

Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen- Industrie in Baden-Württemberg



Diese Studie wurde beauftragt durch das

**Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft des
Landes Baden-Württemberg**

Die Studie wurde finanziert aus Mitteln des

**Strategiedialogs Automobilwirtschaft
Baden-Württemberg**

Die Erstellung der Studie wurde begleitet durch

**e-mobil BW GmbH – Landesagentur für
neue Mobilitätslösungen und Automotive
Baden-Württemberg**

Veröffentlichung: Februar 2020

© ROLAND BERGER GMBH. ALLE RECHTE VORBEHALTEN.

Impressum

ROLAND BERGER GMBH

Sederanger 1
80538 München
Deutschland
+49 89 9230-0

Kontakt: Uwe Weichenhain
uwe.weichenhain@rolandberger.com

Autoren

Uwe Weichenhain, Simon Lange,
Jan Koolen, Anja Benz, Sandra Hartmann
(IPE Institut für Politikevaluation GmbH),
Daniela Heilert (IPE Institut für Politik-
evaluation GmbH), Sandra Henninger,
Tom Kallenbach



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT



**strategiedialog
automobilwirtschaft BW**



e-mobil ^{BW}
Landesagentur für neue Mobilitätslösungen
und Automotive Baden-Württemberg

Inhalt

1	Einleitung	8
2	Energie der Zukunft? – Die zukünftige Rolle von Wasserstoff und Brennstoffzellen	14
	2.1 Wasserstoff und Brennstoffzellen im zukünftigen Energiesystem.....	15
	2.2 Kostenentwicklung und Wirtschaftlichkeit der Technologie	22
3	Marktentwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie	42
	3.1 Globale Marktentwicklung.....	45
	3.2 Marktentwicklung in Europa	56
	3.3 Marktentwicklung in Deutschland	63
	3.4 Marktentwicklung in Baden-Württemberg.....	67
4	Stand der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg.....	72
	4.1 Marktüberblick und Akteure	74
	4.2 Wettbewerbsfähigkeit und Perspektiven.....	88
5	Prognose des Umsatz-, Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotenzials in Baden-Württemberg	108
6	Herausforderungen für die Marktentwicklung und Lösungsansätze	118
7	Handlungsempfehlungen.....	128
	Abbildungsverzeichnis	137
	Literaturverzeichnis.....	146

Zusammenfassung

Die Begrenzung des Klimawandels durch Reduzierung der weltweiten CO₂-Emissionen ist eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Die Erreichung der Klimaziele der EU, Deutschlands und des Landes Baden-Württemberg erfordert einen tiefgreifenden Umbau unserer Energiesysteme und eine vollständige Umstellung auf emissionsfreie Technologien in allen Energieverbrauchssektoren. Wasserstoff und Brennstoffzellen werden dabei zukünftig eine zentrale Rolle einnehmen und zu einer der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Die Umwandlung von regenerativ erzeugtem Strom in Wasserstoff und dessen Nutzung als Energieträger unterstützt die großflächige Nutzung erneuerbarer Energie und macht diese flexibel und langfristig speicher- und transportierbar. Daneben kann "grüner" Wasserstoff zur Energieerzeugung mit Brennstoffzellen und als Rohstoff in allen wesentlichen Energieverbrauchssektoren, von der Mobilität über die industrielle Nutzung bis hin zur Wärme- und Stromerzeugung für Gebäude, als treibhausgasfreier Energielieferant genutzt werden. Dabei kann die Nutzung von Wasserstoff vor allem solche Anwendungsbereiche dekarbonisieren, für die ansonsten keine anderen realistischen Technologiealternativen zur Verfügung stehen, beispielsweise im Schwerlastverkehr, in der industriellen Energie- und Rohstoffnutzung sowie in Teilen des Wärmesektors.

Die weltweite Nachfrage nach bislang vor allem konventionell erzeugtem Wasserstoff hat sich seit 1975 mehr als verdreifacht und wächst kontinuierlich weiter. Mit der Ausweitung der Produktion von regenerativ hergestelltem Wasserstoff und von dessen Nutzung als Energiequelle in allen Energieverbrauchssektoren erwarten internationale und baden-württembergische Unternehmen und Branchenexperten bis 2030 und vor allem danach weltweit ein signifikantes Marktwachstum für Wasserstoff und Brennstoffzellen. Dabei hält der bereits heute kontinuierlich wachsende Markt, für den langfristig eine Entwicklung zum globalen Massenmarkt erwartet wird, signifikante wirtschaftliche Potenziale für deutsche und baden-württembergische Unternehmen bereit. Schon 2030 könnten europäische Unternehmen Umsätze von bis zu 65 Mrd. EUR in Europa und weiteren ca. 65 Mrd. EUR auf den weltweiten Märkten im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen erzielen. Hierfür ist insbesondere eine starke Positionierung auf den internationalen Leitmärkten in China, Japan und Südkorea, aber auch in den USA und Europa erforderlich, um die Exportstärke der einheimischen Unternehmen mit innovativen und technisch ausgereiften Produkten für die Erschließung wirtschaftlicher Potenziale zu nutzen. Neben den Heimatmärkten in Baden-Württemberg und Deutschland spielen dabei vor allem die internationalen Märkte für die einheimische Industrie eine zentrale Rolle.

Mit dem zukünftig erwarteten Marktwachstum wird auch eine signifikante Reduktion der heutigen Kosten einhergehen, die die Technologie zunehmend wirtschaftlich wettbewerbsfähig machen wird. Kostensenkungspotenziale, wie sie in den letzten Jahren bei der Batterieherstellung realisiert wurden, konnten bis heute in Bezug auf die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie erst in geringem Maße genutzt werden, sodass zukünftig entlang der gesamten Wertschöpfungskette von deutlich reduzierten Technologiekosten ausgegangen werden kann. Lokale Unternehmen müssen sich daher frühzeitig ausreichende Marktanteile sichern, um Skaleneffekte zu realisieren und Kosten senken zu können und mit der internationalen Konkurrenz wettbewerbsfähig zu bleiben.

