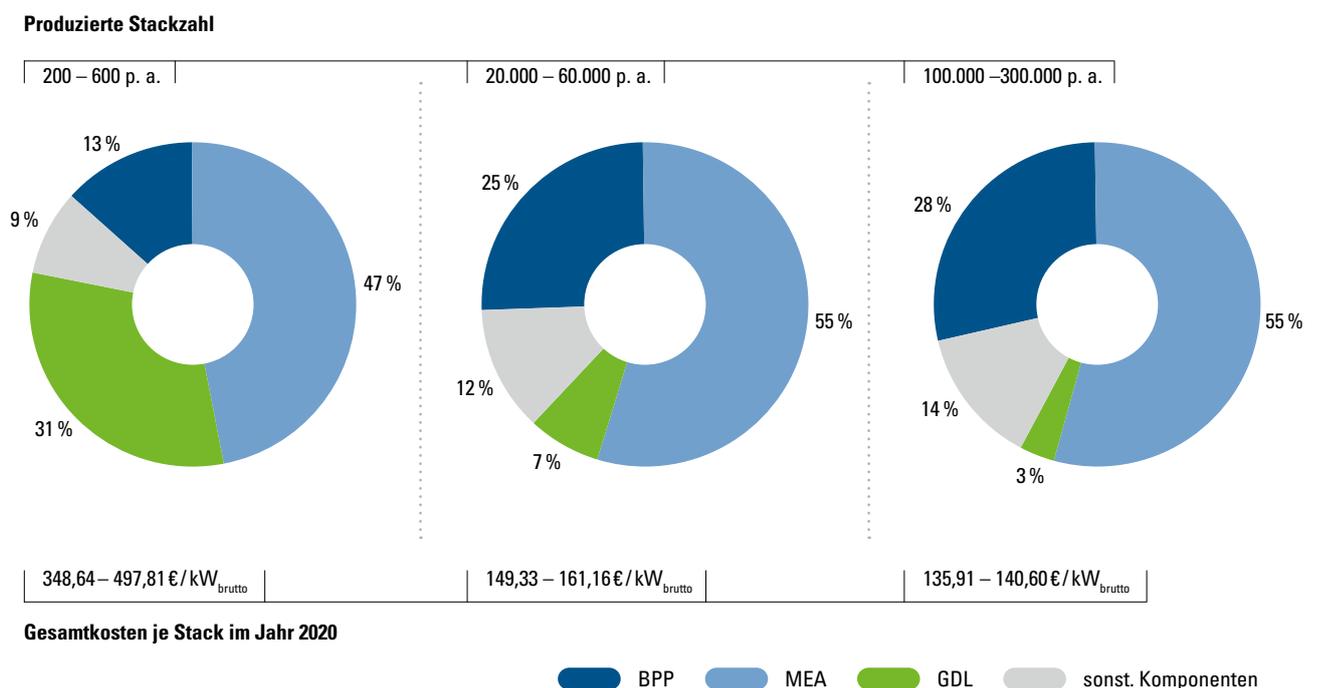


Die MEA-Herstellung ist in allen Stückzahlenszenarien für über 50 % der Gesamtkosten der Stacks verantwortlich. Während bei geringen Stückzahlen etwas mehr als die Hälfte der Kosten durch die Herstellung der MEA verursacht wird, steigt der relative Kostenanteil mit zunehmender Stückzahl auf 75 % an. Einer der Gründe für die absolut hohen Kosten für die MEA liegt in den Materialkosten des verwendeten Katalysatormaterials Platin begründet. Die Materialkosten für die MEAs in der Lkw-Anwendung sind aufgrund des höheren Pt-Gehalts gegenüber Pkw-MEAs höher. Grund für die höhere Beladung ist die angestrebte längere Lebensdauer der Lkw-Stacks. Wie in den Pkw-Anwendungen bleibt der relative Kostenanteil der BPP-Produktion mit 16 bis 19 % über die betrachteten Produktionsmengen annähernd konstant. Die Kosten für die restlichen Stackkomponenten ohne die GDL spielen nur eine untergeordnete Rolle. Sie machen weniger als 5 % der Gesamtkosten aus.

Stationär

In der Studie des Battelle Memorial Institute werden die Kosten für PEMFC für stationäre bzw. quasistationäre Anwendungen untersucht. Im Rahmen der Analyse wird zwischen zwei PEMFC-Systemen mit einer Netto-Gesamtleistung von 100 kW und 250 kW unterschieden. Das 100 kW_{netto}-System besteht aus zwei baugleichen Stacks mit einer Brutto-Leistung von jeweils 60 kW. Das 250 kW_{netto}-System beinhaltet insgesamt sechs Brennstoffzellenstacks mit einer Bruttoleistung von je 50 kW. Die in Abbildung 67 dargestellten Kostenstrukturen fassen die stackzahlabhängigen Gesamtkosten für die Produktion von je 100, 10.000 und 50.000 PEMFC-Systemen zusammen. Verglichen mit mobilen Anwendungen liegen die Stack-Kosten für stationäre Anwendungen deutlich höher. Auch hier lassen sich durch Skaleneffekte die Produktionskosten um bis zu 72 % gegenüber einer Kleinstserienproduk-

ABBILDUNG 67 Kostenstruktur des PEMFC-Stacks für stationäre Anwendungen



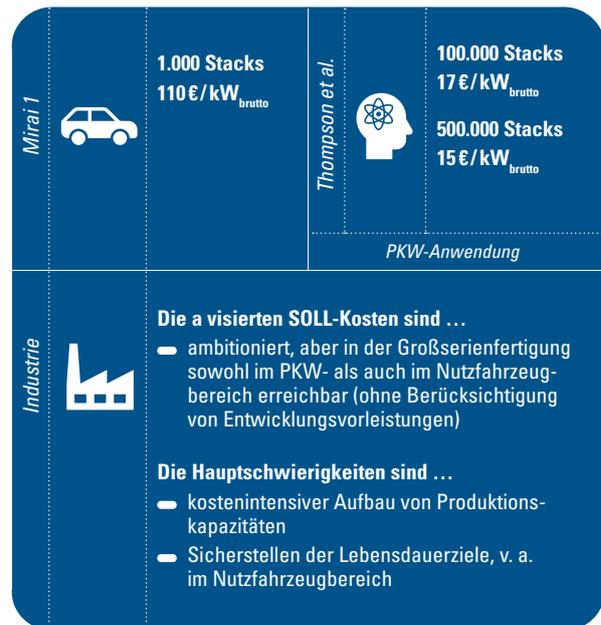
tion von 200 bis 600 Systemen pro Jahr senken. Ein großer Unterschied ist der Einfluss der Skaleneffekte auf die Produktionskosten. Während bei der Skalierung von 200 bis 600 auf 20.000 bis 60.000 Stacks pro Jahr ein hohes Kostensenkungspotenzial erkennbar ist, sind durch eine weitere Skalierung auf >100.000 Stacks pro Jahr nur geringe Kostenvorteile zu erzielen.

Bei der Betrachtung der Kostenstruktur wird deutlich, dass ca. die Hälfte der Kosten durch die MEA verursacht wird. Der Kostenanteil der MEA an den Gesamtkosten bleibt über die betrachteten Stückzahlen annähernd konstant, während der Anteil der BPP mit Zunahme der Stückzahl auf ein Viertel an den Gesamtkosten ansteigt. Der größte stückzahlabhängige (relative) Kostenunterschied ist bei der GDL zu beobachten. Er sinkt von 31 % bei geringen Stückzahlen (200 bis 600 Stacks p. a.) auf nur 3 % in der Großserienproduktion (>100.000 Stacks p. a.).

Unabhängig von der Anwendung hat die MEA bei niedrigen und bei hohen Stückzahlen einen entscheidenden Anteil an den Gesamtkosten des Stacks. Mit steigenden Stückzahlen steigt der Anteil an den Gesamtkosten. Der Anteil der BPP steigt mit zunehmenden Stückzahlen. Die Kosten für PEMFC-Stacks, insbesondere bei hohen Stückzahlen, werden daher maßgeblich von der MEA und der BPP beeinflusst und stagnieren ab ca. 100.000 Stück.

Einschätzungen der Industrie

ABBILDUNG 68 Einschätzungen der Industrie bezüglich PEMFC-Stacks



Nach der Betrachtung der Soll-Kosten werden im nächsten Schritt die Kosteneinschätzungen durch Gespräche mit Vertretern aus Forschung und Industrie validiert. Gleichzeitig werden die anvisierten Kosten mit realen Kostendaten aus der Literatur abgeglichen.

Für die Produktion der ersten Generation des Toyota Mirai konnten in den vergangenen Jahren bereits validierbare Produktionskosten ermittelt werden. Diese wurden in James et al. mit 110 €/kW_{brutto} beziffert. Damit liegen diese Kosten weit über den realisierbaren Minimalkosten von 9 bis 15 €/kW_{brutto} für mobile Anwendungen im Pkw-Bereich. Betrachtet man jedoch die produzierten Stückzahlen der ersten Generation des Toyota Mirai, stellt man fest, dass die Produktionskosten im Rahmen der prognostizierten Soll-Kosten liegen.

Bei der Analyse der Herstellkosten in Thompson et al. werden Stackkosten in Höhe von $17 \text{ €} / \text{kW}_{\text{brutto}}$ (100.000 Stacks p. a.) bzw. $15 \text{ €} / \text{kW}_{\text{brutto}}$ (500.000 Stacks p. a.) ermittelt. Diese liegen etwas über den anvisierten Minimalkosten aus der Soll-Kostenbetrachtung, bestätigen dennoch die zu erreichenden Skaleneffekte in der Produktion.

Führende deutsche Forschungsinstitute im Bereich der Brennstoffzellentechnik gehen davon aus, dass sich bei einer Stückzahl von ca. 1.000 Stacks pro Jahr Produktionskosten von $195 \text{ €} / \text{kW}_{\text{brutto}}$ realisieren lassen. Als Grund für die hohen anfänglichen Produktionskosten werden vor allem die hohen initialen Investitionen, die zum Aufbau von Produktionskapazitäten notwendig sind, gesehen. Es wird davon ausgegangen, dass bei höheren Stückzahlen die anvisierten Kostenprognosen erreichbar sind. Gleichzeitig wird erwartet, dass bei hohen Stückzahlen ähnlich hohe Gewinnmargen wie bei konventionellen Antriebstechnologien (Verbrennungsmotor) zu realisieren sind.

Bis zum Jahr 2025 erwarten relevante Forschungsinstitute lediglich evolutionäre technologische Entwicklungen der PEMFC, weisen aber auch darauf hin, dass im Anschluss Potenzial und Notwendigkeit für größere Technologiesprünge besteht. Die größten Entwicklungsmöglichkeiten liegen im Bereich des Katalysators, bei dem mittelfristig auf Edelmetallkatalysatoren verzichtet werden sollte. Dies stimmt mit Aussagen von Automobilzulieferern überein, die eine Revolution des Stackdesigns für die Zeit nach 2025 erwarten und davon ausgehen, dass das Stackdesign für einen Massenmarkt grundlegend angepasst werden muss. Entsprechende Bewegungen in der Lieferantenstruktur seien bereits zu erkennen.

Große deutsche Automobilzulieferer sehen den Hauptabsatzmarkt für Brennstoffzellensysteme in den nächsten Jahren vor allem im kommerziellen Bereich. Die anvisierten Soll-Kosten werden in diesem Zusammenhang als deutlich zu gering eingeschätzt. Diese Einschätzung liegt darin begründet, dass die erbrachten Entwicklungsvorleistungen der Industrie über die Produkte umgelegt werden, wodurch sich die Produktkosten deutlich erhöhen. Weiter werden die aktuellen Lieferkettenprobleme für Rohstoffe und Einzelkomponenten angeführt, die dazu führen, dass die in diesem Kapitel betrachteten Kostenabschätzungen als nicht realistisch eingeschätzt werden.

Im kommerziellen Bereich plant ein Nutzfahrzeughersteller die Industrialisierung eines Plattform-Produkts, das mit möglichst minimalen Änderungen für die verschiedenen Anwendungen angepasst werden kann. Mithilfe des Plattformaufbaus soll bis zum Jahr 2030 eine Hochskalierung der Produktion auf 100.000 Stacks pro Jahr erfolgen. Die anvisierten Soll-Kosten werden als zu optimistisch eingeschätzt. Dies liegt vor allem an den höheren Lebensdauernanforderungen an die Systeme im kommerziellen Bereich, die eine Überdimensionierung der Zellen und auch Zellkomponenten erforderten. Ursächlich für die Überdimensionierung sind unterschiedliche Degradationseffekte, vor allem der Verlust an katalytisch aktiver Oberfläche sowie die Korrosion metallischer BPP.

Insbesondere die aktuell geringen Stückzahlen und hohen Entwicklungskosten stellen eine Herausforderung bei der Kostensenkung der PEMFC-Stacks dar. Ansatzpunkte zur Unterstützung wären hierbei subventionierte Programme zum Anschlag des Markthochlaufes. Als Hauptgründe für den zögernden Markthochlauf werden im Allgemeinen die folgenden drei Punkte angeführt:

- Fehlende Infrastruktur zur Betankung und Wartung der Fahrzeugflotten.
Hierbei sind seitens der Industrie Vorgaben sowie Ziele der Politik gewünscht, um Planungssicherheit zu erhalten.
- Gleichzeitige, kostenintensive Entwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen und FCEV
- Fehlende Standardisierung auf Komponentenebene

Positiv hingegen werden die aktuellen Vorgaben von CO₂-Emissionszielen für den Schwerlastverkehr bewertet, welche die Planungssicherheit von Zulieferern und Herstellern erhöhen und beim Aufbau von Zuliefererketten und Infrastruktur unterstützen.

Nach der Betrachtung der Kostenentwicklung des gesamten PEMFC-Stacks wird im Folgenden detaillierter auf die Kostenentwicklung und -struktur der Stack-Komponenten BPP, MEA und GDL eingegangen.

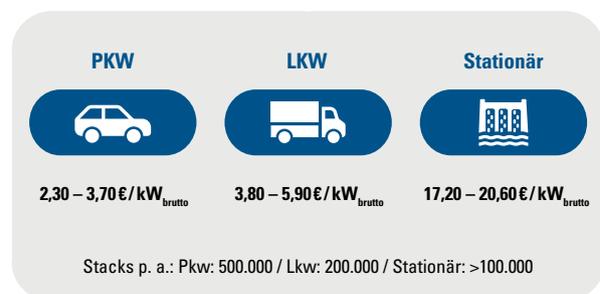
4.2.1 Bipolarplatte

Zunächst werden die Soll-Kosten der Bipolarplatte auf Basis der in Kapitel 4.1.3 vorgestellten Studien betrachtet. Bei der Analyse der Kosten wird zwischen verschiedenen Betrachtungsjahren, Anwendungen und Stückzahlannahmen unterschieden. Im Anschluss an die Soll-Kosten-Betrachtung werden die anvisierten Kostenprognosen mit Einschätzungen aus der Industrie verglichen.

Die Erkenntnisse aus der Betrachtung der Entwicklung der Stackkosten (siehe Kapitel 4.2) bestätigen sich für die Produktionskosten der Bipolarplatte. In Abbildung 70 ist zu erkennen, dass insbesondere beim Wechsel vom Manufaktur-/Kleinstserienbereich mit sehr geringen Stückzahlen (<2.000 Stacks p. a.) zur Produktion in Klein- bzw. Mittelserie (ca. 20.000 bis 30.000 Stacks p. a.) Kosteneinsparungen um den Faktor 5 bis 10 zu realisieren sind.

Mit zunehmender Stückzahl oberhalb des Kleinstserienbereichs verringert sich der Einfluss der Skaleneffekte auf die Herstellkosten. Dennoch sind Kostensenkungspotenziale zu erkennen. Die Kosten konvergieren bei hohen Stückzahlen gegen Minimalkosten (siehe Abbildung 69).

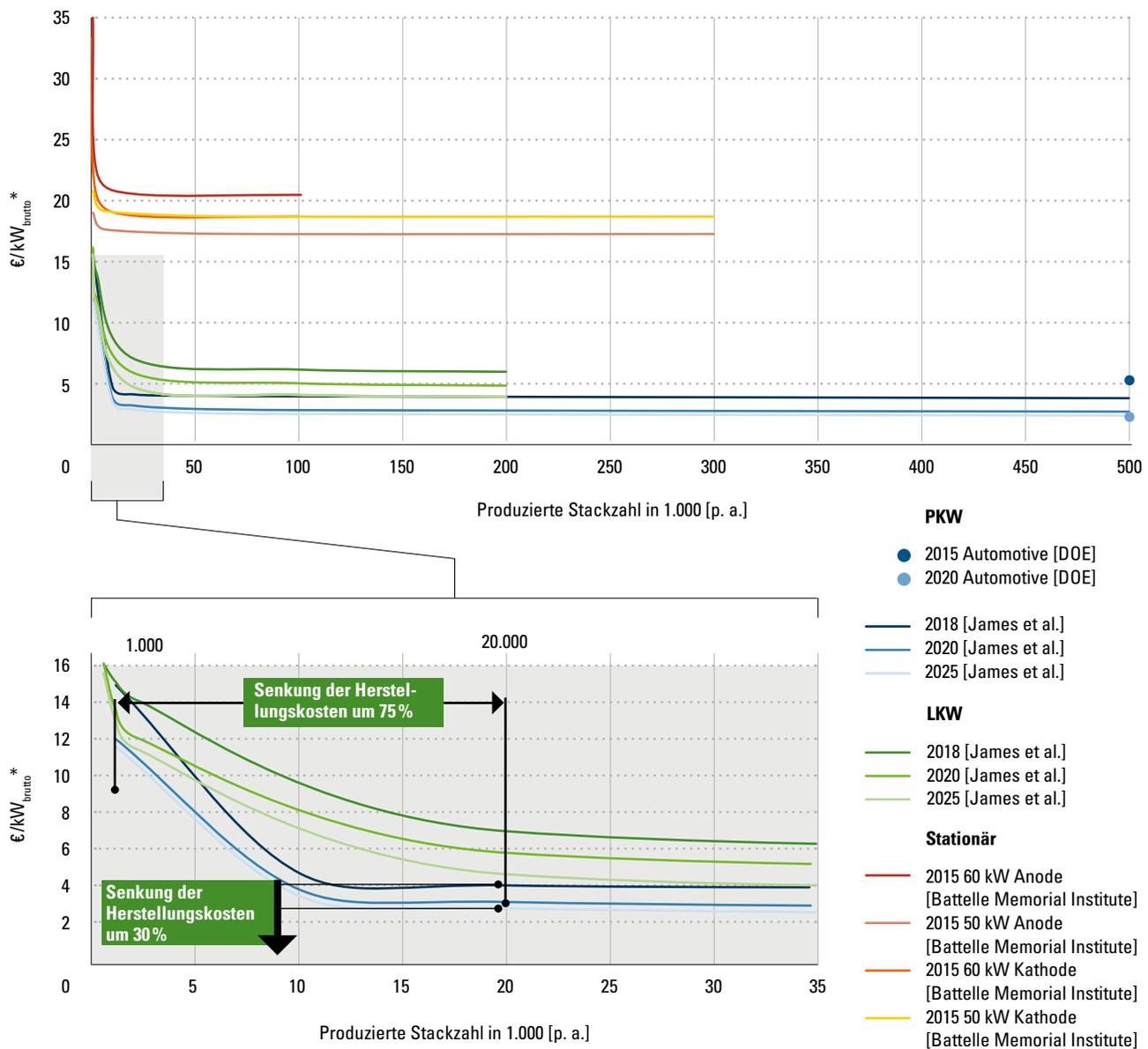
ABBILDUNG 69 Herstellkosten für BPPs für verschiedene Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)



Das amerikanische Department of Energy hat im Jahr 2017 neben den formulierten Zielkosten für den gesamten PEMFC-Stack auch Zielwerte für die Produktionskosten von BPPs für automobilen Anwendungen formuliert. Diese liegen bei 2,27 €/kW_{brutto} für das Jahr 2020 und damit nur geringfügig unter den angenommenen Soll-Kosten.³

³ Annahme: Großserienproduktion mit 500.000 Stacks p. a., Umrechnungsfaktor 0,85 €/€

ABBILDUNG 70 Übersicht spezifische BPP-Kosten



* Extrapoliert basierend auf Stützpunkten

Kostenstruktur

In Abbildung 71 sind die Kostenstrukturen für metallische BPPs für den Einsatz in mobilen Anwendungen abgebildet. Die Gesamtkosten setzen sich aus Kosten für Material und die Fertigung zusammen. In die Fertigungskosten werden sowohl die Investitionskosten für die verwendeten Maschinen als auch die Lohnkosten einbezogen. Werkzeugkosten, die Kosten für die Dichtheitsprüfung und die Beschichtung der BPPs werden separat ausgewiesen.

Pkw

Die Kosten für die BPP für Anwendungen im Pkw liegen bei geringen Stückzahlen bei 24,66 €/kW_{brutto}. Mit zunehmendem Produktionsvolumen können die Kosten um über 80% auf 4,09 €/kW_{brutto} gesenkt werden. Bei geringen Stückzahlen sind die Hauptkostentreiber die Fertigung mit 37%, der Beschichtungsprozess mit 26% und die Dichtheitsprüfung mit 27% der gesamten Herstellkosten. Mit zunehmender Effizienz der Produktionsanlagen steigt der relative Kostenanteil

der Materialien auf 42 %, während die absoluten Materialkosten in dieser Kostenbetrachtung nahezu konstant bleiben.

In Abbildung 71 lässt sich erkennen, dass insbesondere die Kostenreduktion bei der Fertigung, beim Beschichtungsprozess und bei der Dichtheitsprüfung für die sinkenden Herstellkosten verantwortlich ist.

Als einer der Hauptprozesse bei der Bipolarplattenfertigung ist bereits die Umformung identifiziert worden. Die Umformung der Bipolarplatten für Pkw-Anwendungen wird für alle betrachteten Produktionszahlen in einem Stanzprozess realisiert. Dieses Verfahren zeichnet sich zum einen durch geringe Zykluszeiten aus, die ein Hochskalieren ohne Technologiewechsel erlauben. Zum anderen sind mit diesem Verfahren vergleichsweise hohe Investitionskosten verbunden. Zudem ermöglicht diese Technologie die Implementierung des Schneidprozesses als zusätzlichen Prozessschritt im verwendeten Presswerkzeug. Die hohen Investitionskosten führen jedoch bei geringen Stückzahlen bzw. Maschinenauslastungen aufgrund der Maschinenabschreibung zu hohen Fertigungskosten bei der BPP-Produktion. Die Skalierbarkeit führt jedoch dazu, dass die absoluten Fertigungskosten mit steigender Stückzahl deutlich sinken.

Lkw

Für die Anwendung im Lkw werden für die BPP-Herstellung bei geringen Stückzahlen Kosten von $14,72 \text{ €}/\text{kW}_{\text{brutto}}$ kalkuliert. Die Kosten lassen sich durch die Hochskalierung auf 100.000 Stacks pro Jahr auf $4,35 \text{ €}/\text{kW}_{\text{brutto}}$ reduzieren. Bei geringen Stückzahlen sind die Hauptkostentreiber die Dichtheitsprüfung mit 45 % und die Fertigung mit 28 % der Gesamtkosten der BPP.

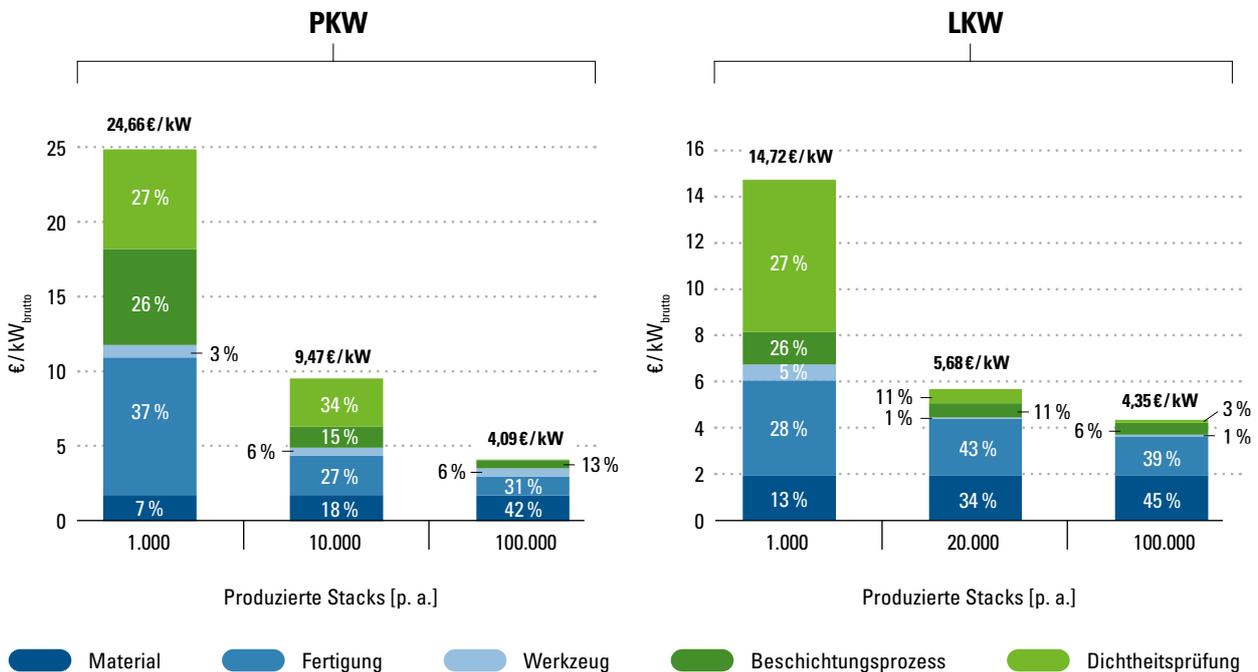
Der Umform- und Schneidprozess der BPP für Lkw-Anwendungen wird für alle Stückzahlen in einer hybriden Prozesskette realisiert. Nach der Umformung in einem Hydroforming werden die Platten in einem separaten Schneidprozess geschnitten. Der Hydroformingprozess eignet sich insbesondere für kleine und mittlere Losgrößen, da im Vergleich zum Stamping geringere Werkzeugkosten anfallen. Dies ist einer der Gründe, weshalb die Kosten für die Lkw-BPPs bei geringen Stückzahlen unterhalb der Kosten für die Pkw-BPPs liegen. Bedingt durch die schlechtere Skalierbarkeit des Umformprozesses und der geringeren Werkzeuglebensdauer sinken die Fertigungskosten bei höheren Stückzahlen jedoch weniger stark als bei der Umformung der BPP für die Pkw-Anwendung. Die Kostenbetrachtung zeigt damit deutlich die Abhängigkeit der BPP-Kosten von der gewählten Umformtechnologie.

Pkw/Lkw

Die Kosten für den Beschichtungsprozess sind in erster Linie eine Funktion der jährlichen Produktionsrate. Dies liegt vor allem an der nur geringen Auslastung der Beschichtungsanlage. Die Kosten für das Beschichtungsmaterial spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Die Entwicklung der Kosten für die Dichtheitsprüfung der einzelnen Bipolarplatten hängt maßgeblich von der Teststrategie in der Produktionskette ab. In den untersuchten Szenarien werden in James et al. bei geringen Produktionsmengen 100 % der produzierten Bipolarplatten getestet. Beim Wechsel auf hohe Stückzahlen wird von einer stichprobenartigen Dichtheitsprüfung von nur 0,5 % der produzierten BPPs ausgegangen.

ABBILDUNG 71 Kostenstruktur einer metallischen PEMFC BPP für Pkw- und Lkw-Anwendungen

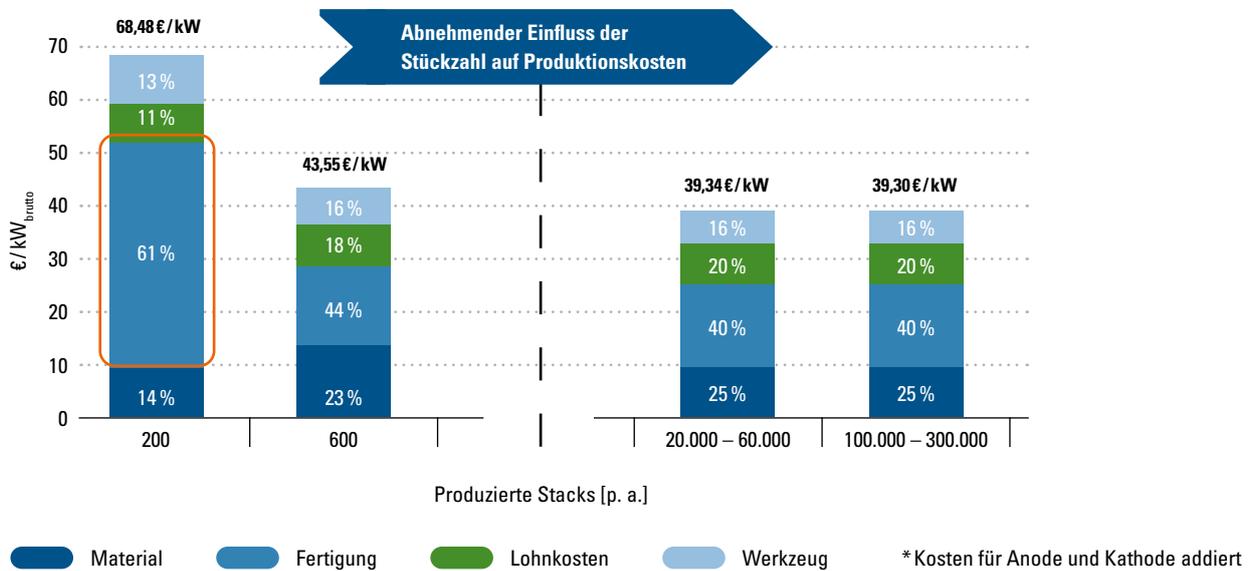


Stationär

Während in mobilen Anwendungen vor allem auf metallische BPPs zurückgegriffen wird, wird beim Ausgangsmaterial für die BPP für stationäre Anlagen aufgrund der hohen Lebensdauern von 50.000 Betriebsstunden vermehrt auf grafitische bzw. Compound-Halbzeuge zurückgegriffen. Die im Vergleich zu mobilen Anwendungen erhöhten Stackkosten für stationäre Anwendungen (siehe Kapitel 4.2) finden sich auch in der Kostenstruktur der BPP wieder. Hohe Kostenunterschiede für verschiedene Produktionsmengen ergeben sich insbesondere bei sehr geringen Stückzahlen von <1.000 Stacks pro Jahr. Es ist erkennbar, dass eine Hochskalierung auf eine Produktionsmenge von über 600 Stacks pro Jahr nur einen geringen Einfluss auf die Kosten der BPP-Produktion hat, eine Hochskalierung auf über 20.000 Stacks pro Jahr beeinflusst die Produktionskosten nicht. Wäh-

rend die absoluten Material- und Lohnkosten über die Produktionsmenge annähernd konstant sind, kann das größte Kostensenkungspotenzial vor allem bei der Fertigung realisiert werden. Die schnelle Reduktion der Fertigungskosten liegt vor allem in der Auslastung der Produktionsmaschinen begründet. Mit einer in der Studie vom Battelle Memorial Institute angenommenen Zykluszeit von ca. 30 BPP-Hälften pro Stunde kann bereits bei einer Produktionsmenge von ca. 500 Stacks pro Jahr eine hohe Auslastung einer einzelnen Produktionslinie erreicht werden. Die hohen Zykluszeiten resultieren vor allem aus den langen Aushärteprozessen in der BPP-Produktion. Eine weitere Hochskalierung der Produktion erfordert eine Parallelisierung mit entsprechend hohen Investitionskosten, sodass hierbei nur noch eine geringe Kostenreduktion in der Fertigung zu erwarten ist. Trotz sinkender Fertigungskosten macht diese Kostenart in allen Produktionsszenarien den größten Kostenanteil an der BPP-Pro-

ABBILDUNG 72 Kostenstruktur einer grafitischen PEMFC BPP für (quasi-)stationäre Anwendungen



duktion aus. Bei geringen Stückzahlen von 200 Stacks pro Jahr macht die Fertigung mit ca. 42 €/kW_{brutto} 61 % der Gesamtkosten aus, bei einer Skalierung auf >100.000 Stacks pro Jahr mit ca. 15,50 €/kW_{brutto} beträgt der Kostenanteil an den Herstellkosten noch 40 %.

Die BPP hat sowohl in mobilen Anwendungen als metallische BPP als auch in stationären Anwendungen als nichtmetallische BPP einen entscheidenden Anteil an den Herstellkosten der Brennstoffzellenstacks. Aus den vorangegangenen Betrachtungen wird deutlich, dass eine Kostenreduktion unabhängig von der Anwendung durch die Skalierung der Produktionstechnologie erreicht werden kann. Das Kostensenkungspotenzial hängt dabei vor allem vom verwendeten Material und der zugrunde gelegten Produktionstechnologie ab. Während die Herstellkosten für metallische BPP in mobilen Anwendungen mit einem Übergang von der Kleinstserienproduktion zur Kleinserienproduktion um den Faktor 5 bis 10 reduziert werden können, ist die Kostenreduktion bei Compound-BPP weniger stark ausgeprägt.

Einschätzungen der Industrie (metallische BPP)

Im nächsten Schritt werden die Kosteneinschätzungen durch Gespräche mit Vertretern aus Forschung und Industrie validiert, um mögliche Diskrepanzen zwischen den getroffenen Annahmen und der realen Entwicklung aufzudecken. Gleichzeitig werden die anvisierten Kosten mit realen Kostendaten aus der Literatur abgeglichen.

Für mobile Anwendungen im Pkw-Bereich werden aktuell vor allem metallische Bipolarplatten eingesetzt. Grafitische Bipolarplatten werden vor allem in Anwendungen, in denen eine erhöhte Lebensdauer des Brennstoffzellenstacks im Vordergrund steht, bevorzugt.

Beim Vergleich der realen Produktionskosten des Toyota Mirai I werden spezifische Kosten von 35 €/kW_{brutto} für die Produktion der Bipolarplatten aufgerufen. Diese liegen deutlich über den in Abbildung 70 dargestellten Zielkosten für metallische Bipolar-

platten für Pkw-Anwendungen. Hauptkostentreiber sind hierbei die Materialkosten, im Toyota Mirai I wird auf Titan als Grundwerkstoff zurückgegriffen.

Bei der Analyse der Herstellkosten für die Bipolarplatte werden nach Thompson et al. Kosten in Höhe von $5 \text{ €}/\text{kW}_{\text{brutto}}$ für hohe Stückzahlen >100.000 Stacks p. a. angeführt. Diese Daten des Bottom-up-Kostenvergleichs bestätigen die anvisierten Soll-Kosten.

ABBILDUNG 73 **Einschätzungen der Industrie bezüglich PEMFC-BPP**



Industrieseitig wird davon ausgegangen, dass die in diesem Kapitel vorgestellten Kostenziele für metallische BPPs mittelfristig zu erreichen sind. Führende deutsche Forschungsinstitute gehen davon aus, dass bei hohen Stückzahlen Bipolarplatten zu Kosten von 2 bis 6 €/kW produziert werden können. Die aktuelle Einzel- und Kleinstserienproduktion führt jedoch dazu, dass die Produktionskosten deutlich über den

Kosten für hohe Stückzahlen liegen. Der Fokus bei der Produktion von Bipolarplatten liegt laut Industrievertretern und Forschungsakteuren auf der Umformung der Plattengeometrien. Automobilzulieferer sehen insbesondere Stamping und Hydroforming als die geeignetsten Technologien für die Umformung an. Neben technischen und ökonomischen Randbedingungen wie die erreichbaren Taktzeiten und die erforderlichen Investitionskosten spielt vor allem die Vorerfahrung in Einzeltechnologien hierbei eine wesentliche Rolle. Im Allgemeinen sind bei geringeren bis mittleren Stückzahlen kleinere Anlagenkonzepte wie die Hydroforming-Technologie zu bevorzugen. Dies bietet das Potenzial, bei vertretbaren Investitionskosten die Anforderungen an die Produktion im Übergangsbereich von kleinen bis mittleren Stückzahlen abzudecken. Zuliefererbetriebe, die mittelfristig bis langfristig auf höhere Stückzahlen setzen, fokussieren sich jedoch bereits heute (Stand: 2022) auf Stamping-Technologien und bereiten sich auf Kleinserien-Produktionen von metallischen BPPs vor.

Investitionen für die Produktion von hohen Stückzahlen sind zum heutigen Stand noch nicht getätigt worden. Ausschlaggebend für den Aufbau einer hochratenfähigen Produktionslinie ist laut Zulieferern eine vorliegende Sicherheit eines möglichen Absatzmarktes für die BPP, z. B. in Form eines Großauftrages. Grundsätzlich ist jedoch eine hohe Investitionsbereitschaft zu erkennen.

Nutzfahrzeughersteller schätzten die Kostenziele für BPPs, die von James et al. prognostiziert werden, als realistisch ein. Die Kostendifferenz zwischen metallischen und grafitischen BPPs wird jedoch als zu hoch eingeschätzt. Anders als in James et al. angenommen, werden für den Nutzfahrzeugbereich aufgrund der erhöhten Lebensdaueranforderungen aktuell grafitische BPP verwendet. Die Materialauswahl und die

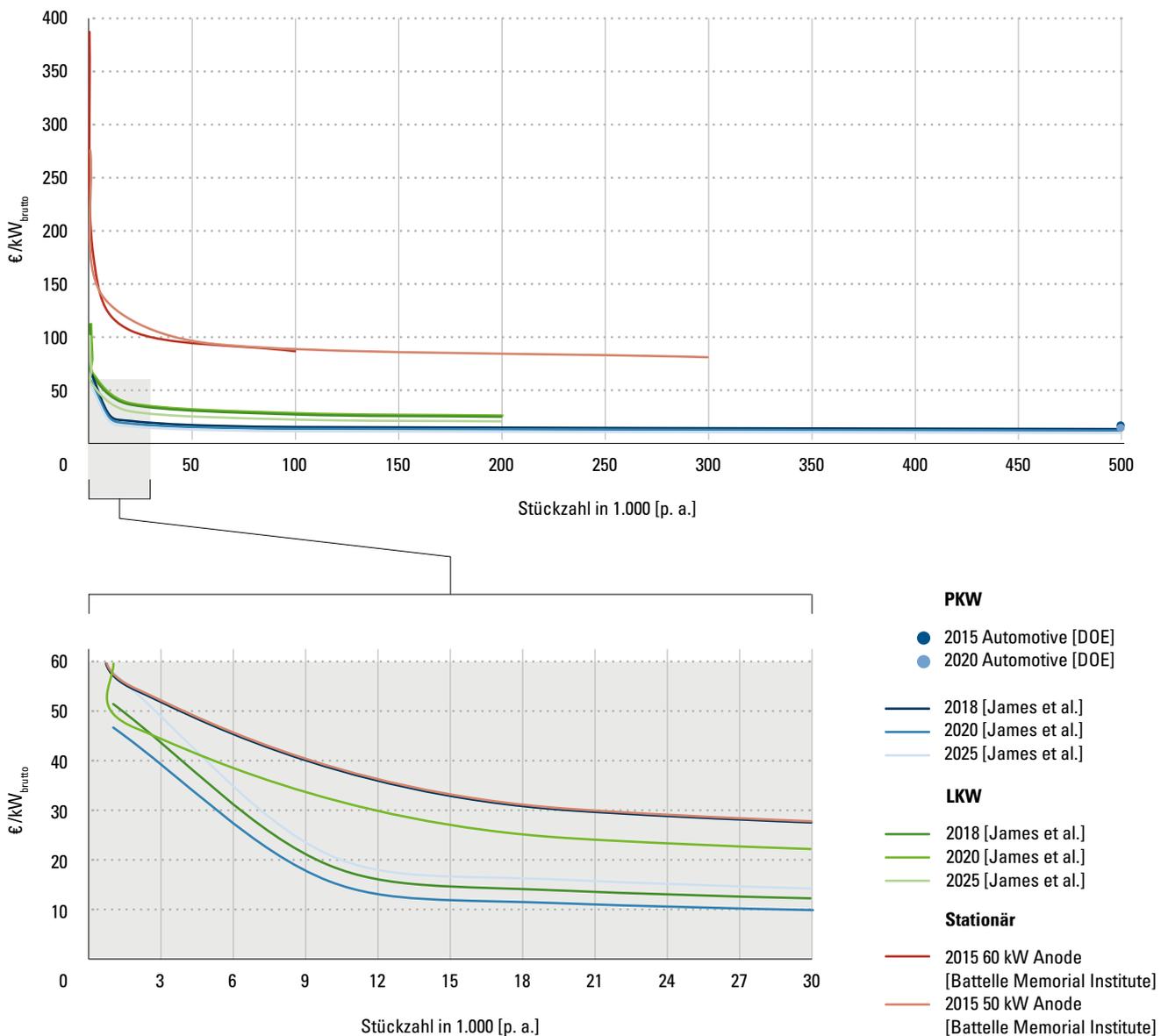
Konzeptionierung der Fertigung der BPPs sind jedoch noch nicht final abgeschlossen, sodass sich zum heutigen Zeitpunkt keine finalen Zuliefererstrukturen etabliert haben.

Der Zulieferermarkt für diese Komponente ist verglichen mit anderen Brennstoffzellenkomponenten relativ groß. Neben einer Vielzahl von deutschen Herstellern ist eine Vielzahl von Herstellern im asiatischen Raum zu finden, wodurch der Kosten- und Wettbewerbsdruck erhöht wird. Der hohe Wettbewerb stellt die deut-

sche Zuliefererindustrie vor Herausforderungen. So erwartet ein Automobilzulieferer, dass sich aufgrund des spezifischen BPP-Designs ein kundengebundener Markt entwickeln wird. Verbindliche (Groß-)Aufträge seitens der Stackhersteller sind daher maßgeblich für die Investition in neue Fertigungskapazitäten. Insgesamt ist jedoch eine große Investitionsbereitschaft der Industrie zu erkennen.

4.2.2 Membran-Elektroden-Einheit

ABBILDUNG 74 Übersicht spezifische MEA-Kosten



Analog zur Analyse der Entwicklung der Stackkosten (siehe Kapitel 4.2) sinken auch die spezifischen Kosten der MEA mit steigender Stückzahl. In Abbildung 74 ist zu erkennen, dass insbesondere bei Stückzahlen <15.000 Stacks eine starke Kostenreduktion mit steigender Stückzahl erwartet wird. Die Kosten der MEA zur Nutzung in Lkws pendeln sich auf einem höheren Niveau ein. Dies liegt insbesondere an der höheren Platinbeladung der MEAs für Lkw-Stacks aufgrund der höheren Lebensdauer. Im Vergleich zu den erwarteten Kosten für stationäre Stacks mit sind die MEAs für automobiler Anwendungen günstiger. Grund dafür sind die deutlich geringeren Platin-Beladungen, da im stationären Bereich eine geringere Energiedichte erwartet wird. Die größte Kostenreduktion wird auch hier im Rahmen der Skalierung von einer manufakturrellen Produktion hin zur Mittelserie (ca. 15.000 Stacks) erwartet. Für die Serienfertigung werden Kosten wie in Abbildung 75 gezeigt erwartet.

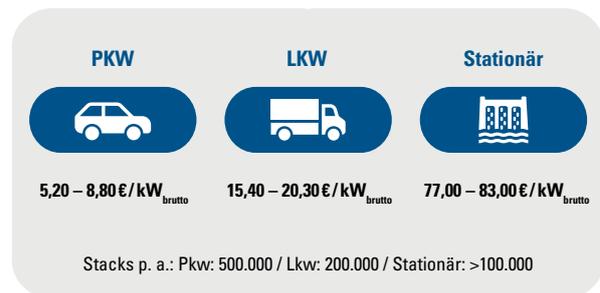
Das amerikanische Department of Energy hat im Jahr 2017 neben den formulierten Zielkosten für den gesamten PEMFC-Stack auch Zielwerte für die Herstellkosten von MEAs für automobiler Anwendungen formuliert. Diese liegen bei $10,58 \text{ €/kW}_{\text{brutto}}$ für das Jahr 2020 und damit zwischen den kalkulierten Kosten von Pkw- und Lkw-Stacks.⁴

Kostenstruktur

Nachdem mögliche Skaleneffekte qualitativ untersucht wurden, wird folgend auf die einzelnen Kostentreiber eingegangen. In Abbildung 76 sind die Kostenstrukturen für MEAs für den Einsatz in mobilen Anwendungen abgebildet. Die Gesamtkosten der Herstellung setzen sich aus Kosten für Material, Fertigung und einzeln ausgewiesenen Werkzeugkosten zusammen. Die fol-

gend analysierten Kosten beinhalten im Gegensatz zu den Betrachtungen der Kostenentwicklungen der MEA (siehe Abbildung 74) keine Gewinnmarge.

ABBILDUNG 75 Herstellkosten für MEAs für verschiedene Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)



Pkw

Die Herstellkosten für die MEA für Anwendungen im Pkw-Bereich liegen bei geringen Stückzahlen bei $49,62 \text{ €/kW}_{\text{brutto}}$. Mit zunehmendem Produktionsvolumen können die Kosten um den Faktor 5 auf $8,94 \text{ €/kW}_{\text{brutto}}$ gesenkt werden. Bei geringen Stückzahlen sind die Hauptkostentreiber für die Produktion die Fertigung mit 41 % und die Materialkosten mit 59 % der gesamten Produktionskosten. Mit zunehmender Effizienz der Produktionsanlagen steigt der relative Anteil der Materialkosten auf bis zu 88 %. Die absoluten Materialkosten sinken von 1.000 zu 100.000 produzierte MEAs um bis zu 73 %.

Aus Abbildung 76 lässt sich schlussfolgern, dass die Kosten pro $\text{kW}_{\text{brutto}}$ sowohl mit hochskalierter Produktionstechnologie als auch mit größeren Abnahmemengen von Material zur Fertigung von MEAs sinken.

⁴ Annahme: Großserienproduktion mit 500.000 Stacks p. a., Umrechnungsfaktor 0,85 €/€

Dabei haben die Materialkosten einen erheblich größeren Anteil an dem hochskalierten Produkt als Maschinenkosten. Eine deutliche Kostensenkung in der Hochserienfertigung ist daher über eine Reduktion des Materialpreises möglich. Dies kann z. B. durch innovative Materialentwicklungen, aber auch durch effizientere Produktionstechnologien geschehen.

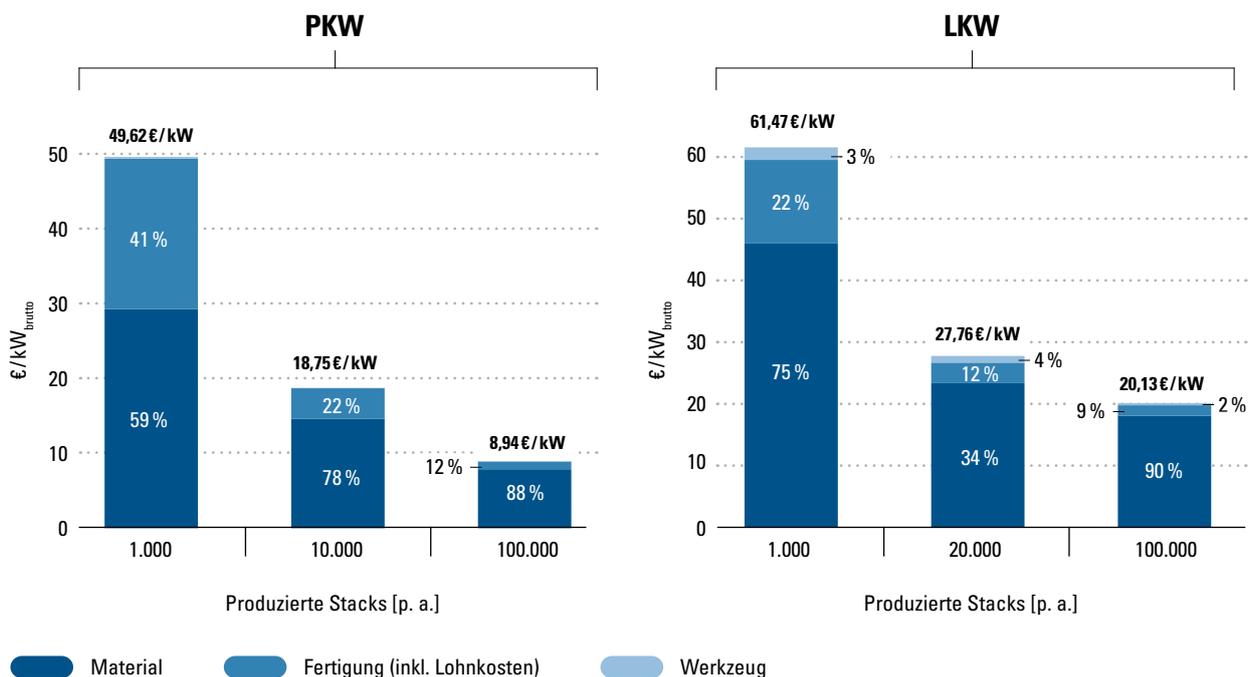
Lkw

Für die Anwendung im Lkw-Bereich bei geringen Stückzahlen errechnet James et al. Kosten von $61,47 \text{ €/kW}_{\text{brutto}}$ (vgl. Abbildung 76). Die Produktionskosten lassen sich durch die Hochskalierung hin zur Hochserienfertigung (ca. 100.000 Stacks pro Jahr) auf $20,13 \text{ €/kW}_{\text{brutto}}$ reduzieren. Eine Kostenreduktion um den Faktor 3 ist möglich. Bei geringen Stückzahlen sind die Hauptkostentreiber für die Produktion die

Fertigung mit 22 % und die Materialkosten mit 75 % der gesamten Produktionskosten. Ebenso wie für den Pkw lässt sich hierbei schlussfolgern, dass sowohl Material- als auch Produktionskosten mit der Stückzahl skalieren, die Materialkosten aber auf einem recht hohen Niveau stagnieren.