Mehr als 90 im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen tätige Unternehmen sowie 18 universitäre und außeruniversitäre Forschungsinstitutionen mit Standorten in Baden-Württemberg decken bereits heute die gesamte Wertschöpfungskette von Wasserstoff und Brennstoffzellen in unterschiedlichen Integrationsstufen ab und bilden damit einen substanziellen Anteil der in Deutschland und Europa in diesem Bereich aktiven Unternehmen und Institutionen. Die baden-württembergische Akteurslandschaft im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen verfügt neben langjähriger Erfahrung in Forschung und Entwicklung über eine hohe technologische Kompetenz und Innovationskraft. Damit ist der Standort sehr gut positioniert, um den erwarteten nationalen und internationalen Markthochlauf der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie mitzugestalten und davon zu profitieren.

Um zukünftige Wertschöpfungspotenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie zu nutzen und im internationalen Wettbewerb konkurrenzfähig zu bleiben, wird es in den nächsten zwei bis fünf Jahren entscheidend sein, vorhandene Kompetenzen durch Investitionen weiter auf- und auszubauen.

Bedingt durch die Wirtschaftsstruktur des Bundeslandes liegt eine besondere Stärke der baden-württembergischen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie im Bereich der Anwendungen für Mobilität und Verkehr mit vielen vor Ort ansässigen Zulieferern und OEMs. Während die lokalen Unternehmen in der Vergangenheit teilweise zu den Pionieren der Branche gehörten, ist die internationale Konkurrenz in den letzten Jahren zunehmend stärker geworden und heute gehören andere europäische und internationale Unternehmen zu den Marktführern, vor allem im Bereich der OEMs. Um zukünftige Wertschöpfungspotenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie zu nutzen und zukünftig im internationalen Wettbewerb konkurrenzfähig zu bleiben, wird es in den nächsten zwei bis fünf Jahren entscheidend sein, vorhandene Kompetenzen durch Investitionen weiter auf- und auszubauen. Die internationale Konkurrenz hat in den letzten Jahren stark aufgeholt und verfolgt derzeit teilweise deutlich ambitioniertere Investitions- und Geschäftserweiterungspläne im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen als einheimische Unternehmen, vor allem im Bereich der OEMs. Das Beispiel der Batterietechnologie, bei der Europa gegenüber den asiatischen Leitmärkten den Anschluss an die Technologieentwicklung sowie seine Marktposition verloren hat, zeigt deutlich, wie wichtig es ist, rechtzeitig in Zukunftstechnologien zu investieren und Marktanteile frühzeitig zu sichern.

Gelingt es dem Standort, sich zukünftig seiner heutigen Wirtschaftsleistung entsprechende Anteile am sich entwickelnden globalen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Markt zu sichern, könnten für die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg 2030 ein Umsatz von bis zu 9 Mrd. EUR, eine Bruttowertschöpfung von bis zu 2,3 Mrd. EUR sowie damit verbunden ca. 16.500 Arbeitsplätze entstehen, vor allem im Mobilitätsbereich. Damit könnte die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit des Standorts leisten, der im besonderen Maße vom Wandel der Automobilindustrie betroffen ist. Langfristig bestehen noch weitaus größere Potenziale.

Für die Realisierung der wirtschaftlichen und weiteren Potenziale der Technologie sind unmittelbar und in den nächsten Jahren zielgerichtete Maßnahmen aller relevanten Stakeholder notwendig. Dabei ist es zum einen wichtig, auf europäischer und Bundesebene in Deutschland für die Schaffung politischer und regulatorischer Rahmenbedingungen zu sorgen, die den weiteren Ausbau der Nutzung der Technologie nachhaltig unterstützen. Zum anderen sollten sich Landesregierung, Unternehmen, Forschungsinstitutionen sowie Städte, Kommunen und weitere Stakeholder im Land Baden-Württemberg aktiv für die weitere Entwicklung der Technologie einsetzen und selbst tätig werden. Hierbei ergeben sich aus Sicht der Studie für die Stakeholder in Baden-Württemberg vor allem die folgenden Handlungsempfehlungen:

1. **Entwicklung einer H₂-Roadmap für Baden-Württemberg**
2. **Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit lokaler "H₂-Champions"**
3. **Förderung von lokalen "H₂-Projekten als Schaufenster für die Welt"**

Um wirtschaftliche Potenziale der Branche für Baden-Württemberg zu realisieren, darf mit der Umsetzung entsprechender Maßnahmen und weiteren Investitionen in die Technologie nicht gewartet werden – vielmehr werden die nächsten zwei bis fünf Jahre entscheidend dafür sein, welche Rolle der Standort Baden-Württemberg im zukünftig entstehenden Weltmarkt für Wasserstoff und Brennstoffzellen spielen wird. Nur wenn bereits heute weiter in Forschung und Entwicklung, den Ausbau des Produktportfolios der lokalen Unternehmen sowie den Ausbau von Produktionskapazitäten investiert wird, kann die weltweit steigende Nachfrage nach Wasserstoff und Brennstoffzellen auch aus Baden-Württemberg bedient werden. Gleichzeitig werden dadurch die Voraussetzungen dafür geschaffen, dass baden-württembergische Unternehmen über die Kompetenzen und Kapazitäten verfügen, um am zukünftigen globalen Markt zu partizipieren und mit der internationalen Konkurrenz, die weiter in die Technologie investiert, auf Augenhöhe zu agieren.

Einleitung



Die Begrenzung des Klimawandels durch Reduzierung der weltweiten CO₂-Emissionen ist eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Hierfür sind ein tiefgreifender Umbau unserer Energiesysteme und eine weitreichende Umstellung auf innovative und emissionsfreie Technologien in allen Sektoren notwendig, von der Stromerzeugung bis hin zu den großen Energieverbrauchssektoren Industrie, Verkehr und Gebäudewärme. Die Europäische Union (EU) liegt derzeit hinter China und den Vereinigten Staaten auf Platz 3 der größten Treibhausgasemittenten weltweit; 81% des Ausstoßes sind CO₂. Deutschland liegt derzeit weltweit auf Platz 6 der größten CO₂-Emittenten. Baden-Württemberg als einer der wichtigsten deutschen und europäischen Wirtschafts- und Industriestandorte trägt dabei erheblich zu den deutschen und europäischen Treibhausgasemissionen bei.