Ein wesentlicher Faktor der hohen Materialkosten sowohl für den Pkw-Bereich als auch den Lkw-Bereich ist das Platin, das als Katalysator verwendet wird. Die Materialkosten für Lkw-MEAs sind aufgrund ihres höheren Pt-Gehalts gegenüber Pkw-MEAs höher. Grund für die höhere Beladung ist die von James et al. angestrebte längere Lebensdauer der Lkw-Stacks. Mögliche materialeitige Alternativen sind Gegenstand der Forschung, aber noch nicht in kommerzieller Anwendung. Weiterhin kalkuliert James et al. mit der Annahme, dass die katalytische Schicht (engl. Catalyst Layer (CL)) direkt auf die passivierte Membran auf-

ABBILDUNG 76 Kostenstruktur einer MEA für Pkw- und Lkw-Anwendungen

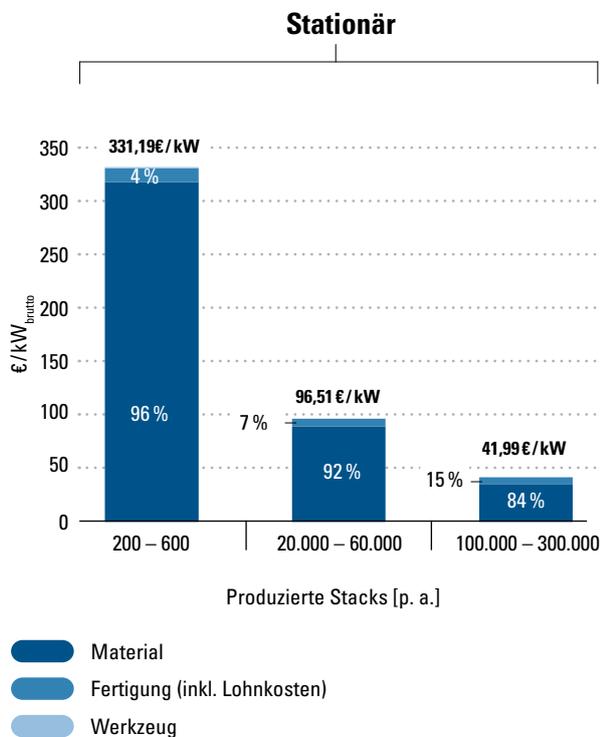


getragen wird, die anschließend in einem Säurebad aktiviert wird. Gegenüber anderen Fertigungsverfahren wie dem Beschichten von Decalbändern mit anschließendem Übertrag entstehen geringere Kosten, da weniger Produktionsmaschinen angeschafft werden müssen. Durch die Annahme der direkten Beschichtung erscheint die MEA daher günstig. Die direkte Beschichtung entspricht jedoch nicht dem aktuellen Stand der Technik und produziert nicht zweifelsfrei funktionale MEAs. Weiterhin werden die Positioniergenauigkeiten der CL, des Subgaskets und der GDL nicht adressiert. Die Anforderungen an Positioniergenauigkeiten sind in der Vergangenheit gestiegen, auch um den Katalysator effizient zu nutzen und somit Materialkosten zu senken. Die realen Kosten für die Anlagen könnten daher noch höher liegen, um den geforderten Genauigkeiten zu entsprechen. Neben den Material- und Fertigungskosten fallen auch Kosten für den Verschleiß der Werkzeuge an, die für die beiden Systeme Lkw und Pkw in Abbildung 76 gezeigt sind. Die Werkzeugkosten zur Produktion einer Pkw-MEA sind im Vergleich zu den anderen Kostenarten sehr gering und daher in Abbildung 76 nicht sichtbar und für den Lkw in Abbildung 76 kaum sichtbar. Weiterhin ist auf Basis der beiden Abbildungen festzustellen, dass die Materialkosten mit steigender Stückzahl kleiner werden. Ein möglicher Grund dafür ist neben dem Platin insbesondere das verwendete Ionomer, das aktuell nur eine Nische aus Sicht der polymerproduzierenden Unternehmen am Markt einnimmt. Mit steigender Abnahmemenge hin zur Hochserienfertigung könnten die Herstellkosten des Ionomers allerdings deutlich sinken. Auf Basis der untersuchten Studien kann der Materialpreis bei einer Skalierung des Produktionsvolumen von 1.000 Stacks auf 500.000 Stacks pro Jahr um den Faktor 20 sinken.

Stationär

Die im Vergleich zu mobilen Anwendungen erhöhten Stackkosten für stationäre Anwendungen gehen hauptsächlich auf die Kosten der MEA zurück. Ein wesentlicher Unterschied zu den mobilen Stacks besteht in den Anforderungen bezüglich der Lebensdauer. Stationäre Stacks werden in der Studie des Battelle Memorial Institute für einen Betrieb von 50.000 Stunden ausgelegt. Um eine solche Lebensdauer erreichen zu können, werden die MEAs für eine deutlich geringere Leistungsdichte ausgelegt. So wird in der betrachteten Studie eine Leistungsdichte von $0,27 \text{ W/cm}^2$ angenommen, wohingegen James et al. für mobile Anwendungen $1,178 \text{ W/cm}^2$ zugrunde legt. Entsprechend nimmt das Battelle Memorial Institute eine Pt-Beladung von $0,4 \text{ mg/cm}^2$ an, die $0,1 \text{ mg/cm}^2$ höher ist als die von James et al. für Pkw- und Lkw-Systeme angenommene. Zusätzlich zu den Mehrkosten durch den Katalysator werden vom Battelle Memorial Institute um den Faktor 5 höhere Kosten für die GDL und die Membran angenommen. Trotz der Abweichungen zwischen den Studien können anhand der betrachteten Studien Skaleneffekte untersucht werden. In Abbildung 77 ist erkennbar, dass eine Entwicklung von der Einzel- zur Kleinserienfertigung von über 600 Stacks pro Jahr einen deutlichen Einfluss auf die Kosten der MEA-Produktion hat. So können durch die Skalierung der Produktion auf mehr als 100.000 Stück pro Jahr die Kosten um 87 % verringert werden. Die Herstellkosten hingegen werden in Battelle Memorial Institute im Vergleich zu James et al. relativ gering angenommen. Die Reduktion der Materialkosten ist ebenso wie in der Betrachtung der mobilen PEMFCs deutlich bei Hochserienfertigungen zu sehen. Auch hier ist einer der Gründe die Kostenreduktion der Membran bei steigender Abnahmemenge.

ABBILDUNG 77 **Kostenstruktur einer MEA für stationäre Anwendungen**



Nachdem im Kapitel 4.2 bereits gezeigt wurde, dass die MEA einen entscheidenden Anteil an den Kosten des Stacks bei niedrigen und bei hohen Stückzahlen ausmacht, wird aus den vorangegangenen Betrachtungen deutlich, dass eine Kostenreduktion unabhängig von der Anwendung durch die Skalierung der Produktionstechnologie erreicht werden kann. Die Materialkosten machen sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Stückzahlen einen deutlichen Anteil an den resultierenden Kosten aus. Neben der Skalierung ist es daher unbedingt notwendig, günstigere Materialien, insbesondere für die Membran und den Katalysator, zu qualifizieren oder die vorhandenen Materialien effizienter zu nutzen.

Einschätzungen der Industrie

Betrachtet man die Produktionskosten der MEA des Toyota Mirai I, stellt man fest, dass diese bei den realisierten geringen Stückzahlen mit 70 €/kW_{brutto} nur etwas über den anvisierten Kosten liegen. Die aktuellen Ist-Kosten für die Produktion der MEA unterscheiden sich je nach betrachteter Stückzahl deutlich von den analysierten Soll-Kosten.

Im Bottom-up-Kostenmodell von Thompson et al. werden Kosten zwischen 9 und 11 €/kW_{brutto} für hohe Stückzahlen >100.000 Stacks p. a. angeführt. Diese Daten des Bottom-up-Kostenvergleichs bestätigen die anvisierten Soll-Kosten im Pkw-Bereich.

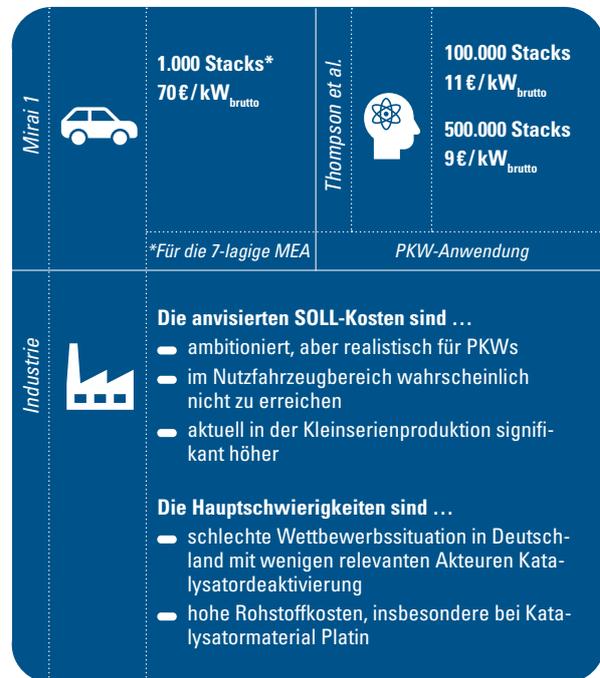
Nach Aussage von führenden Forschungsinstituten im Bereich der Brennstoffzellentechnik liegen die Kosten für die MEA-Produktion bei sehr geringen Stückzahlen um den Faktor 10 über den aktuell anvisierten Kosten in Abbildung 75. Dies liegt vor allem daran, dass zum jetzigen Zeitpunkt auf dem deutschen Markt nicht ausreichend relevante Akteure auf dem Gebiet der MEA-Produktion aktiv sind. Gleichzeitig sind Grundmaterialien wie die Membran oder die Katalysatorfarbe nur begrenzt auf dem Markt verfügbar. Die aktuelle Bepreisung gestaltet sich daher vor allem aufgrund mangelnden Wettbewerbs als herausfordernd. Für höhere Stückzahlen wird davon ausgegangen, dass die in Abbildung 75 angegebenen Kosten zu erreichen sind. Hier stellt das Katalysatormaterial Platin laut Experten den Hauptkostentreiber dar.

Automobilzulieferer hingegen halten die angenommenen Produktionskosten auch für eine hochskalige Produktion für nicht realisierbar. Um eine deutliche Kostensenkung in der Produktion von MEAs realisieren zu können, sind laut Zulieferer unterschiedliche Instrumente vorhanden. Neben der Schaffung eines

ausreichend großen Wettbewerbs wird der Fokus vor allem auf technologische und skalenbedingte Hebel zur Senkung der Kosten gelegt. Hier werden insbesondere die Materialauswahl und die Katalysatoreffizienz sowie das Recycling von Katalysatormaterial aus anderen Anwendungen, beispielsweise aus Abgaskatalysatoren, als Rohstofflieferanten betrachtet.

Ein deutscher Nutzfahrzeughersteller stellt die MEA7L in Eigenfertigung her. Die Einzelbestandteile werden über bestehende Zulieferketten eingekauft und inhouse assembliert. Die Kosteneinschätzungen liegen über den anvisierten Soll-Kosten, da die Zellen und damit auch MEAs im Nutzfahrzeugsektor überdimensioniert werden müssen, um die hohen Betriebszeitanforderungen erfüllen zu können. Die Überdimensionierung spiegelt sich insbesondere in einer erhöhten Pt-Beladung der Zellen wider, die den Leistungsverlust aufgrund von Katalysatordeaktivierung vorbeugend ausgleichen sollen. Der zweite Grund für die erhöhten Kosten liegt laut Herstellern in der Zuliefererlandschaft im Bereich der MEA-Einzelkomponenten. Diese ist in Deutschland zahlenmäßig wenig vertreten, die Zulieferer sind stark auf den US-Markt und den asiatischen Raum zentriert. Der Zulieferermarkt für die in der MEA verwendeten Polymere wird auch bei einer hochskaligen Produktion als vergleichsweise klein eingeschätzt, da die Mengenanforderungen weit unterhalb jener anderer Kunststoffe liegen. Damit ist dieser Markt für Polymerhersteller nur wenig attraktiv. Um den wachsenden Bedarf des Katalysators Platin zu decken, fokussiert der Nutzfahrzeughersteller u. a. das Recycling von Abgaskatalysatoren.

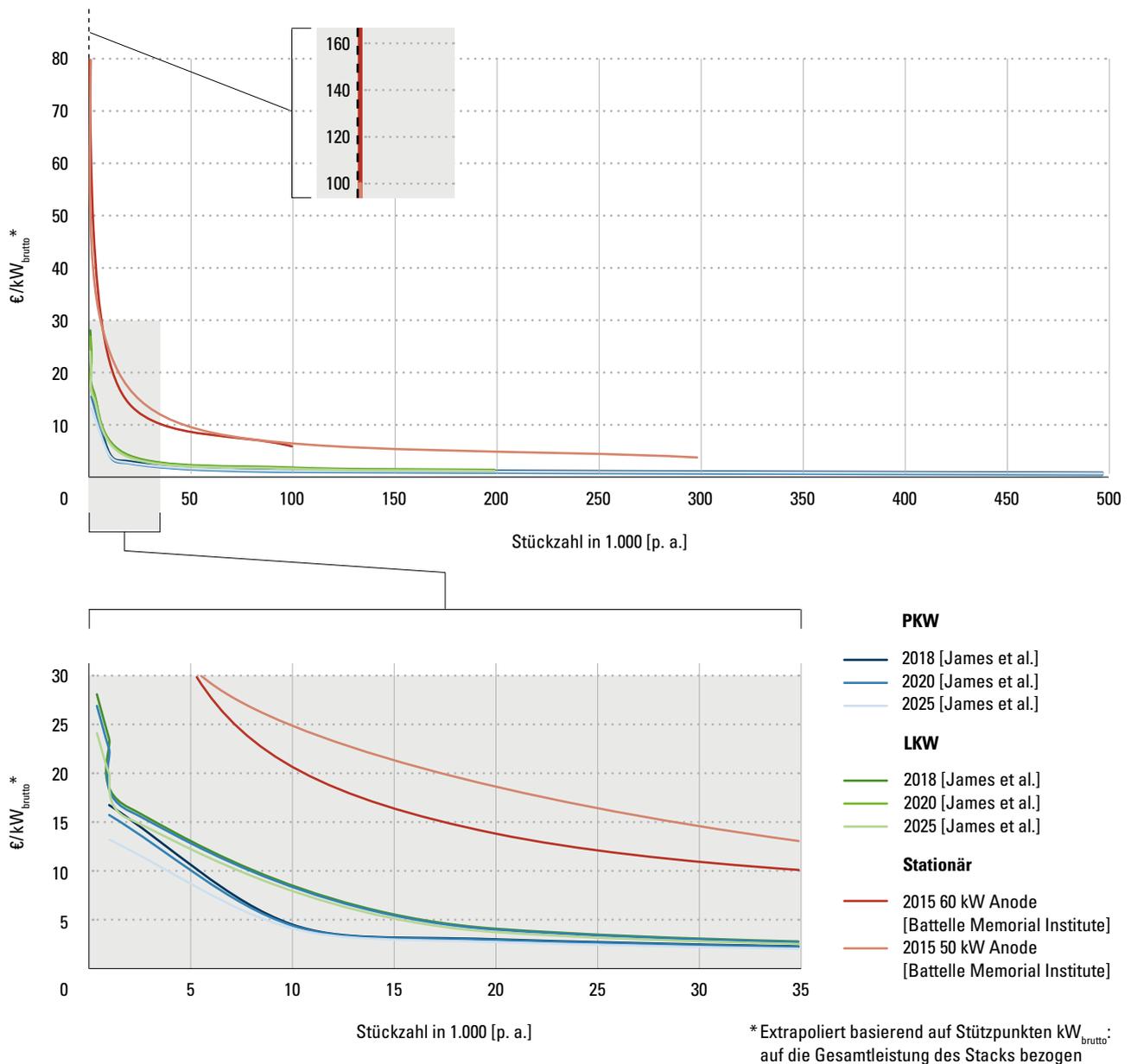
ABBILDUNG 78 Einschätzungen der Industrie hinsichtlich der PEMFC-MEA



4.2.3 Gas-Diffusions-Lage

Bei der Betrachtung der Produktionskosten für die PEMFC wird die GDL in den meisten Fällen als Zukaufteil betrachtet. Die Kosten für die GDL stellen somit zumeist Materialkosten bei der Produktion der MEA7L dar (siehe Kapitel 3.2.3). Selten erfolgt eine detaillierte Betrachtung und Analyse der Kosten auf Produktionsebene. Die in den betrachteten Studien getroffenen Kostenannahmen resultieren aus Interpolationen zwischen einzelnen analysierten Angeboten aus der Industrie. Diese zeigen ein hohes Kostensenkungspotenzial beim Zukauf der GDL in Abhängigkeit der Anzahl produzierter PEMFC-Stacks bzw. der abgenommenen Menge an GDL-Substrat. In Abbildung 79 ist zu erkennen, dass bereits bei geringen Stückzahlen Skalierungseffekte bei der Herstellung der GDL zur Geltung kommen, die sich bis hin zur Skalierung auf Hochserienfertigung erstrecken.

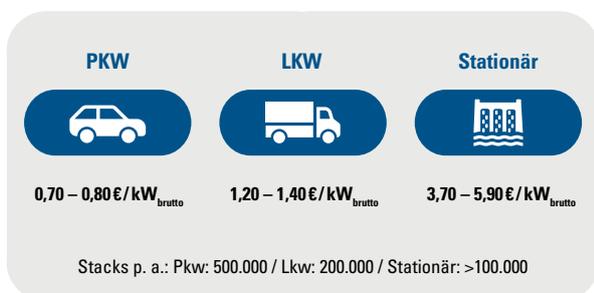
ABBILDUNG 79 Übersicht spezifische GDL-Kosten



Während zwischen den GDL-Kosten für die Pkw- und die Lkw-Anwendungen nur geringe Kostenunterschiede zu erkennen sind, werden insbesondere für stationäre Anwendungen hohe Kostenunterschiede zu den mobilen Anwendungen sichtbar. Die Kostenbetrachtung basiert maßgeblich auf den Werten von James et al. und dem Battelle Memorial Institute. Die hierbei getroffenen Abschätzungen basieren auf unterschiedlichen Angeboten und daraus gebildeten

Regressionsmodellen. Während die Kostenabschätzung in James et al. bis zu einer minimalen Stückzahl von 1.000 Stacks durchgeführt worden ist, prognostiziert das Battelle Memorial Institute auch Kosten für Abnahmemengen von weniger als 1.000 Stacks. Bedingt durch die begrenzte Anzahl an angefragten Angeboten kommen beide Studien zu unterschiedlichen Minimalkosten bei hohen Absatzzahlen. Es ist daher mit einer erhöhten Unsicherheit bei der Kostenbewertung zu rechnen.

ABBILDUNG 80 Herstellkosten für GDLs für verschiedene Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)



Festzustellen ist jedoch, dass eine deutliche Kostenreduktion von der Kleinst- zur Mittelserienfertigung zu betrachten ist. Die weitere Skalierung hin zur Hochserienfertigung senkt die Kosten der GDL weiter hin zu den Werten, wie in Abbildung 80 gezeigt.

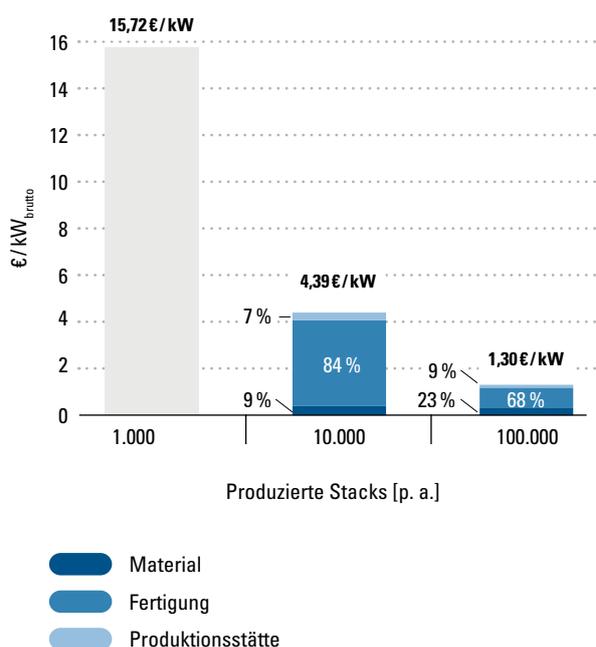
Kostenstruktur

Für die Analyse der Kostenstruktur wird auf den von der Firma Ballard Material Products veröffentlichten Prozessfluss für die GDL-Produktion zurückgegriffen. Hier werden die Kosten in Abhängigkeit der produzierten GDL-Fläche (in m²/a) untersucht. Die Kostenfaktoren werden dabei in Material, Fertigung und Kosten für die Produktionsstätte unterschieden. Die Berechnung der in Abbildung 81 ersichtlichen anteiligen Kosten für die diskreten GDL-Produktionszahlen ergibt sich aus der linearen Interpolation zwischen den diskreten Stützstellen der Kostenmodellierung. Aufschläge in der Prozesskette werden in der Kalkulation nicht berücksichtigt. Für Produktionsvolumen von 1.000 Stacks p. a. konnten keine relativen Kostenanteile extrapoliert werden.

Aus Abbildung 81 wird ersichtlich, dass durch eine Hochskalierung der Produktion eine Kostensenkung um den Faktor 10 möglich ist, ausgehend von Kleinstserienfertigung hin zur Hochserie. Die höchsten Kosten werden durch die mehrstufige und aufwendige Fertigung der GDLs verursacht. Die absoluten Materialkosten machen nur einen geringen Anteil an den GDL-Kosten aus und bleiben über die betrachtete Stückzahl annähernd konstant. Eine weitere Erhöhung der Stückzahlen auf über 100.000 Stacks p. a. hat kaum noch einen Einfluss auf die Materialkosten.

Die GDL ist abhängig vom Anwendungsgebiet die drittteuerste Komponente in einem PEMFC-Stack. Aus der obigen Betrachtung wird deutlich, dass Materialkosten einen geringen Einfluss auf die resultierenden Kosten haben. Es kann jedoch eine deutliche Kostenreduktion durch Skalierung der Produktionstechnologie erreicht werden.