Daher haben sich die EU, Deutschland und auch das Land Baden-Württemberg ambitionierte Klimaschutzziele gesetzt und diese mit verbindlichen Selbstverpflichtungen hinterlegt. Im Frühjahr 2019 hat die Landesregierung Baden-Württemberg ein Eckpunktepapier zur Weiterentwicklung des baden-württembergischen Klimaschutzgesetzes verabschiedet, das ein spezifisches Treibhausgasemissionsminderungsziel von 42% im Vergleich zu 1990 bis 2030 vorsieht. Dieses übergeordnete Ziel ist durch sektorspezifische Emissionsreduktionsziele hinterlegt, die unter anderem die Stromerzeugung (-31% Treibhausgasemission im Vergleich zu 1990), den Verkehr (-31%), die energiebedingten Emissionen in der Industrie (-62%), die prozessbedingten Emissionen in der Industrie (-39%), aber auch private Haushalte (-57%) und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (-44%) umfassen. Darüber hinaus hat sich das Land Baden-Württemberg mit der Maßgabe "50-80-90" zum Ziel erklärt, Klimaschutz und Energieversorgung im Land bis 2050 umfassend zu verändern. 80% der Energieversorgung

soll 2050 aus erneuerbaren Quellen stammen und energiebedingte Treibhausgase sollen um 90% reduziert werden. Diese Ziele des Landes befinden sich im Einklang mit den entsprechenden Zielsetzungen der Bundesrepublik und der Europäischen Union; ihre Erreichung stellt einen wichtigen Baustein für das Erreichen der Ziele auf deutscher und europäischer Ebene dar.

Die Erreichung dieser Ziele erfordert dabei in allen genannten Sektoren schon heute und zunehmend in den nächsten Jahren die Umsetzung umfangreicher und weitreichender Maßnahmen zum Umbau des Energiesystems, zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Einsparung von Emissionen. Wasserstoff und Brennstoffzellen kommt mittel- und langfristig eine Schlüsselrolle dabei zu, weite Teile des heutigen Energiebedarfs in allen Sektoren aus erneuerbaren und CO₂-freien Quellen zu decken. Dies liegt darin begründet, dass Wasserstoff als flexibler Energieträger erneuerbar erzeugte Energie in allen Sektoren nutzbar machen und so die Sektorkopplung als zentrales Element der Energiewende ermöglichen kann. Wasserstoff ermöglicht die Verwendung erneuerbarer Energie, wo die direkte Stromnutzung wirtschaftlich oder technisch nicht möglich ist, und ist zudem flexibel speicher- und transportierbar. Wasserstoff kann damit in herausragendem Maße zur Dekarbonisierung aller Energieverbrauchssektoren beitragen. Die Technologie ist bereits seit Jahrzehnten bekannt und schon in vielen Bereichen umfassend erprobt worden. Aufgrund der dabei gesammelten Erfahrung und bisher erreichten technologischen Reife von Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen kann in den nächsten Jahren der Schritt hin zur Kommerzialisierung und Marktdurchdringung gegangen werden, mit dem Wasserstoff und Brennstoffzellen zu einem wichtigen Eckpfeiler der Energiewende werden können. Dadurch können auch die derzeit noch hohen Technologiekosten gesenkt und signifikante Skalen-

effekte realisiert werden, um letztendlich eine breite Anwendung der Technologie in allen Energieverbrauchssektoren zu ermöglichen. Damit können Wasserstoff und Brennstoffzellen zu einer Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts werden.

Vor allem in den letzten Jahren erfährt die Technologie in Deutschland, Europa und weltweit vermehrtes Interesse von Unternehmen, Öffentlichkeit und Politik und wird zunehmend als Schlüsseltechnologie zur Erreichung von Klimazielen und bei der Steigerung der Nutzung erneuerbarer Energien gesehen. Dabei werden zunehmend auch die wirtschaftlichen Potenziale von Investitionen in die Technologie für Industrie- und Technologiestandorte wie Baden-Württemberg erkannt und namhafte Unternehmen investieren zunehmend in ihre Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen. Der notwendige Umbau des Energiesystems und die Abkehr von fossilen Energieträgern wird in den kommenden Jahrzehnten enorme wirtschaftliche Auswirkungen haben und große Investitionen notwendig machen. Konventionelle Technologien werden durch neue, "grüne" Technologien ersetzt und dadurch einen Strukturwandel nach sich ziehen, der Baden-Württemberg, Deutschland, aber auch die globalen wirtschaftlichen Verhältnisse verändern wird. Neben den mit dem Strukturwandel einhergehenden Kosten und Risiken für Arbeitsplätze und dem Erhalt der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit des Standorts, insbesondere in der Automobilindustrie, bestehen jedoch auch große Chancen für Baden-Württemberg, die jetzige wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und internationale Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten und durch seine vorhandene Technologiekompetenz und Innovationsfähigkeit weiter auszubauen.

Das Land Baden-Württemberg als wichtiger Standort der von diesem Wandel stark betroffenen deutschen Au-

tomobilindustrie hat die wirtschaftsstrukturellen Herausforderungen für die kommenden Jahrzehnte erkannt und daher 2017 den Strategiedialog Automobilwirtschaft ins Leben gerufen. Ziel des Strategiedialogs ist es, den Automobilstandort Baden-Württemberg international wettbewerbsfähig zu halten, klimafreundliche Mobilität voranzutreiben und technologische Potenziale zu nutzen. Der Strategiedialog wird von e-mobil BW koordiniert und bietet einen institutionalisierten Rahmen zum Austausch zwischen Politik, Wirtschaft, Wissenschaft, Arbeitnehmerverbänden, Verbraucherorganisationen, Umweltverbänden und Zivilgesellschaft. Dort werden Innovationspotenziale erörtert sowie Maßnahmen und Konzepte für eine erfolgreiche Transformation der Automobilindustrie erarbeitet. Im Rahmen des Strategiedialogs wurde auch eine Arbeitsgruppe "Wasserstoff und Brennstoffzelle" ins Leben gerufen, die die mögliche Rolle der Technologie für die anstehende Transformation des Wirtschaftsstandorts in den Blick nimmt. Die vorliegende Studie liefert dazu eine vertiefende Betrachtung relevanter Aspekte.

Daneben fördert das Land Baden-Württemberg die Weiterentwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie bereits seit vielen Jahren, unter anderem im Rahmen der Arbeit des Clusters Brennstoffzelle BW, dessen Arbeit von e-mobil BW koordiniert wird. Im Cluster werden Vorhaben im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich umgesetzt, um so den Markthochlauf zu beschleunigen. Schon frühzeitig haben sich Unternehmen in Baden-Württemberg mit dem Thema Wasserstoff und Brennstoffzellen beschäftigt und gehören daher zu den weltweiten Pionieren der Branche, unter anderem das Unternehmen Daimler, das bereits seit einigen Fahrzeuggenerationen Brennstoffzellen-Fahrzeuge auf den Markt bringt und sich im Joint Venture H2 Mobility für den Aufbau einer flächendeckenden Wasserstofftankstellen-Infrastruktur in Deutschland

einsetzt. Darüber hinaus sind mit Bosch, ElringKlinger, Freudenberg, MAHLE sowie Mann+Hummel große und renommierte Unternehmen im Bereich aktiv, teilweise bereits mit langjähriger Erfahrung. Daneben beschäftigten sich zahlreiche Forschungsinstitutionen in Baden-Württemberg aktiv mit der Technologie – unter anderem das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) und das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), die das Land Baden-Württemberg heute zu einem der wichtigsten europäischen Standorte in der Wasserstoff-Forschung und -entwicklung machen. Baden-Württemberg verfügt damit über eine hervorragende Ausgangslage, um vom erwarteten Marktwachstum im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen zu profitieren. Gleichzeitig wächst die internationale Konkurrenz und es müssen in den nächsten Jahren wichtige Weichen gestellt werden, um die gute Positionierung des Standorts in Zukunft zu erhalten und auszubauen. Mit der Förderung des Projekts "HyFab" am Standort Ulm, das zur Serienproduktion von Brennstoffzellen forschen wird, wird aktuell ein erster Schritt von den Akteuren im Land in diese Richtung getan.

Vor diesem Hintergrund bietet die vorliegende Studie eine vertiefende Betrachtung zu den Potenzialen der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie für den Standort Baden-Württemberg, vor allem hinsichtlich der zukünftigen wirtschaftlichen Potenziale für das Land und seine Unternehmen vor dem Hintergrund der weiteren globalen und europäischen Marktentwicklung. Die Studie nimmt dabei die folgenden Themenbereiche in den Blick:

- **KAPITEL 2** gibt einen Überblick über die zentrale Rolle von Wasserstoff und Brennstoffzellen im zukünftigen Energiesystem und stellt deren Anwendungsmöglichkeiten in den verschiedenen

Energieverbrauchssektoren vor. Abschließend wird für zentrale Anwendungsbereiche die zukünftige Kostenentwicklung der Technologie in Abhängigkeit von der weiteren Marktentwicklung analysiert.

- **KAPITEL 3** stellt aktuelle Rahmenbedingungen sowie Zukunftsszenarien für die weitere Marktentwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie auf globaler, europäischer, deutscher und baden-württembergischer Ebene vor.
- In **KAPITEL 4** wird der aktuelle Entwicklungsstand der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg in den Blick genommen. Dafür wird zunächst die bestehende Akteurslandschaft in Baden-Württemberg entlang der Wertschöpfungskette und über alle Anwendungsbereiche hinweg vorgestellt. Anschließend erfolgen eine Einordnung der Akteure in die internationale Wettbewerbslandschaft sowie eine Einschätzung von Potenzialen und Perspektiven der baden-württembergischen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie im Rahmen der zukünftigen Marktentwicklung.
- In **KAPITEL 5** erfolgt basierend auf Abschätzungen des zukünftigen Umsatzpotenzials der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie eine Prognose der zusätzlichen Bruttowertschöpfung und der damit einhergehenden Arbeitsplätze in der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie Baden-Württembergs.
- **KAPITEL 6** identifiziert und diskutiert noch bestehende Herausforderungen für die weitere Marktentwicklung und zeigt mögliche Lösungswege zu deren Behebung auf.
- In **KAPITEL 7** werden abschließend basierend auf den Ergebnissen der Studie spezifische Handlungsempfehlungen für die relevanten Stakeholder in Baden-Württemberg abgeleitet.

Die Ergebnisse der Studie beruhen neben eigenen Analysen und Berechnungen zu Marktszenarien sowie Kostenentwicklungen auf einer umfangreichen Berücksichtigung aktueller Studien und öffentlicher Statistiken zum Thema sowie auf den Ergebnissen einer onlinebasierten Stakeholder-Umfrage unter mehr als 50 baden-württembergischen Unternehmen, Forschungseinrichtungen und weiteren Akteuren der lokalen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Wirtschaft¹. Die Analysen und Ergebnisse der Studie wurden zudem durch 20 Interviews mit Experten² aus Industrie, Forschung und Verbänden, hauptsächlich aus Baden-Württemberg, ergänzt und validiert.

Für die Identifizierung realistischer Zukunftsszenarien für die weitere Marktentwicklung wurden vor allem Marktentwicklungsprojektionen aus aktuellen maßgeblichen Studien des Hydrogen Council auf globaler und des Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) auf europäischer Ebene zugrunde gelegt. Deren Marktprojektionen wurden durch eigene Roland Berger Marktstudien, Umfrageergebnisse und Experteninterviews validiert. Für die anschließende Abschätzung der zukünftigen Kostenentwicklung und Wirtschaftlichkeit der Technologie wurden szenarienbasierte Kostenentwicklungen für Wasserstoff-Herstellung, Wasserstoff-Infrastruktur sowie einzelne Endanwendungen unter Einbeziehung bestehender Literatur und eigener Berechnungen in Zusammenarbeit mit der Industrie analysiert und diskutiert.