ABBILDUNG 81 Kostenstruktur einer PEMFC GDL für Pkw-Anwendungen



Fazit – PEMFC-Stack

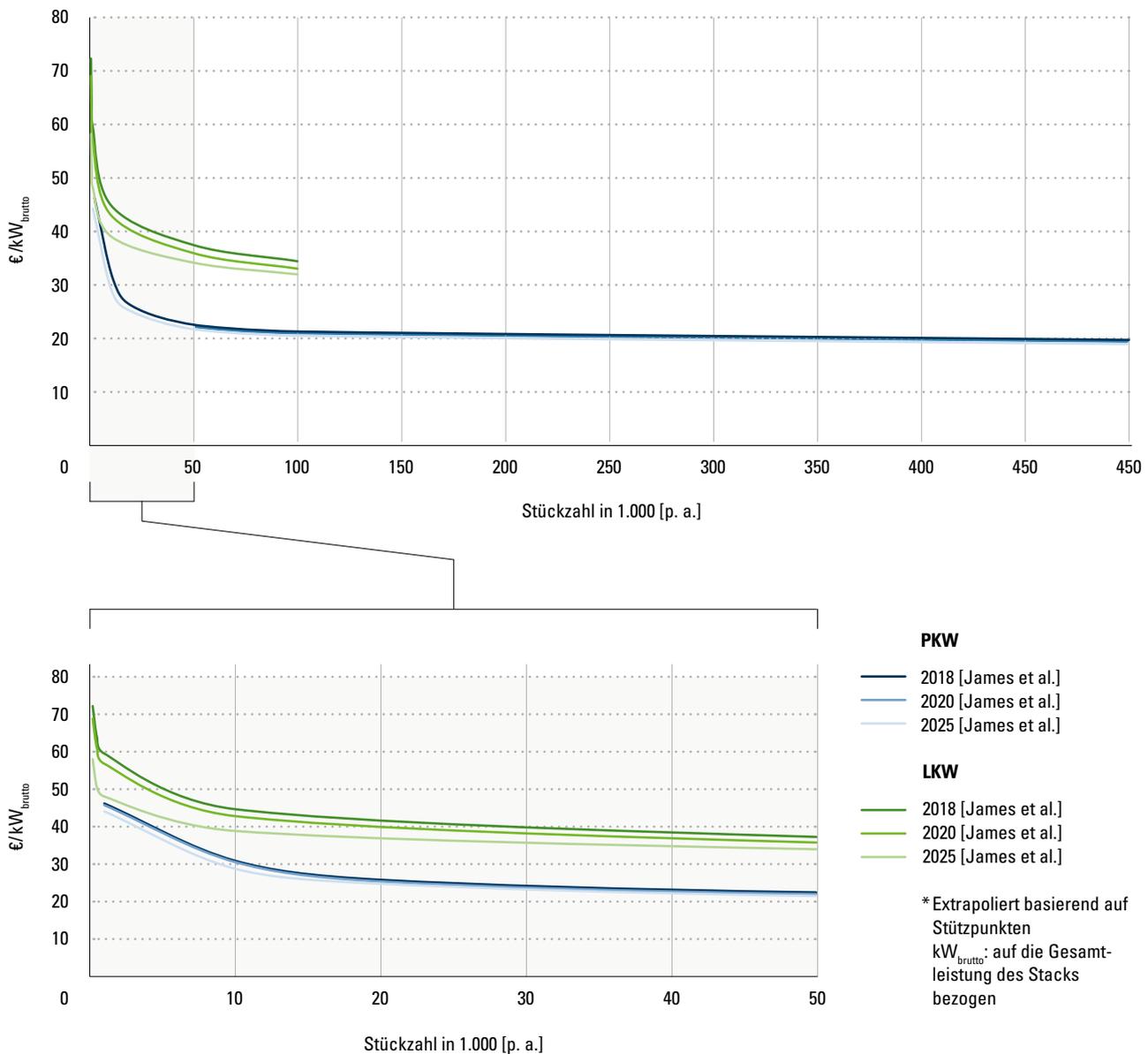
Die Kosten für in Kleinstserien produzierte Stacks liegen deutlich über den Kosten für die in Kleinserie oder in Massenproduktion gefertigten Stacks. Die Herstellkosten sind stark von der Anwendung abhängig – beispielsweise kosten Stacks für Pkw-Anwendungen weniger als solche für Lkw-Anwendungen. Stationär betriebene Stacks weisen die höchsten Herstellkosten auf. Die Gründe dafür sind hauptsächlich in den verschiedenen Anforderungen an Energiedichten und Lebensdauern zu finden. Beispielsweise liegen die Lebensdauieranforderungen für stationäre Stacks bei 40.000 bis 50.000 Stunden, wohingegen die PEMFC-Stacks in Lkw-Anwendungen nur auf eine Lebensdauer von 25.000 Stunden ausgelegt sind. Bei Pkw-Anwendungen wird von einer Lebensdauer von 5.000 Stunden ausgegangen. Begründet durch die unterschiedlichen Anforderungen ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der Produktionstechnologien und Materialkombinationen. So erhöht sich beispielsweise die Platinbeladung der MEA mit steigenden Lebensdaueranforderungen deutlich. Die Skalierung mit der Stückzahl erfolgt unabhängig von der Anwendung hauptsächlich über die Material- und Fertigungskosten. Insbesondere die Materialkosten der MEA können durch den Eintritt in die Massenproduktion reduziert werden. Auch die gestiegenen Abnahmemengen von Platin und des ver-

wendeten Ionomers haben einen starken Einfluss auf die Kostenstruktur. Im Vergleich zu den stark sinkenden Materialkosten der MEA stagnieren die Materialkosten der BPP und der GDL. Grund dafür ist, dass die verwendeten Grundmaterialien Edelstahl und Kohlenstoffasern bzw. Kohlenstoffpartikel bereits in anderen produzierenden Industrien in großem Maßstab angewendet werden. Die zu erzielenden Skaleneffekte sind daher gering. Bezüglich der Produktionstechnologie ist jedoch festzustellen, dass hohe Stückzahlen einen erheblichen Einfluss auf die Kosten des Stacks und der Komponenten haben. Die größte Kostenreduktion ist bei der Skalierung der Produktion von der Kleinstserie zur Kleinserienproduktion festzustellen. Eine weitere Skalierung auf das Niveau einer Massenproduktion senkt die Kosten weiter, wenn auch weniger deutlich.

4.3 PEMFC-BoP

Die PEMFC-BoP ist für die Versorgung des Brennstoffzellenstacks mit den für den Betrieb erforderlichen Medien und ihre Abführung aus dem PEMFC-Stack verantwortlich. Die BoP besteht aus einer Vielzahl einzelner Komponenten, der Anteil an Gleichteilen ist jedoch gering. Nach der Kostenbetrachtung des Stacks werden im Folgenden sowohl die Soll-Kosten als auch die Ist-Kosten für die PEMFC-BoP näher betrachtet. Dazu werden die spezifischen Kosten der gesamten BoP-Komponenten für mobile Anwendungen, unter-

ABBILDUNG 82 Übersicht spezifische BoP-Kosten



teilt in Lkw und Pkw, analysiert. Auf eine Analyse der BoP-Kosten für stationäre Anwendungen wird verzichtet, da sie im Vergleich zu mobilen Anwendungen eine geringere wirtschaftliche Relevanz in den kommenden Jahren haben werden. Im Anschluss werden die Kosten der Luftverdichtung und des Wassermanagements detaillierter betrachtet.

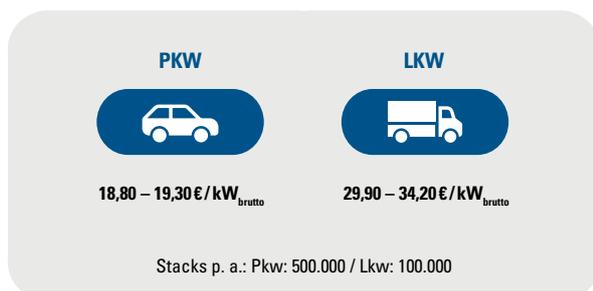
Die Herstellkosten der BoP sind weniger stückzahlabhängig als im PEMFC-Stack. Durch den geringen Anteil der Gleichteile sind die Skaleneffekte weniger stark ausgeprägt. Während bei niedrigen Stückzahlen davon ausgegangen werden kann, dass das BoP-System günstiger als der Stack ist, dreht sich das Kostenverhältnis bei hohen Stückzahlen um. Es ist zu erkennen, dass sich die größten stückzahlabhängigen Kosteneffekte bei Stückzahlen in der Kleinserienproduktion der

BoP-Systeme einstellen. Vergleicht man die Kostenkurven für die beiden Anwendungsfälle, wird deutlich (siehe Abbildung 82), dass sich ab einer Stückzahl von ca. 20.000 Einheiten die durch die Skalierung bedingten Kostensenkungen für Pkw- und Lkw-Anwendungen in gleichem Maße verhalten. Es kann daher angenommen werden, dass die spezifischen Kosten für Lkw bei einer Zunahme der produzierten Stückzahl über 100.000 Einheiten pro Jahr weiter leicht sinken werden, auch wenn die Kosten hier nicht quantifiziert werden.

Die technische Entwicklung zwischen den Jahren 2018 und 2025 hat im Pkw-Bereich nur marginale Auswirkungen auf die spezifischen BoP-Kosten. Im Lkw-Bereich hingegen können zwischen den Betrachtungsjahren erkennbare Kostenvorteile durch technologische Entwicklungen im Bereich der Luftverdichtung realisiert werden. Diese Kostenunterschiede werden mit steigenden Stückzahlen jedoch geringer.

Die Produktionskosten für die BoP-Systeme konvergieren bei hohen Stückzahlen von über 500.000 Systemen p. a. (Pkw) bzw. 100.000 Systemen p. a. (Lkw) gegen Minimalkosten von 18,80 bis 19,30 €/kW_{brutto} bzw. 29,90 bis 34,20 €/kW_{brutto}.

ABBILDUNG 83 **Herstellkosten für die BoP für verschiedene Anwendungen (alle Betrachtungsjahre)**



Kostenstruktur

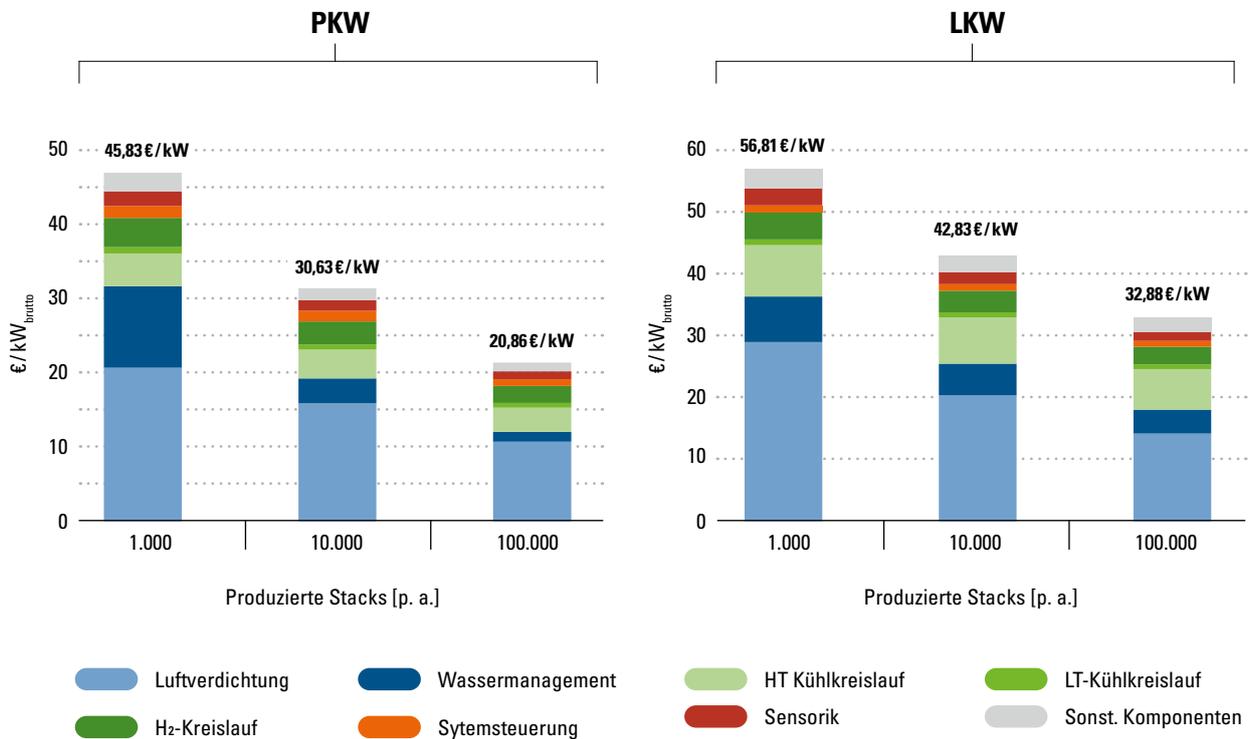
In Abbildung 84 sind die Kostenstrukturen für BoP-Systeme für den Einsatz in mobilen Anwendungen abgebildet. Die Gesamtkosten setzen sich jeweils aus den Kosten für die einzelnen Versorgungskreisläufe, die Systemsteuerung und die Sensorik sowie den Kosten für weitere (Kleinst-)Bauteile zusammen. Anders als in Kapitel 3.2.4 wird der Luftkreislauf noch mal in zwei separate Kreisläufe für die Luftverdichtung und das Wassermanagement unterteilt.

Im Gegensatz zu den in Kapitel 4.2 untersuchten Kostenstrukturen für die Stack-Komponenten werden bei der Kostenermittlung der BoP-Komponenten keine Herstellkosten, sondern Beschaffungskosten inklusive Margen-Aufschläge bei der Bepreisung eingerechnet. Es wird davon ausgegangen, dass die Produktion der Einzelkomponenten nicht vertikal integriert ist, die Komponenten demnach von Zulieferern erworben werden müssen.

Pkw

Die Gesamtkosten für die BoP-Komponenten für Anwendungen im Pkw-Bereich liegen bei geringen Stückzahlen von 1.000 Systemen p. a. bei 45,83 €/kW_{brutto}. Mit einer Skalierung der Produktion auf über 100.000 Systeme können die Kosten um über 55 % auf 20,86 €/kW_{brutto} gesenkt werden. Eine weitere Skalierung auf 500.000 Systeme pro Jahr führt nur noch zu geringen Kostensenkungen für das BoP-System. Unabhängig von der produzierten Stückzahl werden ca. 50 % der BoP-Kosten von den Komponenten für die Luftverdichtung verursacht. Bei geringen Stückzahlen stellt das Wassermanagement den zweiten großen Kostenfaktor dar. Mit spezifischen Kosten von 10,72 €/kW_{brutto} ist es für 23 %

ABBILDUNG 84 Kostenstruktur der PEMFC-BoP für Pkw- und Lkw-Anwendungen



der Gesamtkosten verantwortlich. Mit zunehmender Stückzahl wird der Einfluss des Wassermanagements auf die Kostenentwicklung jedoch geringer, bei einer Stückzahl von 100.000 BoP-Systemen werden Kosten von 1,31 €/kW_{brutto} für den Kreislauf veranschlagt.

Lkw

Die BoP-Komponenten für Anwendungen im Lkw-Bereich weisen sowohl absolut als auch spezifisch höhere Gesamtkosten als im Pkw-Bereich auf. Aus Abbildung 84 lässt sich entnehmen, dass die spezifischen BoP-Kosten für die betrachteten Stückzahlen um durchschnittlich 11,75 €/kW_{brutto} über den Kosten für die Pkw-BoP liegen. Die Skaleneffekte sind in der Lkw-Anwendung jedoch weniger stark ausgeprägt als im Pkw-Bereich. So können durch eine Skalierung der Produktion die Gesamtkosten von 56,81 €/kW_{brutto}

lediglich auf 32,88 €/kW_{brutto} gesenkt werden, was einer relativen Kostensenkung von 42 % entspricht. Die Kostenstruktur lässt erkennen, dass auch im Lkw-Bereich die höchsten Kosten von den Komponenten für die Luftverdichtung verursacht werden. Mit zunehmender Stückzahl nimmt der Anteil an den Gesamtkosten etwas ab. Den zweitgrößten Kostenfaktor stellt im Gegensatz zur Anwendung im Pkw-Bereich der Hochtemperatur-Kühlkreislauf dar. Er ist je nach produzierter Stückzahl für 15 bis 20 % der BoP-Gesamtkosten verantwortlich. Die höheren Kosten werden vornehmlich durch den Einsatz eines größer dimensionierten und damit teureren Kühlers verursacht.

Aufgrund des hohen Anteils an den Gesamtkosten wird in den folgenden beiden Kapiteln die Kostenentwicklung der Komponenten für die Luftverdichtung und das Wassermanagement inklusive Befeuchter näher beleuchtet.

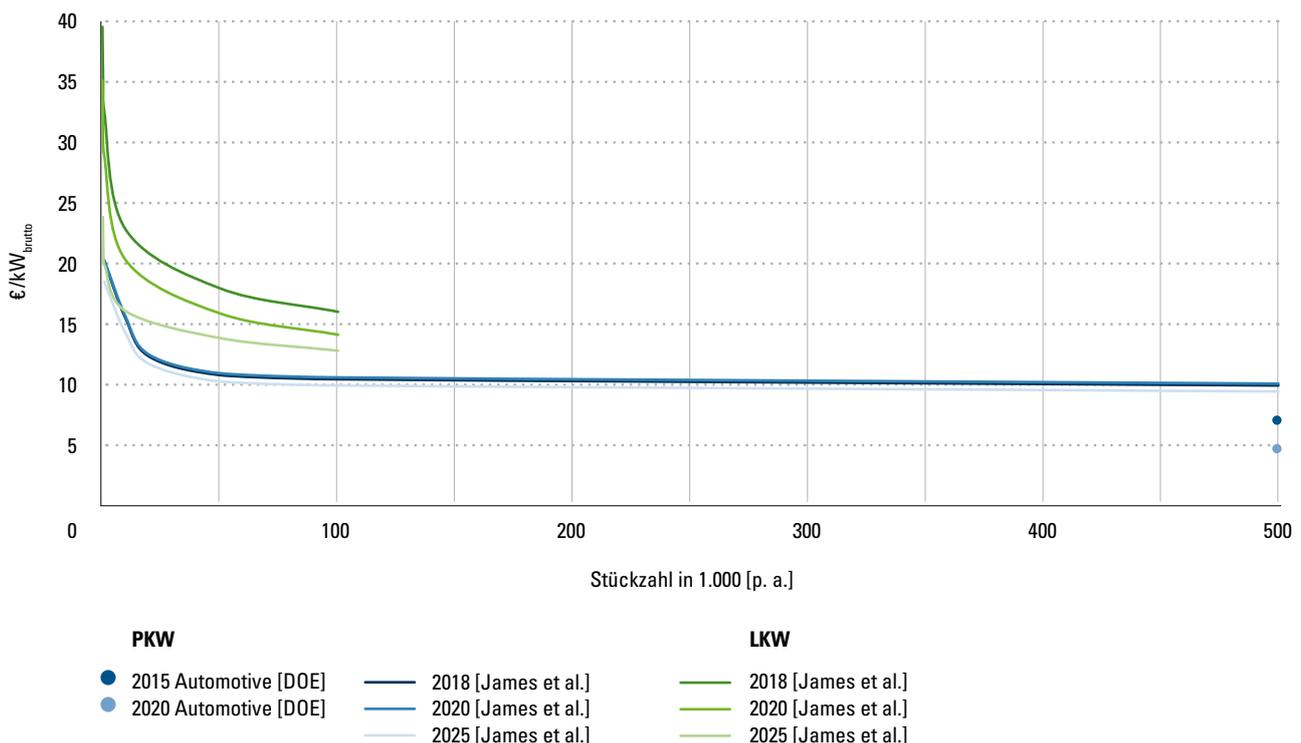
4.3.1 Luftverdichtung

In Abbildung 85 ist die Kostenentwicklung der Komponenten für die Luftverdichtung für verschiedene Jahre, Stückzahlen und Anwendungen abgebildet. Die Kosten für die Luftverdichtung setzen sich aus den Kosten für die Kompressoreinheit, die Ansaugereinheit, die Filter und das Gehäuse, die Messtechnik und die Ventile für die Luftleitung zusammen. Den mit Abstand größten Kostenfaktor unter diesen Komponenten stellt die Kompressoreinheit dar. Die Kostenentwicklung für die Kompressoreinheit kann daher stellvertretend für die Kostenentwicklung der Luftverdichtung gesehen werden.

Im Pkw-Bereich können durch technologische Entwicklungen bis 2025 keine erkennbaren Kostensenkungen in der Luftverdichtung erzielt werden. Bei hohen Stückzahlen konvergieren die Produktionskosten gegen Minimalkosten von durchschnittlich $10 \text{ €}/\text{kW}_{\text{brutto}}$. Im Lkw-Bereich hingegen ist durch die technologische Entwicklung zwischen den Betrachtungsjahren eine Kostenreduktion von ca. 20 % realisierbar (100.000 BoP-Systeme).

Im Jahr 2017 wurden vom DOE sowohl der aktuelle Kostenstatus für Luftkreisläufe als auch das Ziel für das Jahr 2020 analysiert. Sowohl der aufgenommene „Ist-Stand“ als auch das für das Jahr 2020 anvisierte Kostenziel von $4,72 \text{ €}/\text{kW}_{\text{brutto}}$ liegen deutlich unter den von James et al. durchgeführten Analysen.

ABBILDUNG 85 Kostenentwicklung der BoP-Luftverdichtung einer PEMFC bis zu einer Stückzahl von 500.000 [p. a.]



Einschätzungen der Industrie

ABBILDUNG 86 Einschätzungen der Industrie hinsichtlich des Luftverdichters



Die Erkenntnisse aus der Industrie beziehen sich auf die Kostenentwicklung des Kompressors für die Luftverdichtung. Dieser stellt als Einzelkomponente den größten Kostenfaktor im Kreislauf dar.

Die angegebenen Kosten für den Kompressor des in Kleinserie gebauten Toyota Mirai I liegen mit 13,60 €/kW_{brutto} bereits unter den angenommenen Stückkosten für geringe Stückzahlen. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass Kompressoren bereits in vielen Anwendungen zum Einsatz kommen. Dadurch können Synergien zwischen den Einzelentwicklungen genutzt und die Kostensenkung durch Skalierung bereits bei geringen Stückzahlen in den Einzelanwendungen realisiert werden. Die hohen Synergien mit anderen Verdichtertechnologien, beispielsweise elektrischen Verdichtern, ermöglichen in vielen Bereichen

die Nutzung von vorhandenem Know-how in der Entwicklung. Die in James et al. prognostizierten Kosten für eine hochskalierte Fertigung der Komponenten wird als ambitioniert, aber realistisch angesehen. Als herausfordernd hingegen wird die Entwicklung einer ölfreien Lagerung zur Vermeidung von Schadstoffeintrag in das Brennstoffzellensystem bewertet.

Seitens der Industrie werden die anvisierten Kosten für den Kompressor als realistisch eingeschätzt. So erwartet ein Nutzfahrzeughersteller, dass aufgrund des vorhandenen Entwicklungspotenzials und der ausgeprägten Zuliefererlandschaft aus dem Bereich der Luftzuführung von Verbrennungsmotoren eine hochskalige Produktion etwas unterhalb der in James et al. prognostizierten Kosten möglich ist.

4.3.2 Wassermanagement

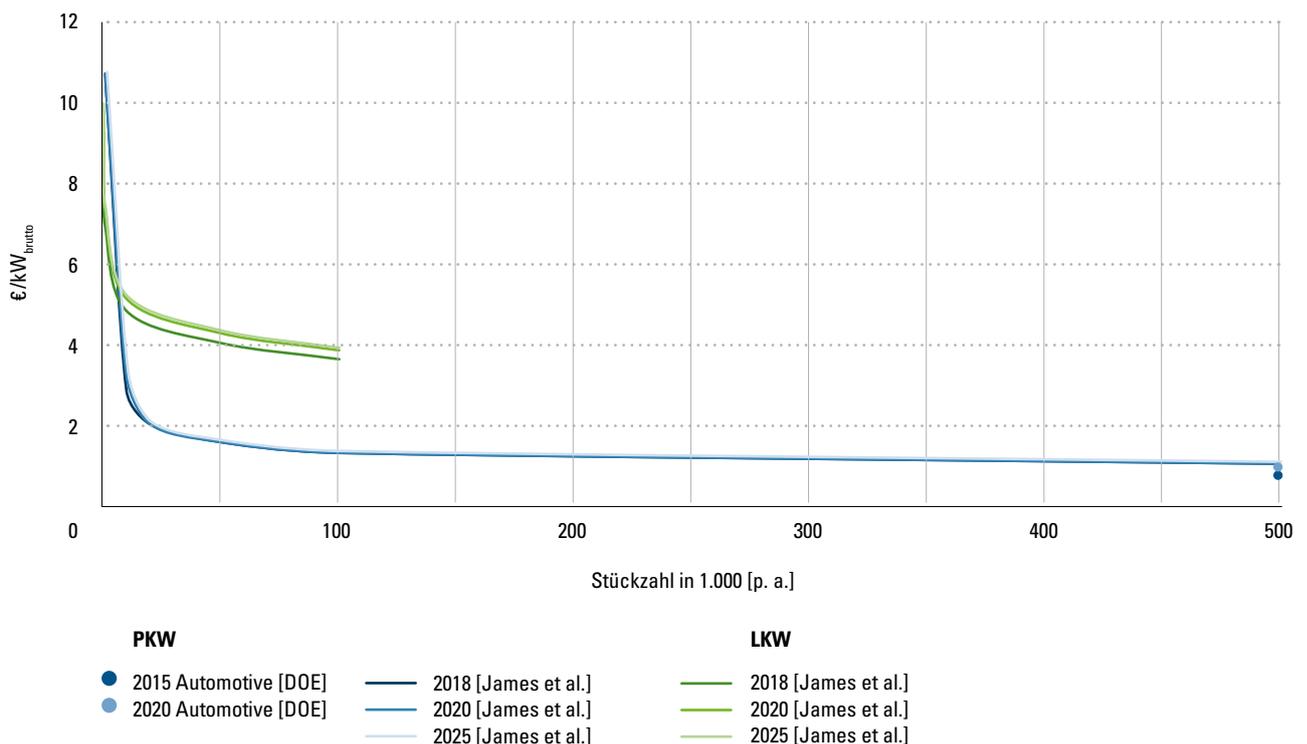
Abbildung 87 zeigt die Kostenentwicklung für das Wassermanagement für die PEMFC in mobilen Anwendungen. In die Kosten für das Wassermanagement werden die Kosten für die Kühleinheit, den Entfeuchter und den Befeuchter einbezogen. Aus Abbildung 87 wird ersichtlich, dass dieser Teil der BoP über ein außerordentlich hohes Kostensenkungspotenzial verfügt. Die analysierten Studien prognostizieren bei geringen Stückzahlen (<1.000 Systeme p. a.) Kosten von 9,30 bis 10,70 €/kW_{brutto} für das Wassermanagement. Bei einer Hochskalierung der Produktion auf 100.000 Systeme p. a. liegen die Kosten für Lkw-Anwendungen unter 4 €/kW_{brutto}. Im Pkw-Bereich liegen Daten für Stückzahlen bis 500.000 Systeme pro Jahr vor, hierbei werden Kosten von unter 1 €/kW_{brutto} erwartet.

An den Kostenverlaufskurven ist zu erkennen, dass insbesondere im Pkw-Bereich die technologische Entwicklung im Bereich des Wassermanagements nicht zu einer Reduktion der Gesamtkosten führt. Die Kosten für die Wasserkreisläufe in Lkw-Anwendungen reduzieren sich durch die Entwicklung zwischen den Betrachtungsjahren nur marginal.

Bei geringen Stückzahlen ist die Befeuchtereinheit für einen Großteil der Kosten verantwortlich. Ein Grund dafür kann in der hohen Spezialisierung des Bauteils gesehen werden. Während Kompressoren, Entfeuchter und Kühleinheiten auch in anderen Industriezweigen zur Anwendung kommen und Skaleneffekte früher genutzt werden können, sind die Anwendungsgebiete für Befeuchter begrenzt.

Die vom Department of Energy im Jahr 2017 veröffentlichten Zahlen zu den aktuellen Kosten (Basisjahr 2015) und den Zielkosten für 2020 für den Wasserrückgewinnungskreislauf liegen für eine Stückzahl von 500.000 produzierten Systemen pro Jahr bei $0,75 \text{ €/kW}_{\text{brutto}}$ bzw. $0,95 \text{ €/kW}_{\text{brutto}}$. Hierbei liegen die realisierbaren Kosten bereits unter dem Kostenziel für das Jahr 2020. James et al. geht für eine Stückzahl von 500.000 Systemen pro Jahr von Produktionskosten in Höhe von $1,10 \text{ €/kW}_{\text{brutto}}$ aus.

ABBILDUNG 87 **Kostenentwicklung des BoP-Wasserrückgewinnungskreislaufs einer PEMFC bis zu einer Stückzahl von 500.000 [p. a.]**



Einschätzungen der Industrie

ABBILDUNG 88 Einschätzungen der Industrie hinsichtlich des Befeuchters



Die Erkenntnisse aus der Industrie beziehen sich auf die Kostenentwicklung des Befeuchters für das Wassermanagement. Dieser stellt als Einzelkomponente den größten Kostenfaktor im Wassermanagement dar.

Im Bottom-up-Kostenmodell von Thompson et al. werden für den Befeuchter Kosten von ca. 1 €/kW_{brutto} für hohe Stückzahlen >100.000 Stacks p. a. angeführt. Diese Daten des Bottom-up-Kostenvergleichs bestätigen die anvisierten Soll-Kosten im Pkw-Bereich. Sowohl das Zentrum für Brennstoffzellentechnik als auch ein Zulieferer für die Automobilindustrie stufen diese Entwicklung als realistisch ein. Als Hauptherausforderung bei der Entwicklung und Produktion wird der Mangel an Standards hinsichtlich der eingesetzten Materialien, möglicher Prüfverfahren sowie Leistungs- und Robustheitsanforderungen genannt, wodurch eine frühzeitige Entwicklung für ein breites Anwendungsspektrum erschwert wird. Wie bereits die Analyse der Soll-Kosten zeigt, bestehen beim Befeuchter bislang

nur wenige Synergien mit anderen Industrien, dementsprechend sind insbesondere bei kleinen Stückzahlen hohe Kosten zu erwarten.

Der Einsatz eines Befeuchters im Brennstoffzellensystem hängt laut Experten vom Anwendungsfall des Gesamtsystems ab. Bei Anwendungen mit vergleichsweise hoher Leistungsdichte wird davon ausgegangen, dass Befeuchter in den Systemen eingesetzt werden müssen. In Einzelfällen, beispielsweise bei großformatigen Zellen, kann auf den Einsatz eines Befeuchters verzichtet werden. In diesen Fällen muss aber das Stackdesign angepasst werden, sodass eine interne Befeuchtung der Membran erfolgen kann, da andernfalls Einbußen bei der Leistungsdichte und Lebensdauer zu erwarten sind. Die in James et al. prognostizierten Soll-Kosten werden als zu ambitioniert angesehen. Als realistisch werden Kosten etwas oberhalb der Soll-Kosten erwartet. Aktuell werden in der Industrie bereits Kapazitäten für die Produktion von Befeuchtern in Kleinserien (ca. 10.000 Stück pro Jahr) vorbereitet und geplant.

Fazit – PEMFC-BoP

Die Kosten der PEMFC-BoP setzen sich aus den Einzelkosten der verbauten Komponenten zusammen. Ein Großteil der Gesamtkosten der BoP wird durch kostenintensive Komponenten wie dem Verdichter verursacht. Gleichzeitig führen die hohen Anforderungen und die hohe Spezialisierung der Einzelkomponenten zu insgesamt erhöhten Komponentenkosten und damit zu einem hohen Kostenniveau der BoP. Im Gegensatz

zur Betrachtung der wiederkehrenden Wiederhol-einheiten im Stack (BPP, MEA, GDL) ist die Anzahl der Gleichteile in der BoP gering. Durch die geringe Anzahl an Gleichteilen sind die Skaleneffekte bei den Herstellkosten weniger stark ausgeprägt als im Stack. Dies führt dazu, dass der relative Kostenanteil der BoP am Gesamtsystem Brennstoffzelle mit zunehmendem Produktionsvolumen zunimmt. Die Herstellkosten der BoP sind wie im Stack auch stark vom Anwendungsfall abhängig. Die Kosten für die BoP in Lkw-Anwendungen liegen bis zu 65 % über den Kosten für BoP-Systeme für automobiler Anwendungen. Die Gründe dafür sind vor allem in den erhöhten Lebensdauernanforderungen und der Gesamtsystemauslegung der Lkw-Systeme zu sehen.

Die anvisierten Kostenreduktionen werden von der Industrie als ambitioniert, aber realistisch eingestuft.

4.4 SOFC-Stack

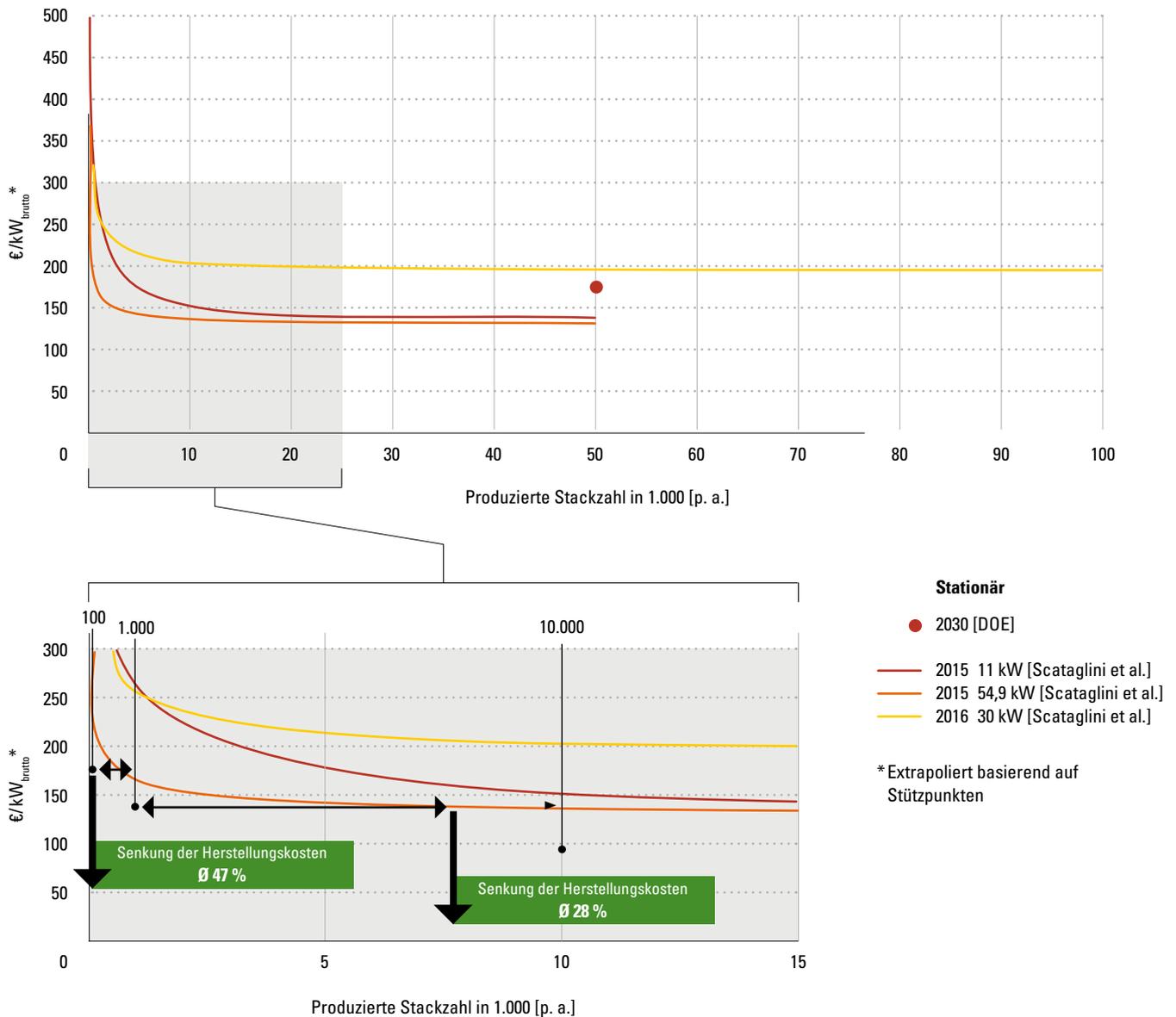
Die Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) wird anders als die PEMFC stationär zur Energieversorgung von Gebäuden oder quasistationär für Schiffe oder Bahnen genutzt. Der wichtigste Unterschied in der Betriebsweise ist, dass SOFC-Stacks bei Temperaturen oberhalb von 600 °C laufen, weshalb die Materialien fast ausschließlich Metalle und Keramiken sind.

Wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, werden zwei Studien untersucht, um die Kosten der SOFC-Herstellung in $\text{€}/\text{kW}_{\text{brutto}}$ bei steigenden Stückzahlen zu beschreiben. Dabei werden neben der Kostenentwicklung eines 30 kW_{netto} -Stacks aus der Studie von Battelle Memorial Institute zwei Stack mit Leistungen von 11 $\text{kW}_{\text{brutto}}$ und 54,9 $\text{kW}_{\text{brutto}}$ aus Scataglini et al. untersucht. Alle drei Stack wurden mit ähnlichen Annahmen bezüglich der Materialkosten und Produktionstechnologien analysiert, weshalb sie in dieser Studie als Kostenrahmen verstanden werden können. An ihnen können unabhängig von den Annahmen Skaleneffekte abgeleitet werden, die folgend erst für den Stack und dann für einzelne Komponenten analysiert werden.

Aus Abbildung 89 wird ersichtlich, dass ein großes Einsparpotenzial bereits bei der Skalierung von kleinen Stückzahlen (Kleinstserienbereich) erzielbar ist. Es sinken die Herstellkosten bei einer Skalierung von 100 auf 1.000 Stück bereits durchschnittlich um den Faktor 2. Bei einer weiteren Stückzahlsteigerung auf 10.000 Stück hin zur Mittelserienfertigung sinken die Kosten um weitere durchschnittliche 28 % (bezogen auf 1.000 produzierter Stack). Im Vergleich mit den stationären PEMFC setzen Skaleneffekte hier deutlich eher ein.

Die hier analysierten Studien prognostizieren Kosten zwischen 137 $\text{€}/\text{kW}_{\text{brutto}}$ und 204 $\text{€}/\text{kW}_{\text{brutto}}$ bei hohen Stückzahlen (>10.000 Systemen). Diese Diskrepanz kommt einerseits durch unterschiedliche Zellendesigns, andererseits durch verschiedene Annahmen zur Berechnung der Herstellkosten (Auszug der Annahmen – vgl. Tabelle 9) zustande. Insbesondere die Lohnkosten werden in Battelle Memorial Institute wesentlich höher angenommen.

ABBILDUNG 89 Übersicht über die spezifischen Stackkosten



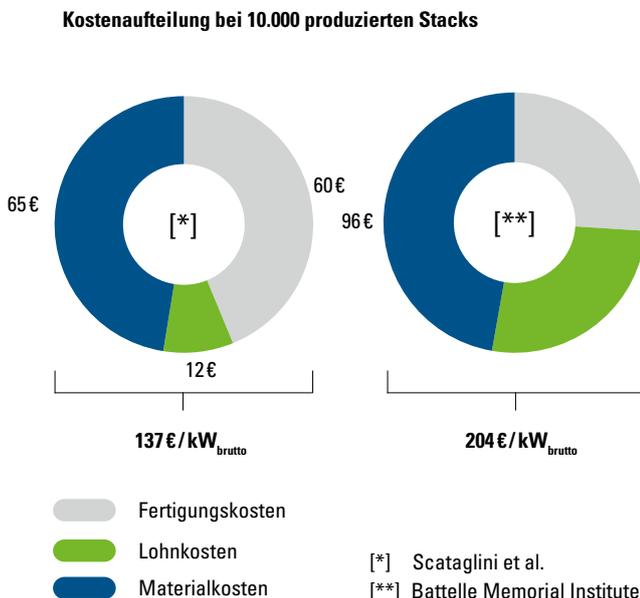
Analog zu den Unterschieden in den betriebswirtschaftlichen Annahmen kann auch im direkten Vergleich der Kostenvorhersagen bei 10.000 Stacks gesehen werden, dass die einzelnen Kostenpositionen unterschiedlich hoch sind (vgl. Abbildung 90). Beide Studien errechnen, dass ca. 50 % der spezifischen

Kosten pro kW_{brutto} auf die Materialkosten zurückzuführen sind. Die andere Hälfte teilt sich in unterschiedliche Anteile von Lohnkosten und Fertigungskosten auf.

TABELLE 9 Auszug einiger Parameter zur Berechnung der Herstellkosten nach Scataglini et al. und dem Battelle Memorial Institute

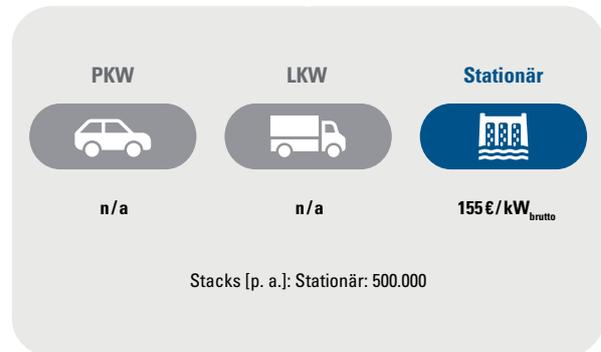
Parameter	Scataglini et al.	Battelle Memorial Institute
Arbeitstage	240	250
Werkzeughaltbarkeit [in Jahren]	15	20
Energiekosten [€/kWh]	0,085	0,06
Lohn [€/h]	25,50	38

ABBILDUNG 90 Kostenpositionen für SOFC-Stacks, aufgeteilt in Produktionskosten, Lohnkosten und Materialkosten nach Scataglini et al. und dem Battelle Memorial Institute



Die Annahmen und Durchführungen der Studien sollen folgend nicht weiter erläutert werden, sondern die Verläufe der Kosten als Richtwerte dienen. Für die folgenden Betrachtungen werden die Kosten bei verschiedenen Stückzahlen als Durchschnitt der beiden Studien ermittelt.

ABBILDUNG 91 Herstellkosten für SOFC-Stacks für verschiedene Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)

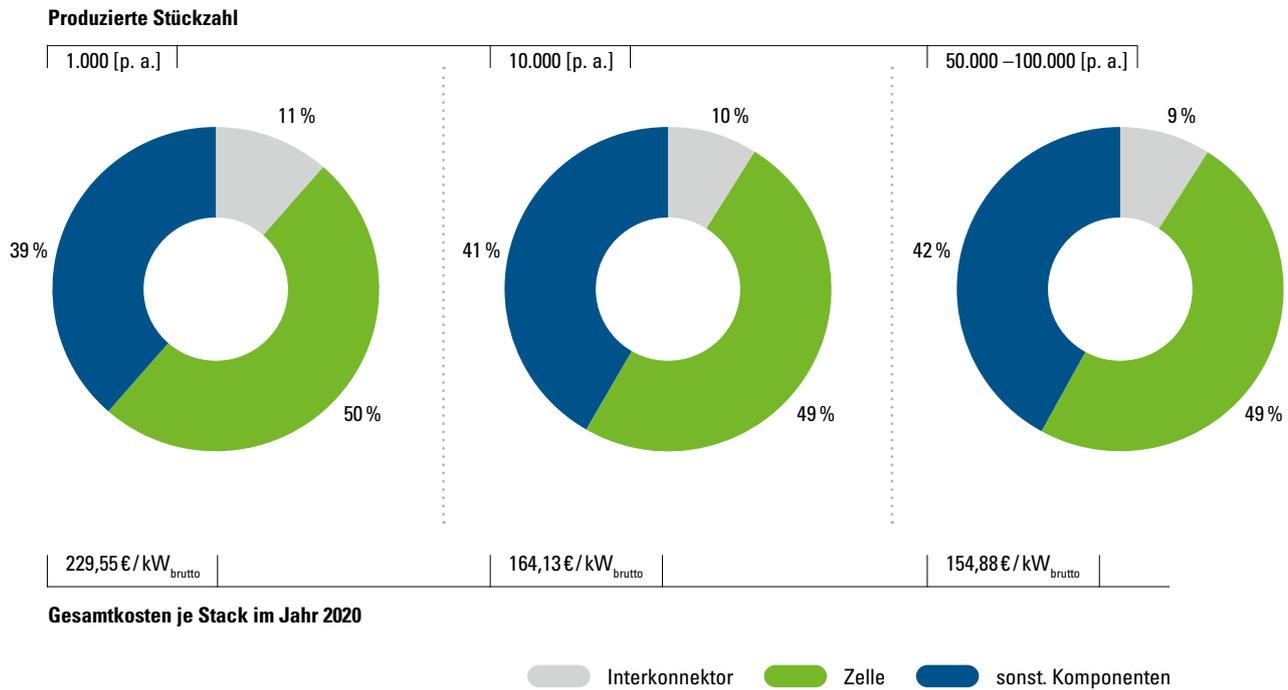


Die Herstellkosten pro Stück sinken auf durchschnittlich 155 €/kW_{brutto} für die Massenproduktion von 50.000 Stacks. Es ist ein beträchtliches Potenzial zur Kostenreduktion durch Hochskalierung festzustellen.

Kostenstruktur

In Abbildung 92 sind die Kostenstrukturen für Festoxid-Brennstoffzellenstacks für verschiedene Stückzahlen abgebildet. Bei der Unterteilung der Kosten wird zwischen den Komponenten Interkonnektor und Zelle unterschieden. Weitere Kostenfaktoren wie Dichtungen, Rahmen, Siebe, Endplatten, Stromkollektoren, Kompressionsbänder, Gehäuse, und Aufbereitung sowie die Kosten für die Montage werden unter der Kostenart „sonstige Komponenten“ zusammengefasst. Grund dafür sind die wenig einheitlichen Designs der SOFC. Interkonnektor und Zelle dagegen sind essenzielle Bestandteile jeder SOFC und können daher verglichen werden (siehe Kapitel 3.3.3 bzgl. SOFC-Komponenten).

ABBILDUNG 92 Kostenstruktur des SOFC-Stacks für stationäre Anwendungen



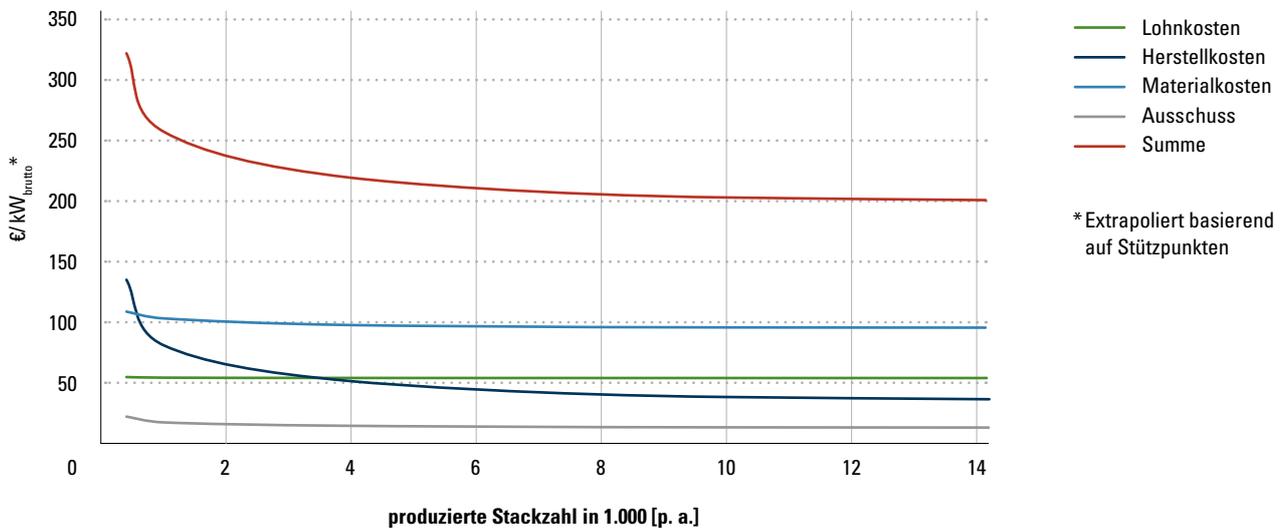
Die Herstellkosten für den SOFC-Stack für stationäre Anwendungen sinken mit einer Steigerung der Stückzahlen deutlich. So können die Produktionskosten bei einer Skalierung der Produktionsmenge von 1.000 auf 10.000 Stacks pro Jahr um 28 % auf durchschnittlich 164,13 €/kW_{brutto} reduziert werden. Durch eine weitere Erhöhung der Produktionsmenge auf 100.000 Stacks pro Jahr können durchschnittliche Herstellkosten von 154,88 €/kW_{brutto} realisiert werden.