Um eine Aussage über die zukünftigen Wirtschaftspotenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg treffen zu können, wurden alle im Bereich tätigen Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette systematisch und möglichst vollständig erfasst. Dabei wurden Zulieferunternehmen, Teil-Systemintegratoren und Systemintegratoren

(OEMs) betrachtet, die in Baden-Württemberg ansässig sind oder dort einen Produktionsstandort haben und somit zur lokalen Wertschöpfung beitragen bzw. in Baden-Württemberg Arbeitsplätze schaffen. Darüber hinaus wurden weitere Unternehmen in die Analyse einbezogen, die weiterhin von der Wertschöpfung im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich profitieren. Hierzu gehören z.B. Beratungen und Engineering-Dienstleister, aber auch Maschinen- und Anlagenbauer. Auch der aktuelle Entwicklungsstand der Forschungslandschaft in Baden-Württemberg wurde in die Analysen integriert. Unter Einbeziehung von relevanten Marktdaten, Experteneinschätzungen und relevanten Kennzahlen wurden auf dieser Basis die aktuelle Wettbewerbsfähigkeit und die Positionierung der baden-württembergischen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie analysiert. Für die Analyse wurde neben einer Auswertung der Umfrageergebnisse eine Benchmark-Analyse bedeutender Unternehmen in ausgewählten Bereichen der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg und den europäischen und weltweiten Marktführern durchgeführt.

Aufbauend auf diesen Analysen erfolgt schließlich eine Abschätzung des Umsatz- und Wertschöpfungspotenzials sowie zukünftiger Arbeitsplätze im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor Baden-Württembergs. Dazu wird zunächst auf Basis der Prognose des weltweiten Absatzes von Wasserstoff sowie der weltweiten Produktion von Brennstoffzellen-Komponenten und -Systemen bis 2030 eine Umsatzprognose der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie für in Baden-

¹ Vgl. den Anhang der Studie für genauere Angaben zu den Umfrageteilnehmern.

² Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Text die männliche Form verwendet. Selbstverständlich sind Personen jeden Geschlechts gemeint.

Württemberg tätige Unternehmen erstellt. Dazu wurde die Prognose des weltweiten Absatzes mit einer länder- bzw. weltregionenspezifischen Produktionsprognose verzahnt. Hierzu wurde auf länder- und bundesländer-spezifische öffentliche Daten gemäß der statistischen Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft (NACE) und der Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ 2008) zu Umsatz und Produktion in verschiedenen Wirtschaftszweigen zurückgegriffen. Als Ergebnis steht eine Umsatzprognose für Deutschland und Baden-Württemberg zur Verfügung.

Darauf aufbauend wurde die Wertschöpfung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie Baden-Württembergs berechnet. Diese Berechnung erfolgt mithilfe eines Arbeitsplatzmodells. Die gesamte Wertschöpfung ergibt sich aus der Summe der Wertschöpfung je Sektor und Anwendungsfall. Dabei werden zum einen in Baden-Württemberg hergestellter Wasserstoff, produzierte Systeme und Komponenten für den inländischen Markt betrachtet, zum anderen aber auch die Wertschöpfung, die aus dem Export von Wasserstoff und Teilen der in Baden-Württemberg ansässigen Unternehmen entsteht.

Schließlich wurde mithilfe der Wertschöpfungsprognose eine Prognose der Beschäftigungsentwicklung erstellt. So können Arbeitsplatzeffekte, welche aus einem Wachstum der Brennstoffzellen-Technologie resultieren können, ermittelt werden. Zur Quantifizierung der Beschäftigungseffekte wird ein Top-down-Ansatz beruhend auf öffentlich verfügbaren statistischen Daten angewendet.³ Um Umsatz, Wertschöpfung und Arbeitsplätze in Baden-Württemberg entlang der Wertschöpfungskette aufzuschlüsseln, werden Daten gemäß der Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ 2008) genutzt. Diese liefern unter anderem Informationen zu Wertschöpfungsquoten einzelner Wirtschaftszweige.

³ Bei einem Top-down-Ansatz erfolgt die Ableitung von Aussagen über interessierende Teilgrößen (z.B. die Beschäftigungsveränderungen in einzelnen Branchen, Regionen oder sogar Unternehmen) aus Aggregat-Werten.

Energie der Zukunft? Die zukünftige Rolle von Wasserstoff und Brennstoffzellen



2.1 Wasserstoff und Brennstoffzellen im zukünftigen Energiesystem

Um unsere heutige Abhängigkeit von nuklearen und fossilen Brennstoffen zu reduzieren und Treibhausgasemissionen durch unseren Energieverbrauch so gut wie vollständig zu vermeiden, sind in den nächsten Jahrzehnten ein umfassender Umbau unseres heutigen Energiesystems und eine Abkehr von der Nutzung konventioneller Energieträger notwendig. Politisch haben sich die Weltgemeinschaft und die Bundesregierung im Jahr 2015 im Pariser Übereinkommen dazu verpflichtet, die Erderwärmung in diesem Jahrhundert auf möglichst 1,5 bzw. maximal 2 Grad Celsius zu begrenzen, um die negativen Folgen des Klimawandels weltweit einzudämmen. Um diese globale Verpflichtung zu erreichen, hat sich die Bundesregierung im Einklang mit Plänen der Europäischen Union das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2030 55% der emittierten Treibhausgase gegenüber dem Jahr 1990 einzusparen (in Baden-Württemberg 42%) und bis zum Jahr 2050 eine weitgehende Treibhausgasneutralität erreicht zu haben.

Auf globaler Ebene sollen bis 2050 60% der weltweiten CO₂-Emissionen gegenüber 2015 eingespart werden. Hierzu sind weitreichende Maßnahmen und tiefgreifende Veränderungen unserer heutigen Energienutzung erforderlich, die bislang allerdings noch nicht mit der notwendigen Geschwindigkeit umgesetzt werden. So hat Deutschland seine Treibhausgasemissionen bis einschließlich 2019 lediglich um 35% gegenüber 1990 gesenkt und muss daher in den nächsten Jahren signifikante Einsparungen erzielen, um seine Verpflichtungen zu erfüllen (Agora Energiewende, 2020). Ursprünglich bis zum Jahr 2020 avisierte Emissionsreduktionsziele von mindestens 40% weniger Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 mussten bereits von der Bundes-

regierung zurückgenommen werden (BMU, 2019a). Auch das Land Baden-Württemberg wird das Ziel von mindestens 25% weniger Treibhausgasemissionen 2020 im Vergleich zu 1990 verfehlen. 2018 betrug die Emissionsminderung gegenüber 1990 lediglich 12% (UM BW, 2019a). Allerdings waren die Pro-Kopf-Emissionen von 7,1 Tonnen CO₂-Äquivalente im Jahr 2017 in Baden-Württemberg wesentlich geringer als der bundesdeutsche Durchschnitt von 10,8 Tonnen (Landtag Baden-Württemberg, 2019).