Der größte Anteil der Kosten wird über alle betrachteten Stückzahlen durch die MEA verursacht. Ihr Kostenanteil nimmt mit steigender Stückzahl etwas zu und macht ca. die Hälfte der Kosten des Brennstoffzellenstacks aus. Den zweitgrößten Kostenfaktor mit ca. 40 % stellen die sonstigen Komponenten dar. Die weitere Unterteilung der Komponenten ist nur bedingt möglich, da diese vom Zelldesign abhängen. Gut vergleichbare Bauteile hingegen sind die Zelle und der Interkonnektor. Letzterer trägt um die 10 % an absoluten Kosten zu den Herstellkosten bei, ebenfalls

mit einer fallenden Tendenz bei steigenden Stückzahlen. Der relative Kostenanteil an den Herstellkosten bleibt über die Produktionsvolumina konstant. Trotz der leichten Trends hin zur Kostenreduktion bleiben sie auf gleichem Niveau. Eine detaillierte Betrachtung findet sich in den Kapiteln 4.4.1 und 4.4.2. Zur weiteren Untersuchung wurden die spezifischen Stackkosten nach der Studie des Battelle Memorial Institutes in die einzelnen Kostenpositionen aufgeteilt und in Abbildung 93 visualisiert.

Aus Abbildung 93 ist ersichtlich, dass die absoluten Produktionskosten allein durch eine Skalierung von 1.000 auf 10.000 Stacks um 28 % und um 33 % bei einer Skalierung auf 100.000 Einheiten reduziert werden können. Die restlichen Kosten wie Material- und Lohnkosten bleiben mit steigender Stückzahl fast konstant. Weiterhin kann festgestellt werden, dass die Materialkosten einen konstant hohen Anteil an den spezifischen Herstellkosten des Stacks haben.

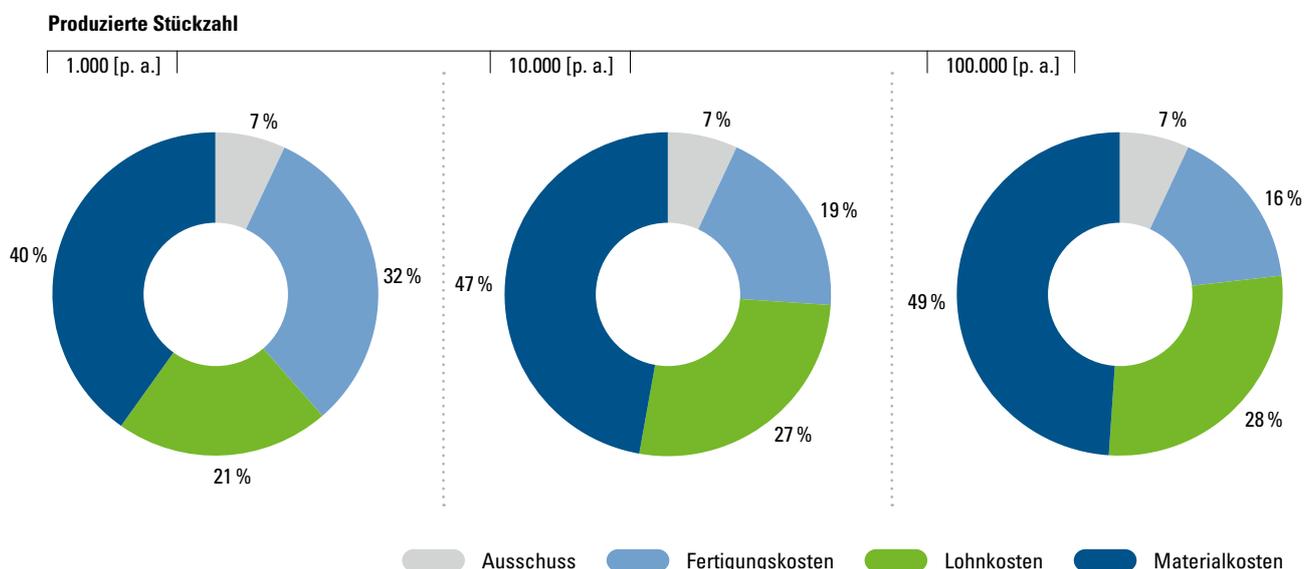
ABBILDUNG 93 Übersicht über die einzelnen Kostenfaktoren nach dem Batelle Memorial Institute



Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mögliche Kostenreduktionspotenziale für SOFC-Stacks bezüglich der Bauteile der Zelle und bezüglich der Skaleneffekte in der skalierten Produktionstechnik zu sehen sind. Die Kostenreduktionspotenziale für SOFC-Stacks sind weniger hoch als für PEMFC-Stacks. Ein mög-

licher Grund dafür ist, dass Skaleneffekte bereits bei geringeren Stückzahlen greifen. Diese Sättigung könnte aber auch an der State-of-the-Art-Fertigungstechnik liegen, die durch eine skalierbarere Technologie ersetzt werden müsste. Eine weitere Möglichkeit

ABBILDUNG 94 Übersicht über die spezifischen Stackkosten bei 1.000, 10.000 und 100.000 Stück p. a. unterteilt nach einzelnen Kostenfaktoren nach dem Batelle Memorial Institute



könnte sein, dass Keramiken und Hochtemperatur-Materialien aufgrund einer anderen Produktionstechnologie weniger gut skalieren.

Auf Basis der obigen Analysen lässt sich feststellen, dass der Hauptkostentreiber für SOFC-Stacks die Zelle ist. Weiterhin verbleiben die relativen Kosten der Komponenten auf einem ähnlichen Niveau. Die Kostenreduktion wird fast ausschließlich durch Reduktion der Produktionskosten aufgrund steigender Stückzahlen erreicht (vgl. Abbildung 93).

Einschätzungen der Industrie

ABBILDUNG 95 Einschätzungen der Industrie hinsichtlich der SOFC



Abweichend von der vorigen Struktur und Vorgehensweise werden in diesem Kapitel die Einschätzungen der Industrie für die gesamte SOFC beschrieben. Die Produktion von SOFC erfolgt zum heutigen Zeitpunkt vor allem für stationäre Anwendungen.

Die Anwendung der SOFC wird vor allem in stationären Systemen mit anfänglich geringer Leistung gesehen. Ziel der Industrie ist es, eine hohe Anzahl von Anlagen in den Markt zur bringen, die entweder physisch, aber auch über eine Cloud-Anbindung virtuell miteinander vernetzt werden können, um größere Gesamtleitungs-klassen zu erreichen. Dies ermöglicht laut einem SOFC-Hersteller den Aufbau einer adaptierbaren und skalier-

baren Produktion von Einzelkomponenten, wodurch die Gesamtkosten des Systems reduziert werden können. Im Rahmen des Hochlaufs werden jährliche Produktionskapazitäten in Höhe von 200 MW angestrebt, die durch Investitionen in Höhe von ca. 500 Mio. € erreicht werden sollen. Bei der Skalierung der Produktion wird der Fokus insbesondere auf die Skalierung der Katalysator- und Keramikproduktion gelegt. Zudem wird bei den BoP-Komponenten stark auf existierende Lieferantenstrukturen zurückgegriffen.

Hinsichtlich der Kostenentwicklung bei der Produktion ist zwischen den Stack- und den BoP-Komponenten zu unterscheiden. Während die Produktionskosten für den Stack mit zunehmender Anzahl an verbauten Zellen linear ansteigen, ist bei den BoP-Komponenten laut einem SOFC Hersteller keine lineare Kostenentwicklung der Bauteile mit steigender Systemleistung zu erwarten. Einsparpotenziale werden vor allem in der technologischen Weiterentwicklung der Zellenfertigung durch die Massenproduktion keramischer Grundstoffe und in der Optimierung der Leistungsdichte gesehen. Eine weitere Möglichkeit zur Kostenreduktion stellt die Verschaltung mehrerer Stacks zu einem Gesamtsystem dar. Hierdurch können Kosteneinsparungen im Bereich der BoP-Komponenten erzielt werden.

Trotz Synergien zu anderen Anwendungen wird ein größerer Teil der Komponenten der SOFC-Systeme laut einem deutschen SOFC-Hersteller neu entwickelt. Insbesondere die thermische Stabilität der Einzelkomponenten stellt eine Herausforderung bei der Entwicklung dar. Im Stack wird der Fokus unter anderem auf die Funktionsfähigkeit des Katalysators über die angestrebte Betriebsdauer von mindestens 8 Jahren Dauerlauf gelegt. Im Bereich der BoP wird verstärkt die thermische Stabilität des Wärmetauschers und der verbauten Gebläse betrachtet.

Die in den betrachteten Studien aufgeführten Kosten werden als nicht darstellbar angesehen. Gleichzeitig spielen die anvisierten Produktionskosten für die Erstindustrialisierung der SOFC nur eine untergeordnete Rolle, da der Fokus in den Anfangsjahren insbesondere auf die marktseitig erzielbaren Preise für stationäre SOFC-Systeme gelegt wird.

Klarer Fokus liegt auf der Erzeugung von elektrischer Energie mit einem elektrischem Wirkungsgrad von über 60%. Zusätzlich kann die Abwärme der Brennstoffzelle wie in einem Blockheizkraftwerk genutzt werden. Somit kann die SOFC ihre Stärke in der Nutzung als dezentrale Stromversorgung zur Unterstützung der Energietransformation ausspielen. Die bivalente Nutzung von Methan und Wasserstoff als Energieträger ermöglicht den frühzeitigen Einsatz der Technologie ohne den direkten Ausbau einer Wasserstoffinfrastruktur.

Nachdem die Herstellkosten des SOFC-Stacks betrachtet und die beiden kostentreibenden Komponenten, der Interkonnektor und die Zelle, identifiziert wurden, werden sie folgend näher analysiert.

4.4.1 Interkonnektor

Die Erkenntnisse aus der Betrachtung der Entwicklung der Stackkosten bestätigen sich für die Produktionskosten des Interkonnektors. In Abbildung 97 ist zu erkennen, dass insbesondere bei geringen Stückzahlen von <10.000 Stacks Kosteneinsparungen durch die Hochskalierung realisiert werden können. Vor allem die Skalierung von wenigen Hundert Stacks hin zu 1.000 Stacks ermöglichen Kostenreduktionen von mehr als 50%. Die Skalierung von der Kleinstserienfertigung hin zu Mittelserienfertigungen mit niedrigen fünfstelligen Stückzahlen ermöglicht theoretische

Kostensenkungen um den Faktor 1,6. Im Vergleich mit den PEM-Systemen setzt eine Kostenreduktion also deutlich eher ein. Anders als bei der Betrachtung des Gesamtstacks liegen die beiden Planwerte in den betrachteten Studien bei großen Stückzahlen weniger weit auseinander. Die Kostendifferenz in den betrachteten Studien beträgt $3 \text{ € / kW}_{\text{brutto}}$. Gründe für die unterschiedlichen Kosten der beiden Interkonnektoren sind unter anderem die verschiedenen Designs und wirtschaftlichen Annahmen. So werden in beiden Studien zwar Pressen zur Umformung betrachtet, allerdings erfolgt die Beschichtung in der Studie des Battelle Memorial Institute mittels Aerosol-Dispersion, wohingegen Scataglini et al. eine PVD-Anlage zugrunde legt. Die beschriebenen Unterschiede in der Produktionstechnik und die unterschiedlichen festgelegten Materialkosten sind ausschlaggebend für den Unterschied von $3 \text{ € / kW}_{\text{brutto}}$.

Auch nach Verlassen der Kleinstserienproduktion hin zur Mittel- und Hochserienproduktion sind Skaleneffekte zu erkennen. Mit zunehmender Stückzahl verringert sich der Einfluss dieser auf die Produktionskosten jedoch. Diese konvergieren bei hohen Stückzahlen gegen Kosten von durchschnittlich $14 \text{ € / kW}_{\text{brutto}}$ (siehe Abbildung 96).

ABBILDUNG 96 Herstellkosten für Interkonnektoren für verschiedene Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)

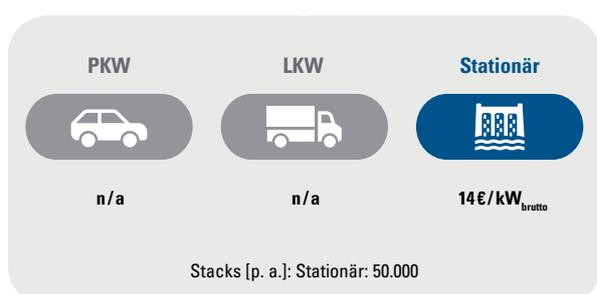
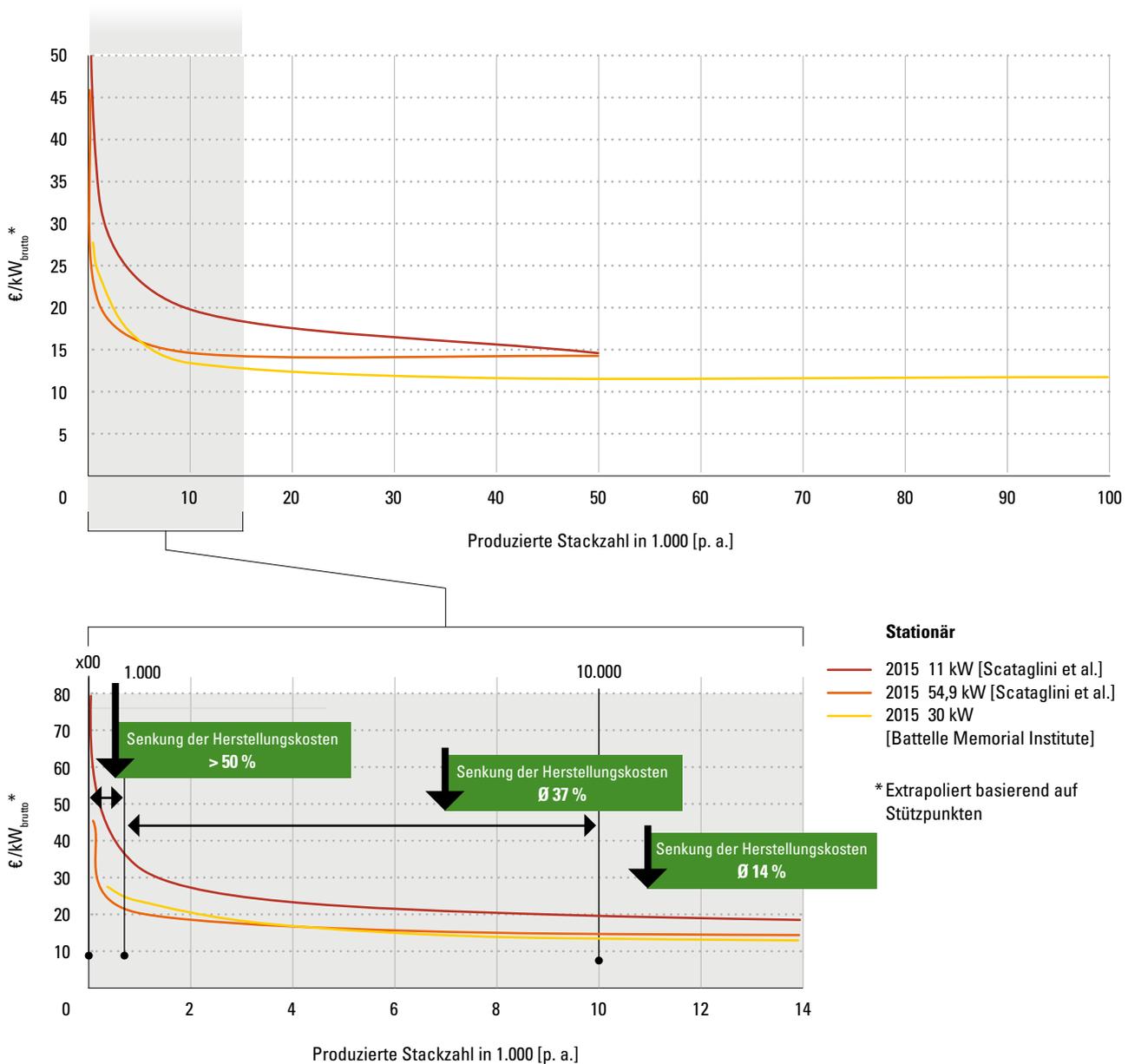


ABBILDUNG 97 Übersicht spezifische Interkonnektor-Kosten



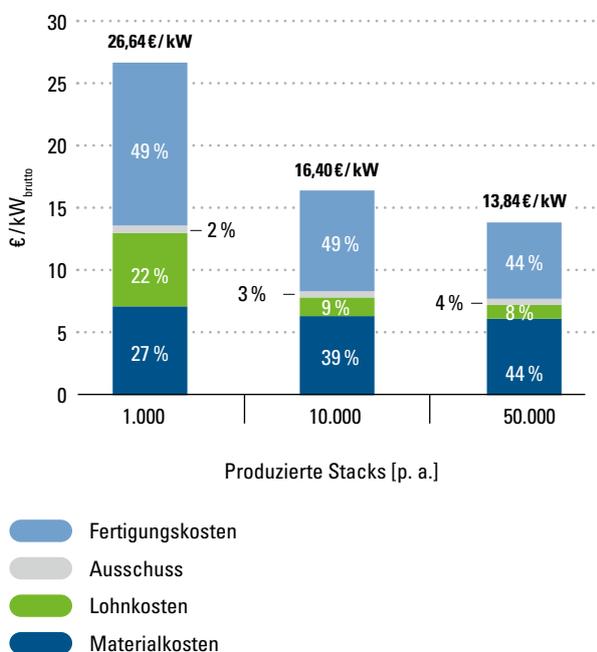
Kostenstruktur

In Abbildung 98 sind die Kostenstrukturen für metallische Interkonnektoren für den Einsatz in stationären Anwendungen abgebildet. Die Gesamtkosten der Produktion setzen sich aus Kosten für Material, Fertigung, Lohn und Ausschuss zusammen.

Die Herstellkosten der Interkonnektoren liegen bei geringen Stückzahlen (1.000 Stück) bei 26,64 €/kW_{brutto}. Mit zunehmendem Produktionsvolumen (50.000 Stück) können die Kosten um bis zu 48 % auf 13,84 €/kW_{brutto} gesenkt werden. Bei geringen Stückzahlen sind die Hauptkostentreiber für die Herstellung die Fertigungskosten mit 49 %, die Materialkosten mit 27 % und die Lohnkosten mit 22 % der gesamten Herstellkosten. Mit zunehmender Effizienz

der Produktionsanlagen steigt der relative Kostenanteil der Materialien auf 44 %, während die absoluten Materialkosten in dieser Kostenbetrachtung nahezu konstant bleiben. Maßgebend für die Kostenreduktion sind, wie bereits in der Stack-Betrachtung beschrieben, die Investitionskosten und die Lohnkosten.

ABBILDUNG 98 **Kostenstruktur eines metallischen Interkonnektors für stationäre Anwendungen**



Als einen der Hauptprozesse bei der Interkonnektor-Herstellung sehen beide Studien die Umformung mittels einer Presse und die anschließende Beschichtung der Interkonnektoren. Insbesondere bei kleinen Stückzahlen (<1.000 Stacks) ist eine vollständig automatisierte Fertigungslinie wenig effizient aufgrund der hohen Investitionskosten der Produktionsmaschinen und der Handling-Lösungen (Robotik). Es ist daher nicht überraschend, dass, wie in Abbildung 98 gezeigt,

bei 1.000 Stacks die erforderlichen Fertigungskosten 49 % der Gesamtkosten ausmachen. Der hohe Kostenanteil ergibt sich aufgrund der nicht ausgelasteten Maschinen. Der hohe Lohnkostenanteil von 22 % erklärt sich durch den geringen Automatisierungsgrad bei einer geringen Produktionsmenge. Mit steigender Stückzahl kann der Grad der Automatisierung und der Parallelisierung deutlich zunehmen. Die Umformung mittels Pressen ermöglicht beispielsweise eine recht einfache Parallelisierung durch Vergrößerung des Presswerkzeuges. So können mit einem Mehrfach-Werkzeug pro Pressenhub mehrere Interkonnektoren umgeformt werden. Die Beschichtungsanlagen, die häufig vor Aufbringung der Schicht ein Vakuum ziehen, können ebenfalls durch größere Chargen pro Werkstück skaliert werden. Durch gestiegene Stückzahlen sinken die Kosten pro Werkstück bezüglich Greifern und Kinematiken sowie ihre Programmierung zur Handhabung der diskreten Bauteile.

Fast konstante Kosten in der Interkonnektorfertigung sind die Materialkosten. Die Materialkosten, hauptsächlich getrieben durch den Stahl und das Beschichtungsedukt, werden scheinbar kaum durch die Stückzahl verringert, sondern können lediglich durch Veränderung des Zelldesigns angepasst werden. Die globale Verfügbarkeit insbesondere des Katalysators ist entgegen der PEMFC hierbei kein Problem.

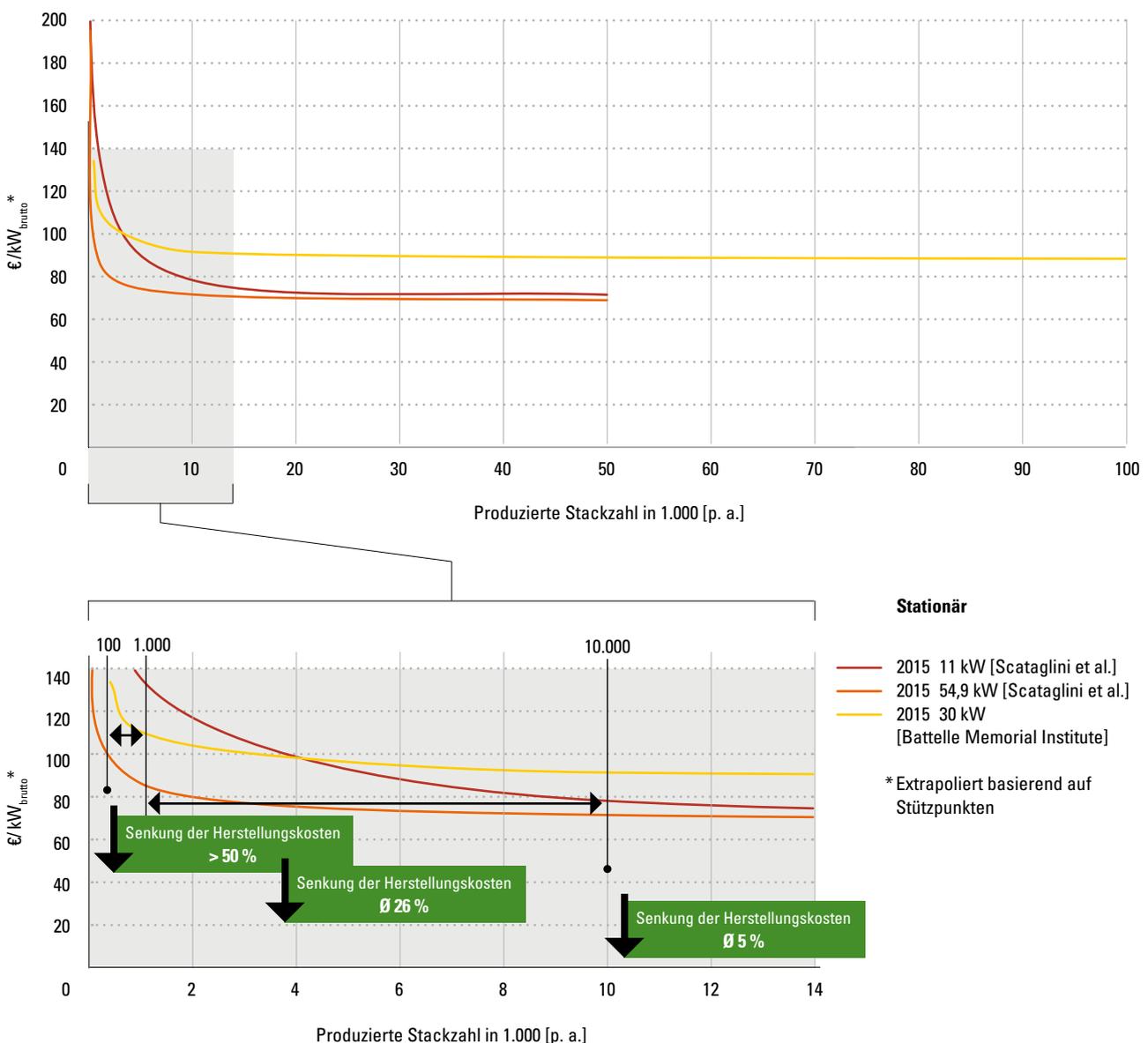
Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Interkonnektor mit steigenden Stückzahlen günstiger pro kW wird. Durch Skalierung reduzierbare Kostenfaktoren sind allerdings nur die Fertigungskosten und die Lohnkosten. Alle anderen Kosten verbleiben absolut auf einem annähernd konstanten Niveau. Neben dem Umformen mit Pressen gibt es andere Technologien, die ebenfalls in Betracht gezogen werden könnten, um hochvolumig Interkonnektoren zu produ-

zieren und dabei Skaleneffekte zu nutzen. Bezüglich der Beschichtung gibt es ebenfalls Möglichkeiten, die eine Reduktion der Fertigungskosten, aber auch eine Reduktion der Materialpreise ermöglichen könnten. Beide Ansätze haben auch Einfluss auf das Zelldesign. Die Fertigungslinien sollten daher immer mit Perspektive auf das gesamte Endprodukt, den SOFC-Stack, angepasst bzw. optimiert werden.

4.4.2 Zelle

Wie bereits bei den Kosten für den Stack gezeigt, sinken die Kosten der Zelle mit steigender Stückzahl. In Abbildung 99 ist zu erkennen, dass insbesondere bei geringen Stückzahlen (<10.000 Stacks) Kosteneinsparungen durch die Hochskalierung realisiert werden können. Der Hochlauf von der Kleinserie (ca. 100 Stacks) hin zur Mittelserie (10.000 Stacks)

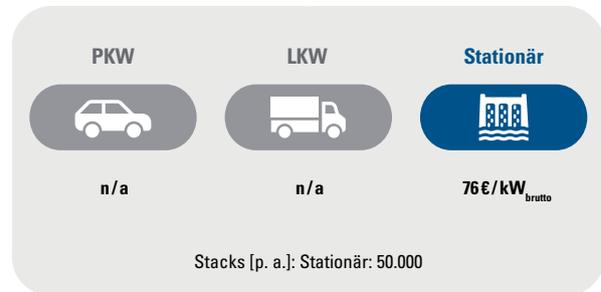
ABBILDUNG 99 Übersicht spezifische Zell-Kosten



ermöglicht eine Herstellkostenreduktion um Faktoren von 1,2 bis 1,4. Im Vergleich mit den PEM-Systemen setzt eine Kostenreduktion also deutlich eher ein, ist aber auch früher gesättigt. Anders als bei der Stack-Betrachtung liegen die beiden Planwerte bei großen Stückzahlen weniger weit auseinander. Die Diskrepanz zwischen den Studien des Battelle Memorial Institutes und Scataglini et al. beträgt $20 \text{ €}/\text{kW}_{\text{brutto}}$. Grund für die unterschiedlichen Kosten der beiden Zellen sind die verschiedenen Designs und die verschiedenen Rahmenbedingungen. Beide Studien betrachten eine anodengestützte Zelle (engl. Anode supported cell (ASC)), nehmen aber abweichende Materialpreise, Materialzusammensetzungen und Schichtdicken an. Produktionstechnologisch unterscheiden sich die beiden Studien insbesondere hinsichtlich der Zykluszeit pro Zelle bzgl. der Nutzung von Siebdruck mit anschließendem Trocknen. Siebdruck ist in der SOFC-Fertigung ein Prozess, der mehrmals wiederholt wird, daher hohen Einfluss auf die Produktionskosten hat. Analog zu den vorherigen Abbildungen wird durch die beiden Studien daher eher ein Bereich definiert, in dem sich die Kosten voraussichtlich einpendeln werden.

Mit Entwicklung hin zu Hochserienfertigung können die Herstellkosten noch immer um den Faktor 5 % gesenkt werden. Die Produktionskosten konvergieren bei hohen Stückzahlen gegen Kosten von durchschnittlich $76 \text{ €}/\text{kW}_{\text{brutto}}$.

ABBILDUNG 100 **Herstellkosten für Zellen verschiedener Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)**

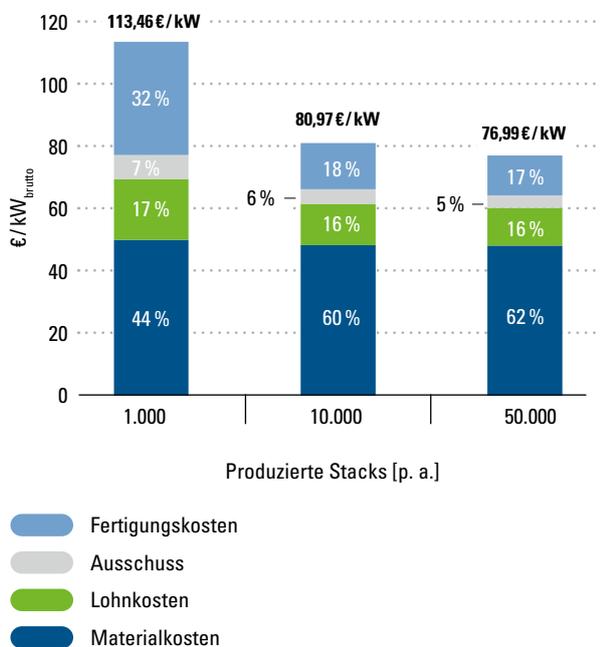


Kostenstruktur

In Abbildung 101 sind die Kostenstrukturen für SOFC-Zellen für den Einsatz in stationären Anwendungen abgebildet. Die Gesamtkosten der Fertigung setzen sich aus Materialkosten, Fertigungskosten, Lohnkosten und Ausschuss zusammen.

Die Gesamtkosten der Zelle liegen in der Kleinserienfertigung (~1.000 Stacks) bei $113,46 \text{ €}/\text{kW}_{\text{brutto}}$. In der Hochserienfertigung (~50.000 Stück) können die Kosten um den Faktor 1,5 auf $76,99 \text{ €}/\text{kW}_{\text{brutto}}$ gesenkt werden. Bei geringen Stückzahlen sind die Hauptkostentreiber für die Herstellung die Fertigungskosten mit 32 %, die Materialkosten mit 44 % und die Lohnkosten mit 17 % der gesamten Herstellkosten. Mit zunehmender Effizienz der Produktionsanlagen steigt der relative Kostenanteil der Materialien auf 60 %, während die absoluten Materialkosten in dieser Kostenbetrachtung nahezu konstant bleiben. Maßgebend für die Kostenreduktion sind, wie bereits für den Stack und die Interkonnektoren gezeigt, die Fertigungskosten und die Lohnkosten.

ABBILDUNG 101 **Kostenstruktur einer Zelle für stationäre Anwendungen**



Die angenommenen Produktionstechnologien der beiden Studien gleichen einander. Besonderen Einfluss auf die errechneten Kosten haben die Siebdruckprozesse und die Sinter- bzw. Trocknungsvorgänge, da sie im Herstellungsprozess der Zelle mehrmals wiederholt werden müssen. Während Scataglini et al. eine Zykluszeit pro Zelle zwischen 9 s und 4 s pro Werkstück annimmt, errechnet das Battelle Memorial Institute diese auf bis zu 20 s pro Werkstück. Teil dieser Zeit sind die Vorbereitung der Maschine, das Handling der Zelle sowie das eigentliche Beschichten. Bezüglich des Trocknens lässt sich keine exakte Berechnung der Zykluszeit bzw. der Trocknergröße und der Bahngeschwindigkeit ableiten. Das Battelle Memorial Institute gibt lediglich an, dass eine Trocknungszeit von 0,675 Minuten zu erwarten ist. Scataglini et al. integriert die Trockner in die Kalku-

lation der Zykluszeit der Siebdrucker. Aufgrund der unterschiedlichen Zykluszeit sind unterschiedlich viele Produktionsmaschinen notwendig, um die gleiche Stückzahl zu produzieren. Weiterhin unterscheiden sich durch die unterschiedliche Anzahl an Maschinen auch die nötigen Werkenden. Unabhängig von den unterschiedlichen Annahmen kommen beide Studien zu dem Ergebnis, dass durch höhere Stückzahlen vorhandene Anlagen besser genutzt werden bzw. weiter automatisierte Produktionen sinnvoller werden und somit geringere Kosten pro kW_{brutto} erzielbar sind. Dieser Skaleneffekt stellt sich durch die Nutzung der Synergien von Parallelisierung ein. Siebdrucker sind in anderen Industrien wie der Halbleiterfertigung bereits sehr stark hochskaliert. Automatisierte Drucker, die speziell auf die Anwendung zugeschnitten sind, können ggf. noch geringere Zykluszeiten als die hier angenommenen von 4 s erreichen. Mit zunehmender Automatisierung und Skalierung nimmt die Anzahl der Werkenden ab und reduziert somit die Lohnkosten pro kW. Neben dem Siebdruck könnten in Zukunft auch andere Beschichtungsverfahren denkbar sein. So könnte das Slurry ähnlich wie in der Batteriefertigung in Rolle-zu-Rolle-Verfahren appliziert werden, um eine noch schnellere und damit kostengünstigere Produktion zu ermöglichen.

Analog zum Interkonnektor werden die Materialkosten mit steigendem Produktionsvolumen auch für die Zelle nur unwesentlich geringer. Eine Möglichkeit, die Materialkosten weiter zu senken, könnte die Produktionstechnologie sein. Sie kann durch neuartige Technologien ggf. Material einsparen. Ein größerer Hebel zur weiteren Kostenreduktion ist wahrscheinlich die Materialforschung, die Katalysatoren effizienter macht und somit die Einsatzmenge verringert.

Fazit

In diesem Kapitel wurden Kostensenkungspotenziale für PEMFC-Systeme und SOFC-Stacks auf Basis von Studien evaluiert und diskutiert. Die daraus ermittelten Soll-Kosten sind den aktuellen Ist-Kosten auf Basis von Aussagen industrieller Akteure gegenübergestellt worden. Übergreifend ist festzustellen, dass es deutliche Kostensenkungspotenziale bei der Skalierung der Produktionszahlen von der Kleinstserie hin zur skalierten Produktion gibt. Bei der PEMFC betrifft das die Stacks, die BoP und die einzelnen Wiederholeinheiten der Stacks wie die BPP und die MEA. Die Kostenreduktion erfolgt durch skalierte Produktionstechnologie, häufig in Zusammenspiel mit sinkenden Materialkosten.

Die Kostenreduktionen der SOFC-Stacks finden im Vergleich zu den PEMFC-Stacks bei niedrigeren Stückzahlen statt. Weiterhin ist die Kostenreduktion der SOFC-Stack fast ausschließlich auf die Fertigungskosten zurückzuführen. Analog zu den Marktbetrachtungen aus Kapitel 2 können SOFC-Systeme also bereits in der Skalierung von Kleinstserien hin zu Mittelserien eine deutliche Kostenreduktion vollziehen und auf diese Art und Weise mit geringeren Investitionen in Produktionstechnologien schneller Skaleneffekte nutzen. Eine weitere Skalierung hin zur Hochserienfertigung böte zwar noch immer gewisse Kostensenkungspotenziale, diese wären aber deutlich geringer als jene der PEMFC. Das liegt vor allem an der verwendeten Produktionstechnologie. Die SOFC-Fertigung basiert hauptsächlich auf

diskontinuierlichen Fertigungsverfahren, wohingegen die PEMFC-Fertigung skalierbarere Prozesse nutzt. Die SOFC-Fertigung könnte also durch neue Produktionstechnologien oder deutlich geringere Materialpreise ihre Herstellkosten verringern. Bezüglich der PEMFC finden die Kostenreduktionen bei höheren Stückzahlen um die 15.000 Einheiten pro Jahr statt. Neben der Reduktion der Kosten durch Skalierung der Fertigung bieten insbesondere bei der MEA-Fertigung niedrigere Materialpreise hohe Kosteneinsparpotenziale.

Mit Bezug zu den aktuellen Ist-Kosten ist industrieseitig der Aufbau von Produktionskapazitäten durch Toyota zu nennen. Als führender Hersteller in der Brennstoffzellentechnologie hat Toyota seit Anfang 2022 Produktionskapazitäten für 30.000 Stacks/Jahr für mobile Anwendungen aufgebaut. Damit hat der erste Hersteller die Schwelle der Produktion von der Kleinstserie zu Kleinserie überwunden und ist in der Lage, Komponenten und Stacks mit einem höheren Automatisierungsgrad zu fertigen. Es ist davon auszugehen, dass weitere Hersteller mit höhervolumigen Produktionslinien nachziehen, sodass eine Kostenreduktion der Ist-Kosten in den nächsten Jahren zu erwarten ist.

Literatur

- Battelle Memorial Institute: Manufacturing Cost Analysis of 100 and 250 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications; 2016
- Department of Energy: Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan – Chapter 3.4 Fuel Cells; 2017
- James, B. et al.: Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update; 2018
- Jörissen, L.; Garche, J.: Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEFC) Stand und Perspektiven. In: Töpler, J.; Lehmann, J. (Eds.): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven. Springer, Berlin; 2017; pp. 263–313
- Kraftfahrtbundesamt: Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängen nach Bundesländern, Fahrzeugklassen und ausgewählten Merkmalen FZ 27; 2022
- Kurzweil, P.: Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung. 3. Auflage. Springer, Wiesbaden; 2016
- Scataglini, R. et al.: A Total Cost of Ownership Model for Solid Oxide Fuel Cells in Combined Heat and Power and Power-Only Applications; 2015
- Thompson, S. et al.: Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook; Journal of Power Sources; 2018
- Wang, Y. et al.: A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. In: Applied Energy; 2011, 88 (4); pp. 981–1007
- Wee, J.-H.: Applications of proton exchange membrane fuel cell systems. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews; 2007, 11 (8); pp. 1720–1738

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die steigende Nachfrage nach emissionsfreien Lösungen für diverse Anwendungen beschäftigt Forschung und Industrie bereits seit einigen Jahren. Vor allem der Mobilitätssektor steht im Fokus der Defossilisierung und auch Elektrifizierung. Neben dem batterieelektrischen Antrieb, der in den letzten Jahren verstärkt im öffentlichen Fokus stand, bietet auch die Brennstoffzellentechnologie die Möglichkeit, den Mobilitätssektor nachhaltig zu dekarbonisieren. Insbesondere die hohe gravimetrische Energiedichte des als Energieträger genutzten Wasserstoffs ermöglicht hohe Fahrzeugreichweiten bei einem gleichzeitig geringen Gewicht des Antriebsstrangs und Energiespeichers. Betrachtet man diesen Vorteil aus der Marktperspektive, stellt man fest, dass Anwendungen mit hohen Reichweitenanforderungen und langen Betriebszeiten das Potenzial haben, eine hohe Marktnachfrage zu generieren. Trotz langjähriger Entwicklungsanstrengungen und ersten Serienfahrzeugen können sich Brennstoffzellenfahrzeuge insbesondere aufgrund der hohen Systemkosten nur bedingt am Markt etablieren. In der durchgeführten Metastudie wurde die Ursache für die hohen Systemkosten analysiert und herausgearbeitet,

welche Kostensenkungspotenziale durch technologische Entwicklungen im Brennstoffzellensystem und durch die Skalierung der Produktion zu erwarten sind.

In der vorliegenden Studie wurden die Protonen-Austausch-Membran-Brennstoffzelle (engl. PEMFC) und die Festoxid-Brennstoffzelle (engl. SOFC) näher betrachtet. Ausgehend von einer Markt Betrachtung wurde der Fokus auf den Aufbau und die Funktion der Brennstoffzellenstacks und der Balance-of-Plant (BoP) der PEMFC gelegt. Neben der funktionalen Komponentenbetrachtung wurden mögliche Produktionslösungen für die Einzelkomponenten vorgestellt. Im Rahmen einer Metaanalyse wurden anschließend die in der Literatur anvisierten Kostenentwicklungen der PEMFC und der SOFC näher beleuchtet und über einen Soll-Ist-Abgleich mit aktuellen Einschätzungen zu den Kostenentwicklungen verglichen. Die Analyse der Kosten erfolgte auf spezifischer Basis, d. h., die Herstellkosten wurden auf die Brutto-Leistung des finalen Brennstoffzellenstacks ($\text{€} / \text{kW}_{\text{brutto}}$) bezogen. Die Ist-Kosten wurden auf Basis von Gesprächen mit der Industrie und eines bereits validierten Kostenmodells sowie der Produktionskosten des Toyota Mirai I ermittelt.

Zunächst wurde in der Marktbetrachtung die Verteilung der abgesetzten Brennstoffzellensysteme im Jahr 2020 nach Anwendungsfall, Weltregion und Brennstoffzellentechnologie betrachtet. Insgesamt wurden ca. 82.000 Brennstoffzellensysteme abgesetzt, wovon 70 % auf den stationären Einsatz entfielen. Die Gesamtleistung aller Anlagen lag bei ca. 1,3 GW, wovon etwa drei Viertel auf mobile Anwendungen zurückzuführen sind. Bei der Betrachtung der Brennstoffzellentechnologien wurde deutlich, dass sowohl hinsichtlich der anteiligen Menge als auch der anteiligen Leistung die PEMFC den größten Anteil an den abgesetzten Systemen hat. Nahezu drei Viertel aller Systeme wurden im Jahr 2020 in Asien verkauft. Bei der fokussierten Betrachtung der Marktentwicklung der PEMFC für Brennstoffzellenfahrzeuge konnte die Prognose eines deutlichen Anstiegs der Absatzzahlen auf ca. 1.600.000 Fahrzeuge für das Jahr 2030 identifiziert werden. Ein Großteil der Fahrzeuge wird dabei im asiatisch-pazifischen Raum verkauft werden.

Im Rahmen einer allgemeinen Technologieeinführung wurden ausgewählte Einzelkomponenten der PEMFC und der SOFC näher analysiert. Ausgehend von einer allgemeinen Funktionsbeschreibung wurde die Funktion der Komponenten und deren Produktion beleuchtet. In einer anschließenden qualitativen Bewertung der Komponenten stellten sich die BPP und die MEA des PEMFC-Stacks und der Verdichter und der DC/DC-Wandler der PEMFC-BoP als die komplexesten und kostenintensivsten Bauteile heraus. Bei der Analyse der Komponenten des SOFC-Stacks wurden die Zelle und der Interkonnektor als die komplexesten und kostenintensivsten Bauteile identifiziert. Bei den Komponenten der SOFC-BoP liegt die höchste Komplexität beim Verdichter und der Strahlpumpe, wohingegen der Reformer bzw. Vorheizer den größten Kostenfaktor darstellen.

Bei der anschließenden detaillierten Kostenanalyse der PEMFC wurde zwischen mobilen und quasistationären Anwendungen unterschieden. Die mobilen Anwendungen teilen sich weiter in Pkw- und Lkw-Anwendungen auf. Insgesamt ist festzustellen, dass die Herstellkosten für stationäre Systeme deutlich über den Kosten für mobil eingesetzte Systeme liegen. Dies liegt vor allem an den Anforderungen an das Gesamtsystem, die einen Einfluss auf die verwendeten Materialien und damit auch auf die Produktionsverfahren und -kosten haben. Unter den mobilen Anwendungen weisen die Lkw-Anwendungen im Vergleich zu den Pkw-Anwendungen erhöhte Herstellkosten auf. Hierbei spielen insbesondere die Lebensduranforderungen an das System eine zentrale Rolle, die sich im Brennstoffzellenstack vor allem im Einsatz des Katalysatormaterials in höheren Mengen widerspiegeln. Insgesamt ist festzustellen, dass bei den aktuell vorliegenden geringen Stückzahlen der Kleinstserienfertigung erhebliche Skalierungseffekte in der Produktion zu erreichen sind. Hauptgrund hierfür sind die Auslastungen der Produktionsmaschinen sowie zusätzlich die Umlage der Entwicklungskosten auf die Anzahl der produzierten Systeme. Die zu erwartenden systemseitigen technologischen Entwicklungen bis zum Jahr 2025 haben hingegen nur einen begrenzten Einfluss auf die Kostenreduktion der PEMFC. Dieses Ergebnis der Kostenanalyse wird auch von Industrievertretern bestätigt. Die für die Massenproduktion (500.000 Stacks p. a.) für Pkw-Anwendungen anvisierten Kosten von 9 bis 15 €/kW_{brutto} werden von Industrievertretern zumeist als ambitioniert, aber realistisch eingestuft.

Als Hauptkomponenten des PEMFC-Stacks wurden die Komponenten Bipolarplatte (BPP) und die Membran-Elektrode-Assembly (engl. MEA) sowie ihre Kostenstrukturen näher betrachtet.

Die größten Kostenfaktoren bei der metallischen BPP stellen die Kosten für die Fertigung, die Beschichtung und die Dichtheitsprüfung dar. Hierbei sind mit zunehmenden Stückzahlen hohe Kostensenkungspotenziale durch Skalierung zu erreichen. Bei der Fertigung hat insbesondere die Umformtechnik bei geringen bis mittleren Stückzahlen einen hohen Einfluss auf die Herstellkosten. Während die Umformung mittels Hydroforming geringere Investitionskosten verursacht, ermöglicht die Umformung im Stanz- bzw. Prägeverfahren ein wirtschaftliches Hochskalieren der Produktion, verursacht durch die hohen Investitionskosten, jedoch hohe spezifische BPP-Kosten bei geringen bis mittleren Stückzahlen. Für die metallische BPP werden bei einer hochskalierten Produktion Kosten zwischen 2,3 und 3,7 €/kW_{brutto} (Pkw) sowie 3,8 und 5,9 €/kW_{brutto} (Lkw) prognostiziert. Nichtmetallische BPPs wurden im Rahmen von stationären Anwendungen betrachtet. Entgegen den Skalierungseffekten bei der metallischen BPP zeigt sich hierbei, dass die betrachteten Compound-BPPs nur ein begrenztes Kostensenkungspotenzial durch Skalierung aufweisen. Bei Stückzahlen von über 20.000 Stacks pro Jahr ist mit Kosten von ca. 39 €/kW_{brutto} zu rechnen. Insbesondere die kostenintensive Fertigung ist hier neben den Materialkosten für einen Großteil der Kosten verantwortlich. Die langen Prozesszeiten in der Produktion und die hohe Auslastung der Produktionsanlagen bei bereits geringen Stückzahlen verhindern hierbei das Einsetzen weiterer Skaleneffekte ohne einen fundamentalen Wechsel der Fertigungs- und Systemtechnologien.

Wesentliche Kostentreiber in der MEA-Produktion sind Material- und Investitionskosten. Bezüglich der mobilen Anwendung gleichen sich die relativen Kostenzusammensetzungen für Lkw und Pkw. Mit steigenden Stückzahlen hin zur (Klein-)Serienproduktion und zur Massenproduktion sinken die Herstellkosten und die Materialkosten. Die mit der Stückzahl sinkenden

Herstellkosten lassen sich durch die in der Literatur zugrunde gelegten Rolle-zu-Rolle-Verfahren begründen. Diese kontinuierlichen Prozesse können leicht mit der Bahngeschwindigkeit skaliert werden. Die stark sinkenden Materialkosten lassen sich hauptsächlich durch die Hochskalierung der PEM-Produktion begründen. So können durch eine Skalierung der Produktion von der Kleinstserie auf das Niveau einer Großserien- bzw. Massenproduktion (~100.000 Stacks p. a.) die Herstellkosten um den Faktor 20 verringert werden. Der Preis des Katalysators sinkt ebenfalls, wenn auch in wesentlich geringerem Umfang. Die Materialkosten in der Massenproduktion werden maßgeblich durch den Katalysator, meist Platin, beeinflusst. Mögliche Kostenreduktionen könnten durch effizientere Aufbringungsverfahren oder neuartige Katalysatoren erzielt werden. Anteilig deutlich höhere Materialkosten sind für stationär genutzte MEAs zu erwarten. Einerseits werden geringere Stückzahlen erwartet, andererseits liegen die Lebensdaueranforderungen und damit der Materialeinsatz deutlich über jenen für mobile Anwendungen. Für MEAs im mobilen Bereich werden in der Massenproduktion Kosten von 5 bis 9 €/kW_{brutto} (Pkw) und 15 bis 20 €/kW_{brutto} (Lkw) erwartet. Für stationäre Anwendungen betragen die Kosten 77 bis 83 €/kW_{brutto}. In Gesprächen mit relevanten Industriepartnern wurde bestätigt, dass insbesondere im Bereich der MEA-Fertigung die Zuliefererlandschaft nicht stark ausgeprägt ist. Dies führt zu mangelndem Wettbewerb und schlussendlich zu erhöhten Kosten. Hinzu kommt, dass die bisher nachgefragten Stückzahlen in Klein- oder Kleinstserien gefertigt werden müssen.