Bei Betrachtung der größten CO₂-emittierenden Sektoren in Deutschland wird deutlich, dass eine Energiewende in der Stromerzeugung allein nicht ausreicht, um die gesteckten Ziele zu erreichen. Zwar war die Stromerzeugung 2018 in Deutschland für knapp 39% der CO₂-Emissionen (ca. 290 Mio. Tonnen CO₂) verantwortlich und damit der Energiesektor mit den meisten Treibhausgasemissionen. Industrie und Verkehr auf den Plätzen zwei und drei setzten zusammen allerdings nochmals Treibhausgasemissionen in etwa gleicher Höhe frei. Damit sind diese drei Sektoren allein für über 80% des CO₂-Ausstoßes in Deutschland verantwortlich. Auf Platz vier folgt der Energieverbrauch in Gebäuden (Privathaushalte sowie öffentliche und gewerblich genutzte Gebäude), vor allem für das Heizen, mit einem Anteil von ca. 16% der verursachten Treibhausgasemissionen (ca. 122 Mio. Tonnen CO₂). Um bis 2050 eine weitgehende Treibhausgasneutralität zu erreichen, kann daher eine Umstellung auf die Nutzung erneuerbarer Energien nicht allein in der Stromproduktion erfolgen, sondern alle genannten Energieverbrauchssektoren müssen zukünftig auf die Nutzung erneuerbar erzeugter Energie umgestellt werden. Auch die Landesregierung Baden-Württemberg sieht insbesondere in den Bereichen Stromerzeugung, Gebäude und Verkehr noch hohe Einsparpotenziale auf Landesebene (UM BW, 2019b).

Abbildung 1**CO₂-Ausstoß und Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren (gerundet)**

	CO ₂ -Ausstoß [Mio. t]	Endenergieverbrauch [TWh]
Stromerzeugung	294 (39,0%)	–
Industrie	178 (23,5%)	750 (29,0%)
Verkehr	161 (21,5%)	765 (29,5%)
Gebäude¹	122 (16,0%)	1.076 (41,5%)

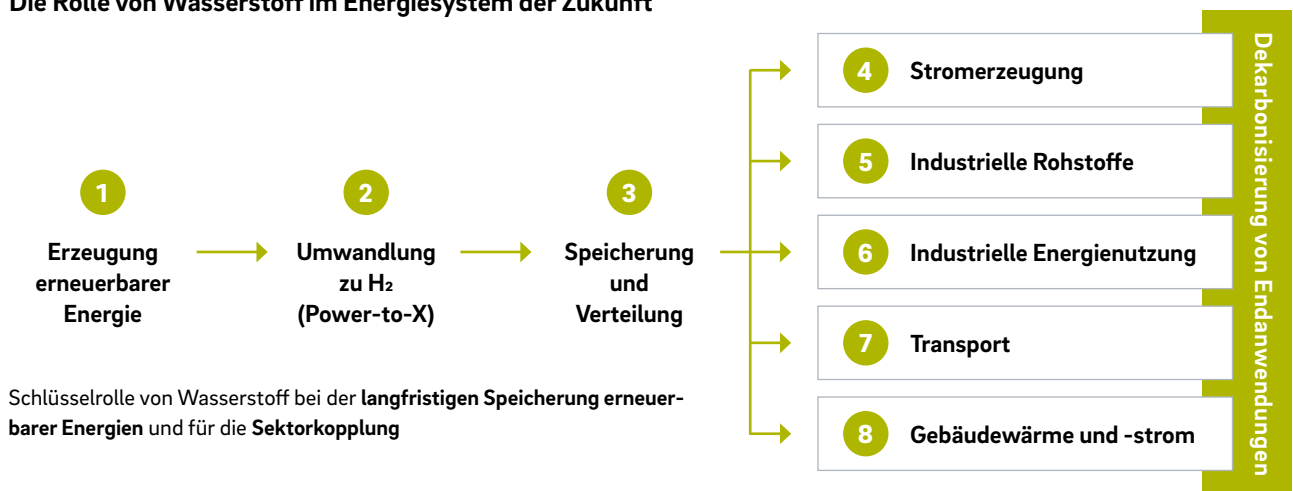
¹ Beinhaltet nur den CO₂-Ausstoß durch Wärmeproduktion, die übrigen gebäudebezogenen Emissionen durch Stromverbrauch sind der Stromerzeugung zugeordnet.

Quelle: BMU, 2019b; Roland Berger

Wasserstoff und Brennstoffzellen nehmen hierbei zukünftig eine Schlüsselrolle ein: Erneuerbar erzeugter Strom allein kann zukünftig nicht alle unsere Energiebedarfe direkt bedienen. Vielmehr bedarf es einer Nutzbarmachung von erneuerbar erzeugtem Strom in allen Energieverbrauchssektoren durch die Umwandlung in einen flexiblen Energieträger, der verschiedene Energiebedarfe bedienen und so die Verschränkung der verschiedenen Sektoren ermöglichen kann (sog. Sektorkopplung). Wasserstoff kann aus erneuerbarem Strom durch Wasserelektrolyse erzeugt werden und als flexibler Energielieferant in allen Verbrauchssektoren eingesetzt werden. Gleichzeitig macht Wasserstoff große Energiemengen über beliebig lange Zeiträume speicherbar und ist so flexibel transportierbar wie konventionelle Gase. Wasserstoff ist ein flexibel transportabler Energieträger, der auch über große Distanzen durch Pipelines sowie auf Schiene oder Straße transportiert werden kann. Somit ermöglicht Wasserstoff die Verwendung erneuerbarer Energien in denjenigen Energieverbrauchs-

sektoren, in denen die direkte Stromnutzung wirtschaftlich oder technisch nicht möglich ist, und stellt damit aus heutiger Sicht die vielversprechendste verfügbare Option zur Dekarbonisierung dieser Sektoren dar. Gleichzeitig kann die Verwendung von Wasserstoff durch dessen Speicher- und Transportfähigkeit zentrale Herausforderungen bei der Umstellung der Energiesysteme auf erneuerbar erzeugte Energie meistern, vor allem hinsichtlich der Speicherung und Verteilung erneuerbar erzeugter Energie.

Wasserstoff wird heute bereits in einer Vielzahl von Anwendungen als nachhaltiger Rohstofflieferant und Energieträger eingesetzt, etwa in der Industrie als erneuerbarer Rohstoff in verschiedenen Produktionsprozessen sowie zur Energieerzeugung, in einer Vielzahl von Mobilitätsanwendungen und zur Erzeugung von Strom und Wärme für Gebäude. Die Nutzung von Wasserstoff und Brennstoffzellen zur Energieerzeugung ist bereits seit Jahrzehnten in unterschiedlichsten Anwen-

Abbildung 2**Die Rolle von Wasserstoff im Energiesystem der Zukunft**

Quelle: Hydrogen Council, 2017; Roland Berger

dungsbereichen etabliert; die Entwicklung der Technologie ist daher in wichtigen Anwendungsbereichen weit fortgeschritten und technisch so ausgereift, dass der Schritt zur Produktion im industriellen Maßstab und zur Kommerzialisierung vollzogen werden kann. Aus heutiger Sicht ist keine andere Technologieoption vorhanden, die derart breit die Anforderungen der zukünftigen Energiesysteme bedienen kann und einen ähnlichen Entwicklungsstand erreicht hat.

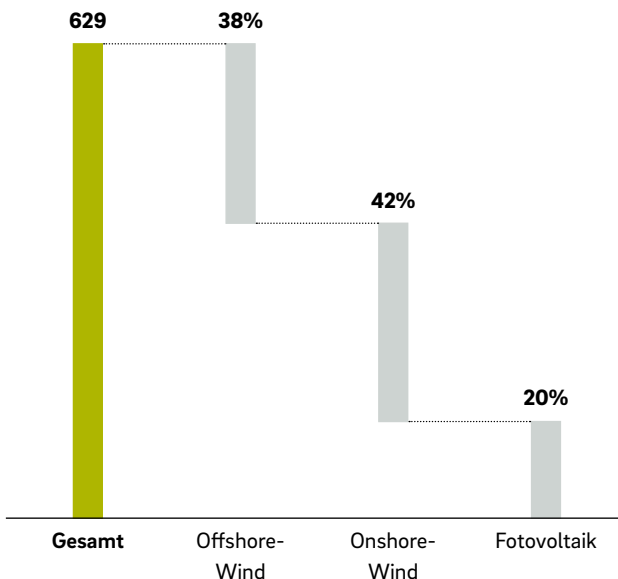
WASSERSTOFF IN DER STROMERZEUGUNG

Die Stromerzeugung verursacht mit ca. 39% den größten Anteil der gesamtdeutschen CO₂-Emissionen. Daher zählt der Ausbau erneuerbarer Energien zur Stromversorgung zu den zentralen Säulen der Energiewende in

Deutschland. Erneuerbare Energien sollen nicht nur die deutsche Stromerzeugung klimaverträglicher machen, sondern auch die Abhängigkeit von fossilen Heiz-, Brenn- und Kraftstoffen reduzieren. Auch Baden-Württemberg erzeugt noch knapp 30% seines Stroms durch Steinkohlekraftwerke. Mit dem Klimaschutzprogramm der Bundesregierung wurde 2019 beschlossen, den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien auf 65% des Stromverbrauchs im Jahr 2030 zu steigern. Allerdings kommen mit dem steigenden Anteil erneuerbarer Energien neue Herausforderungen auf die Stromnetze zu. Durch witterungsbedingte Fluktuationen in der Stromerzeugung sind große Energiespeicher und Technologien, die flexibel Engpässe, aber auch Überschüsse in der Stromversorgung abfangen können, sogenannte Power-to-X-Technologien, von zunehmender Bedeutung.

Abbildung 3

Prognose Strommix 2050 für Deutschland und resultierender Speicherbedarf für Überkapazität

Prognose Strommix 2050¹ [TWh]

Speicherbedarf 2050 für Überkapazitäten [TWh]



¹ Basierend auf einer Extrapolation der Installationspläne der Bundesregierung unter der Annahme, dass CO₂-Emissionen um 90% im Vergleich zu 1990 reduziert werden.

² Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal (Thüringen): installierte Leistung von 1.060 MW, Speicherleistung von 8,5 GWh Strom.

Quelle: Stolten, 2018

Wasserstoff ist ein flexibler und langfristiger Energiespeicher, der erneuerbar erzeugte Energie auch in großen Mengen speicherbar macht und einfach transportiert werden kann. Zur zukünftigen Speicherung von Wasserstoff und zu dessen Transport sind, abhängig von der benötigten Wasserstoffmenge und der anschließenden Weiterverwendung, unterirdische Großspeicher

(Kavernen), kleinere Verteilungsspeicher, aber auch Pipelines oder Druckgasbehälter zum Transport auf Straße und Schiene nutzbar. Daher werden in Zukunft für den Auf- und Umbau dieser Art von Infrastrukturen weitere Investitionen in Deutschland notwendig sein; dies ist vor allem dadurch bedingt, dass Deutschland seinen Strombedarf absehbar nicht aus eigener Erzeugung decken kann.

gung abdecken kann und daher auf Energieimporte angewiesen sein wird. Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger ist daher eine Möglichkeit, um zukünftig erneuerbar erzeugte Energie in Form von Wasserstoff oder anderen synthetischen Kraftstoffen aus anderen Ländern (z.B. aus Nordafrika oder dem Mittleren Osten, wo Wasserstoff erwartbar günstig aus Solarenergie gewonnen werden kann) mit Schiffen oder Pipelines zu importieren.

Power-to-Gas-Technologien wie die Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff sind bereits weit entwickelt und erprobt sowie in verschiedenen Pilot- und Demonstrationsprojekten im Einsatz, die zunehmend größere Erzeugungskapazitäten aufweisen, derzeit aber vor allem wirtschaftlich noch nicht wettbewerbsfähig mit konventionellen Energieträgern sind. Mit der Realisierung von Skaleneffekten durch den absehbaren Markthochlauf kann die Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbarem Strom auch in Deutschland jedoch wirtschaftlich immer attraktiver werden (vgl. Kap. 2.2).