Die Analyse der SOFC-Kosten hat sich auf stationäre Nutzung beschränkt, da die Datenlage zu mobilen Anwendungen nicht ausreichend für eine fundierte Analyse ist. Auf Basis der zugrunde gelegten Studien zeigt sich, dass die Zelle aus Komponentensicht den größten Kostenteil des Stacks ausmacht. Bei den

Kostenstrukturen lässt sich feststellen, dass insbesondere die Materialkosten für die hohen SOFC-Kosten verantwortlich sind. Weiterhin sind die Skaleneffekte anders als bei der PEMFC bei (Klein-)Serienfertigung prozentual größer und bereits nach ~20.000 produzierten Stacks pro Jahr nahezu gesättigt. Die untersuchten Studien gehen bei der Zellproduktion hauptsächlich vom Siebdruckverfahren als Beschichtungstechnologie aus. Die verwendeten Produktionsmaschinen sind als Einzelgeräte bereits hochskaliert durch die Nutzung in Bereichen wie der Halbleiterassemblierung. Eine Skalierung erfolgt daher nur durch die Anschaffung weiterer Siebdruckmaschinen und führt daher bereits bei geringen Stückzahlen zu geringen Kostenreduktionen. Im Mittel errechnen die beiden untersuchten Studien einen Preis von 155 €/kW_{brutto} für einen SOFC-Stack in der industriellen Produktion bzw. 168 €/kW_{brutto} in der (Klein-)Serienfertigung (10.000 Stacks p. a.).

Die Herstellkosten des metallischen Interkonnektors werden hauptsächlich getrieben durch Materialkosten und die initialen Investitionen in die Produktionsmaschinen. Mit steigenden Kosten sinken die Fertigungskosten durch fortschreitende Automatisierung. Die absoluten Materialkosten stagnieren, da keine Kostenreduktion durch größere Abnahmemengen erwartet wird. Der wesentliche Prozessschritt ist analog zu den PEMFC BPP die Umformung des Interkonnektors. Im Rahmen einer industriellen Produktion werden für den Interkonnektor Kosten von 14 €/kW_{brutto} erwartet.

Die deutlich teurere Komponente der SOFC ist mit ~40 % der Gesamtkosten die Zelle. Die Herstellkosten der Zelle werden analog zum Interkonnektor hauptsächlich durch Materialkosten und Investitionskosten bestimmt. Wie für den Interkonnektor verringern sich die Materialkosten mit steigender Stückzahl nicht. Ein wesentlicher Schritt in der Zellenfertigung ist das Aufbringen verschiedener Schichten mittels Siebdruck.

Eine Skalierung von Siebdruck ist bedingt möglich, daher stagnieren die Produktionskosten bei steigenden Stückzahlen. Eine weitere Kostenreduktion in der Anlagenbeschaffung könnte durch neue Produktionstechnologien erzielt werden. Aus Sicht der Industrie sind die theoretischen Kosten nicht erreichbar. Ein wichtiger Schritt ist die Skalierung der Produktion über Hemmnisse der aktuellen Fertigungstechnologien hinaus.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Metastudie können komponentenspezifisch detaillierte Kostenbetrachtungen zur Analyse der Unterschiede zwischen den Soll- und Ist-Kosten durchgeführt werden. Diese Erkenntnisse können der produzierenden Industrie wertvolle Hinweise darüber liefern, welche Komponenten und Produktionsschritte Potenziale für weitere Kostensenkungen durch gezielte Entwicklungen aufweisen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das größte Potenzial in der Kostenreduktion durch Skalierung der Produktion hin zu einer Serien- und Massenproduktion liegt. Durch eine Steigerung der Stückzahlen lassen sich Materialkosten und vor allem die Fertigungskosten senken. Abhängig von den Komponenten und Systemen erfolgt eine Kostensenkung um Faktoren zwischen 10 und 20. Die technologische Weiterentwicklung bestehender Systemtechnologien hingegen hat kurzfristig einen deutlich kleineren Einfluss auf die Kostenstrukturen, ist aber mittel- und langfristig trotzdem notwendig, um die Wettbewerbsfähigkeit, z. B. gegenüber konkurrierenden Antriebssystemen, zu gewährleisten. Die Kostenreduktion in der Produktion kann jedoch nur ihre Wirkung entfalten, wenn die Skalierung auch marktseitig umgehend vorangetrieben wird und Absatzmärkte für Komponentenzulieferer und OEMs kurzfristig geschaffen werden. Die Schaffung einer Planungssicherheit für die Industrie in Form von beispielsweise Großaufträgen ist für Investitionen in

hochskalige Produktionstechnologien und die Senkung der Herstellkosten erforderlich. Zusätzlich wäre es vorteilhaft, Anreize für die Zuliefererindustrie zu schaffen, um hochratenfähige Produktionssysteme zu entwickeln, welche die Entwicklungsrisiken und Kosten insbesondere für KMU abmildern. Aufbauend auf dieser Metastudie können daher technologische Analysen erarbeitet werden, welche die jeweiligen Herausforderungen der Produktion verschiedener Komponenten aus Stack und BoP detailliert betrachten und quantifizieren.

Der in der Nationalen H₂-Strategie der Bundesregierung verfolgte Markthochlauf für Wasserstofftechnologien hat bereits für zahlreiche Initiativen und Entwicklungen, insbesondere bei den relevanten zuliefernden Unternehmen, gesorgt. So steigt die Anzahl der Unternehmen, die Einzelkomponenten für den Stack oder die BoP entwickeln und anbieten, stetig an. Hierbei werden häufig bestehende technologische und materialseitige Lösungen für die Wasserstofftechnologie angepasst. Bei den Endanwendern ist aktuell ein zögerliches Verhalten bezüglich eines Umstiegs auf Wasserstofftechnologien zu erkennen. Neben den hohen Kosten liegt dies vor allem an fehlenden Standardisierungen und Normierungen, z. B. hinsichtlich Toleranzen oder Leistungsanforderungen. Aus der Perspektive der Brennstoffzellenhersteller und Endanwender ist es daher insbesondere wichtig, Kooperationen mit möglichen Lieferanten aufzubauen und notwendige Standards und Normen gemeinsam zu erarbeiten. Eine umfängliche Fertigung für einen Stack mit hoher Wertschöpfungstiefe oder das gesamte System ist bisher nur bei wenigen Unternehmen in Planung. Insbesondere deutsche Firmen sollten daher proaktiv Handelsbeziehungen aufnehmen, gestützt durch Förderprogramme.

Die Fähigkeiten für eine Skalierung der Brennstoffzellenfertigung in Deutschland liegt verteilt auf den Schultern vieler Unternehmen. Jetzt gilt es, vorhandenes Know-how auf Wasserstofftechnologien zu übertragen und in eine Hochvolumen-Produktion im Markthochlauf umzusetzen.

6 Anhang

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1	Anteilige Menge der abgesetzten Brennstoffzellen im Jahre 2020 aufgeteilt nach portabilem, stationärem und mobilem Einsatz (links: nach Stückzahl; rechts: nach Leistung)	10
ABBILDUNG 2	Anteil der abgesetzten Brennstoffzellen im Jahre 2020 aufgeteilt nach Weltregionen und Stückzahl (links: nach Stückzahl; rechts: nach Leistung)	11
ABBILDUNG 3	Anteil der abgesetzten Brennstoffzellen im Jahre 2020 aufgeteilt nach Brennstoffzellentechnologie (links: nach Stückzahl; rechts: nach Leistung)	12
ABBILDUNG 4	Entwicklung der FCEV-Absätze auf Basis der Flottenziele der betrachteten Regierungen	13
ABBILDUNG 5	Anzahl an zugelassenen FCEV nach Weltregion	14
ABBILDUNG 6	Entwicklung des SOFC-Marktes zwischen 2016 und 2020	15
ABBILDUNG 7	Übersicht über verschiedene Brennstoffzellentypen	18
ABBILDUNG 8	Vereinfachter Aufbau eines PEMFC-Systems	20
ABBILDUNG 9	Schematische Darstellung eines PEMFC-Stacks	21
ABBILDUNG 10	Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen einer metallischen Bipolarplatte mit umgeformten Strömungsfeld	24
ABBILDUNG 11	Ein mögliches Prozessschema für die Produktion von metallischen Bipolarplatten	25
ABBILDUNG 12	Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen einer nichtmetallischen GPC-Bipolarplatte	29
ABBILDUNG 13	Prozesskette zur Herstellung von Grafit-Polymer-Verbund BPP	30
ABBILDUNG 14	Schematische Darstellung des Pressformprozesses für Formmassen (BMC, engl. Bulk Molding Compound) als Pulver (links), als Puck (Mitte) und als Flächenhalbzeug (rechts)	30
ABBILDUNG 15	Aufbau einer PEM-Membran-Elektroden-Einheit	32
ABBILDUNG 16	Exemplarische Darstellung der mit katalytischer Tinte beschichteten Protonenaustauschmembran	33
ABBILDUNG 17	Exemplarische Darstellung der in einen Dichtungsrahmen eingeklebten und mit katalytischer Tinte beschichteten Protonenaustauschmembran	33

ABBILDUNG 18	Exemplarische Darstellung der in einen Dichtungsrahmen eingeklebten und mit katalytischer Tinte beschichteten Protonenaustauschmembran mit aufgebrachtem Gasdiffusionslayer	33
ABBILDUNG 19	Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen einer Protonenaustauschmembran	34
ABBILDUNG 20	Darstellung und qualitative Bewertung der katalytischen Tinte	35
ABBILDUNG 21	Übersicht der verschiedenen produktionstechnologischen Möglichkeiten der Aufbringung der atalytischen Schicht	36
ABBILDUNG 22	Mögliche Fertigungsverfahren zur Aufbringung der katalytischen Schicht	37
ABBILDUNG 23	Darstellung des Materials für einen Dichtungsrahmen, qualitative Bewertung und Kennzahlen des Dichtungsrahmens	38
ABBILDUNG 24	Darstellung des Materials für die Gasdiffusionslage, qualitative Bewertung und Kennzahlen einer Gasdiffusionslage	39
ABBILDUNG 25	Darstellung und qualitative Bewertung einer Dichtung	41
ABBILDUNG 26	Darstellung und qualitative Bewertung eines Stromkollektors	42
ABBILDUNG 27	Darstellung und qualitative Bewertung einer Endplatte	43
ABBILDUNG 28	Zusammenfassung der qualitativen Bewertungen der PEMFC-Stack Komponente	45
ABBILDUNG 29	Übersicht des Gesamtsystems PEMFC mit Subsystemen und ihren Kreisläufen	46
ABBILDUNG 30	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Rezirkulationsgebläses	48
ABBILDUNG 31	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen einer Strahlpumpe	49
ABBILDUNG 32	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Injektors	50
ABBILDUNG 33	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Befeuchters	53
ABBILDUNG 34	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Verdichters	54
ABBILDUNG 35	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Wärmetauschers	56
ABBILDUNG 36	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Ionenfilters	57
ABBILDUNG 37	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines DC/DC-Wandlers	59
ABBILDUNG 38	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Verdichters	61
ABBILDUNG 39	Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Wasserstoffdrucktanks	62
ABBILDUNG 40	Zusammenfassung der qualitativen Bewertungen der BoP-Komponenten der PEM FC	63
ABBILDUNG 41	Schematische Darstellung eines SOFC-Stacks	66
ABBILDUNG 42	Ein mögliches Prozessschema für die Produktion von metallischen Interkonnektoren	67
ABBILDUNG 43	Schematische Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines metallischen Interkonnektors	67
ABBILDUNG 44	Schematische Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen einer Zelle (ASC)	68
ABBILDUNG 45	Prozessschema der ASC-Produktion	70
ABBILDUNG 46	ESchematische Darstellung, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Meshs	72
ABBILDUNG 47	Ein mögliches Prozessschema für die Produktion von metallischen Meshs	73

ABBILDUNG 48	Qualitative Bewertung und Kennzahlen einer Glasdichtung	73
ABBILDUNG 49	Mögliches Prozessschema für die Produktion von Glasdichtungen	74
ABBILDUNG 50	Qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Rahmens	74
ABBILDUNG 51	Qualitative Bewertung und Kennzahlen einer Endplatte	75
ABBILDUNG 52	Zusammenfassung der qualitativen Bewertungen der SOFC-Stack-Komponente	76
ABBILDUNG 53	Mögliches Prozessschema für die Produktion von Glasdichtungen	78
ABBILDUNG 54	Qualitative Bewertung und Kennzahlen der Entschwefelung	79
ABBILDUNG 55	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Reformers / Vorheizers	80
ABBILDUNG 56	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Verdichters	82
ABBILDUNG 57	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Nachbrenners	84
ABBILDUNG 58	Funktionsprinzip, qualitative Bewertung und Kennzahlen eines Kathodenluftheizers	85
ABBILDUNG 59	Zusammenfassung der qualitativen Bewertungen der BoP Komponenten der SOFC	86
ABBILDUNG 60	Qualitative Bewertung der PEMFC- und SOFC-Stack-Komponenten	89
ABBILDUNG 61	Qualitative Bewertung der BoP- Komponenten der PEMFC und der SOFC	89
ABBILDUNG 62	Betrachtete Studien und Detaillevel der durchgeführten Metastudie	92
ABBILDUNG 63	Übersicht spezifische Stackkosten	94
ABBILDUNG 64	Herstellkosten für PEMFC-Stacks für verschiedene Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)	94
ABBILDUNG 65	Kostenstruktur des PEMFC-Stacks für Pkw-Anwendungen	95
ABBILDUNG 66	Kostenstruktur des PEMFC-Stacks für Lkw-Anwendungen	96
ABBILDUNG 67	Kostenstruktur des PEMFC-Stacks für stationäre Anwendungen	97
ABBILDUNG 68	Einschätzungen der Industrie bezüglich PEMFC-Stacks	98
ABBILDUNG 69	Herstellkosten für BPPs für verschiedene Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)	100
ABBILDUNG 70	Übersicht spezifische BPP-Kosten	101
ABBILDUNG 71	Kostenstruktur einer metallischen PEMFC BPP für Pkw- und Lkw-Anwendungen	103
ABBILDUNG 72	Kostenstruktur einer grafitischen PEMFC BPP für (quasi-)stationäre Anwendungen	104
ABBILDUNG 73	Einschätzungen der Industrie bezüglich PEMFC-BPP	105
ABBILDUNG 74	Übersicht spezifische MEA-Kosten	106
ABBILDUNG 75	Herstellkosten für MEAs für verschiedene Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)	107
ABBILDUNG 76	Kostenstruktur einer MEA für Pkw- und Lkw-Anwendungen	108
ABBILDUNG 77	Kostenstruktur einer MEA für stationäre Anwendungen	110
ABBILDUNG 78	Übersicht spezifische MEA-Kosten	111
ABBILDUNG 79	Übersicht spezifische GDL-Kosten	112

ABBILDUNG 80	Herstellkosten für GDLs für verschiedene Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)	113
ABBILDUNG 81	Kostenstruktur einer PEMFC GDL für Pkw-Anwendungen	113
ABBILDUNG 82	Übersicht spezifische BoP-Kosten	115
ABBILDUNG 83	Herstellkosten für die BoP für verschiedene Anwendungen (alle Betrachtungsjahre)	116
ABBILDUNG 84	Kostenstruktur der PEMFC-BoP für Pkw- und Lkw-Anwendungen	117
ABBILDUNG 85	Kostenentwicklung der BoP-Luftverdichtung einer PEMFC bis zu einer Stückzahl von 500.000 [p. a.]	118
ABBILDUNG 86	Einschätzungen der Industrie hinsichtlich des Luftverdichters	119
ABBILDUNG 87	Kostenentwicklung des BoP-Wasserrückgewinnungskreislaufs einer PEMFC bis zu einer Stückzahl von 500.000 [p. a.]	120
ABBILDUNG 88	Einschätzungen der Industrie hinsichtlich des Befeuchters	121
ABBILDUNG 89	Übersicht über die spezifischen Stackkosten	123
ABBILDUNG 90	Kostenpositionen für SOFC-Stacks, aufgeteilt in Produktionskosten, Lohnkosten und Materialkosten nach Scataglini et al. und dem Battelle Memorial Institute	124
ABBILDUNG 91	Herstellkosten für SOFC-Stacks für verschiedene Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)	124
ABBILDUNG 92	Einschätzungen der Industrie hinsichtlich des Befeuchters	125
ABBILDUNG 93	Übersicht über die einzelnen Kostenfaktoren nach dem Batelle Memorial Institute	126
ABBILDUNG 94	Übersicht über die spezifischen Stackkosten bei 1.000, 10.000 und 100.000 Stück p. a. unterteilt nach einzelnen Kostenfaktoren nach dem Batelle Memorial Institute	126
ABBILDUNG 95	Einschätzungen der Industrie hinsichtlich der SOFC	127
ABBILDUNG 96	Herstellkosten für Interkonnektoren für verschiedene Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)	128
ABBILDUNG 97	Übersicht spezifische Interkonnektor-Kosten	129
ABBILDUNG 98	Kostenstruktur eines metallischen Interkonnektors für stationäre Anwendungen	130
ABBILDUNG 99	Übersicht spezifische Zell-Kosten	131
ABBILDUNG 100	Herstellkosten für Zellen verschiedener Anwendungen bei hohen Stückzahlen (alle Betrachtungsjahre)	132
ABBILDUNG 101	Kostenstruktur einer Zelle für stationäre Anwendungen	133

Tabellenverzeichnis

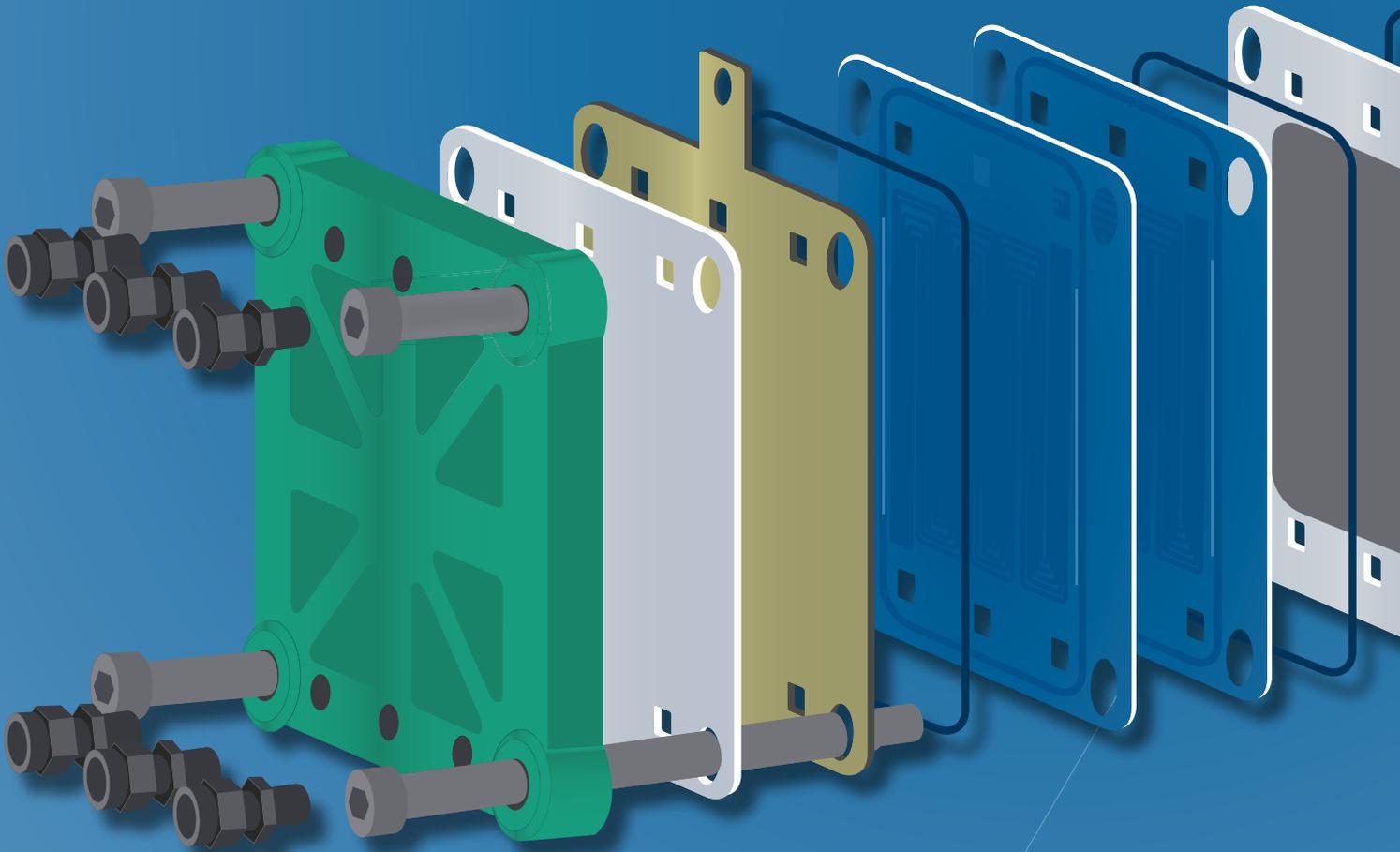
TABELLE 1	Übliche BPP-Materialien und ihre Eigenschaften	23
TABELLE 2	Umformprozesse für metallische Bipolarplatten	25
TABELLE 3	Schneidprozesse für metallische Bipolarplatten	26
TABELLE 4	Fügeprozesse für metallische Bipolarplatten	27
TABELLE 5	Beschichtungstechnologien für metallische Bipolarplatten	28
TABELLE 6	Charakteristika verschiedener Rezirkulationssysteme	51
TABELLE 7	Verschiedene Anwendungen einer APU	64
TABELLE 8	Charakteristika von SOFC-Systemen	65
TABELLE 9	Auszug einiger Parameter zur Berechnung der Herstellkosten nach Scataglini et al. und dem Battelle Memorial Institute	124

Abkürzungen

AFC	Alkalische Brennstoffzelle (engl. Alkaline Fuel Cell)
APU	Hilfsstromaggregat (engl. Auxiliary Power Unit)
ASC	Anodentragene Zelle (engl. Anode Supported Cell)
BL	Basisschicht (engl. Base-Layer)
BoP	Balance-of-Plant
BPP	Bipolarplatte
CGO	Cerium Gadolinium Oxid
CHP	Kraft Wärme Kopplung (engl. Combined Heat and Power)
CL	Katalytische Schicht (engl. Catalyst Layer)
CVD	chemische Gasphasenabscheidung (engl. Chemical Vapour Deposition)
DMFC	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (engl. Direct Methanol Fuel Cell)
DOE	Department of Energy
ePTFE	expandiertes Polytetrafluorethylen
ESC	Elektrolytgetragene Zelle (engl. Electrolyte Supported Cell)
EU	Europäische Union
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (engl. Fuel Cell Electric Vehicle)
FEP	fluoriertes Ethylenpropylen
FVK	faserverstärkter Kunststoff
GDL	Gasdiffusionsschicht (engl. Gas-Diffusion-Layer)

GPC	Graphite-Polymer-Composite
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
IPT	Institut für Produktionstechnologie
IR	Infrarot
Lkw	Lastkraftwagen
LSCF	Lanthan-Strontium-Cobalt-Ferrit
MCFC	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (engl. Molten Carbonate Fuel Cell)
MEA	Membranelektrodenanordnung (engl. Membrane-Electrode-Assembly)
MEA_{3L}	3 schichtige MEA
MEA_{7L}	7 schichtige MEA
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
MPL	Mikroporöse Schicht (engl. Micro-Porous-Layer)
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization
NEV	New Energy Vehicle
PAFC	Phosphorsäure-Brennstoffzelle (engl. Phosphoric Acid Fuel Cell)
PEM	Polymerelektrolytmembran (engl. Polymer Electrolyte Membrane)
PEMFC	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (engl. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)
PEN	Polyethylenphthalat
PFSA	Perfluorsulfonsäure
Pkw	Personenkraftwagen
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVD	physikalische Gasphasenabscheidung (engl. Physical Vapour Deposition)
PVDF	Polyvinylidendifluorid
SOFC	Festoxid-Brennstoffzelle (engl. Solid Oxide Fuel Cell)
YSZ	yttriumstabilisierten Zirkoniumoxid
z. B.	zum Beispiel

H₂



H₂