WASSERSTOFF IN DER INDUSTRIE

Die Industrie liegt mit einem Anteil von 23% am Gesamtausstoß 2018 auf Platz zwei der Sektoren mit den größten CO₂-Emissionen in Deutschland. Drei Viertel der Emissionen entstehen dabei bei der Energiegewinnung, das verbleibende Viertel durch Rohstoffverwendung in Produktionsprozessen, vor allem in der Herstellung von Metall und mineralischen Produkten sowie in der chemischen Industrie. Bis 2030 sollen diese industriellen Emissionen laut Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung (BMU, 2016) um weitere 20% sinken, nachdem die Emissionen seit 1990 bereits um 31% zurückgegangen sind. Dies soll unter anderem durch den europäischen Emissionshandel, der das zentrale Klimaschutzinstrument auf europäischer Ebene darstellt, er-

reicht werden. Durch steigende Zertifikatspreise für verursachte Emissionen wird der Kostendruck auf Unternehmen kontinuierlich erhöht und Anreize für die Reduzierung von Emissionen sollen gesetzt werden. Wasserstoff kann dabei einen signifikanten Beitrag zur Emissionsreduktion in der Industrie leisten: Zum einen kann Wasserstoff verstärkt zur hochintensiven Industriewärmerzeugung genutzt werden, zum anderen kann bereits heute in Produktionsprozessen eingesetzter Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen hergestellt und damit CO₂-Emissionen reduziert werden. Darüber hinaus können konventionelle Industrierohstoffe, z.B. in der Stahlproduktion, durch Wasserstoff ersetzt werden.

Wasserstoff ist bereits heute ein wichtiges Industrieprodukt und wird seit Jahren in verschiedenen industriellen Prozessen eingesetzt, z.B. bei der Synthese von Ammoniak und Methanol und auch bei der Raffinierung von Erdöl sowie metallurgischen Fertigungsprozessen. In Deutschland wird Wasserstoff zur Hälfte aus Erdgas und Naphtha hergestellt und zur anderen Hälfte als Nebenprodukt in industriellen Produktionsprozessen, z.B. in Raffinerien, gewonnen. Dadurch ist der zurzeit hauptsächlich genutzte Wasserstoff jedoch meist nicht CO₂-frei (je nach eingesetztem fossilen Rohstoff sogenannter „schwarzer“, „brauner“ oder „grauer“ Wasserstoff). Eine Umstellung der Wasserstoff-Herstellung auf Elektrolyse kann bei einem zunehmend erneuerbaren Strommix („grüner“ Wasserstoff) nicht nur den Einsatz von Erdgas in der Industrie reduzieren, sondern auch industrielle CO₂-Emissionen verringern. Auch die konventionelle Herstellung mittels Dampfreformierung mit anschließender CO₂-Speicherung (CCS – Carbon Capture and Storage) ist zur Emissionsreduktion möglich („blauer“ Wasserstoff). Hierbei wird das im Herstellungsprozess anfallende CO₂ aufgefangen und z.B. unterirdisch gespeichert.

Darüber hinaus kann Wasserstoff auch als Substitut für konventionelle Industrierohstoffe zum Einsatz kommen, um die Emissionen der Industrie weiter zu verringern, beispielsweise in der Stahlproduktion. Rund 55 Mio. Tonnen CO₂ werden jährlich in Deutschland durch die Stahlindustrie freigesetzt, was rund 7% der gesamten jährlichen deutschen CO₂-Emissionen entspricht. Im Rahmen der Stahlproduktion muss Eisenerz von Sauerstoff befreit werden; dies geschieht im konventionellen Verfahren mit Koks, einem kohlenstoffhaltigen Brennstoff, der sich mit Sauerstoff zu CO₂ verbindet und dieses freisetzt. Erste Tests in Hochöfen laufen bereits, um Koks durch Wasserstoff zu substituieren, bei dessen Einsatz lediglich Wasserdampf freigesetzt wird und keine CO₂-Emissionen mehr entstehen. Auch im sogenannten Direktreduktionsverfahren zur Eisenerzzeugung erfolgt die Reduktionsgaserzeugung noch durch Umwandlung von Erdgas in Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Perspektivisch kann auch dort vermehrt Erdgas durch Wasserstoff ersetzt und somit ein wesentlicher Beitrag zur Emissionsreduktion in der Industrie geleistet werden.

WASSERSTOFF IM TRANSPORT

Der Verkehrssektor ist heute in überwiegendem Maße von fossilen Energieträgern abhängig und belegte 2018 mit einem Anteil von 21% Platz drei der Sektoren mit den größten CO₂-Emissionen in Deutschland. Damit haben sich die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor im Vergleich zu 1990 kaum verändert und auch zukünftig wird mit einem weiter steigenden Verkehrsaufkommen gerechnet. Die Reduzierung von CO₂-Emissionen im Verkehrssektor ist damit bei steigendem Energiebedarf durch den wachsenden Mobilitätsbedarf mit besonderen Herausforderungen verbunden, da für die Erreichung globaler Klimaziele Reduktionen auch und gerade in diesem Sektor not-

wendig sind. Durch das steigende Verkehrsaufkommen müssen die im Durchschnitt anfallenden Emissionen pro gefahrenen Kilometer in den nächsten Jahren deutlich sinken, um die CO₂-Emissionen insgesamt nicht noch weiter zu steigern und das Ziel der Bundesregierung zu erreichen, die Emissionen im Verkehr bis 2030 um mindestens 40% im Vergleich zu 1990 zu senken. In Baden-Württemberg sind die verkehrsbedingten Emissionen sogar um 13% gestiegen, bedingt durch einen höheren Pkw-Bestand sowie steigenden Luft- und Güterverkehr. Der Anteil des Verkehrssektors an den baden-württembergischen CO₂-Emissionen beträgt zudem über 30% (UM BW, 2019a). Daher besteht für Baden-Württemberg in diesem Sektor besonderer Handlungsbedarf.

Mit einem zunehmenden Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge im Transportbereich wird der Strombedarf dieses Sektors signifikant ansteigen. Dies stellt den Netzausbau und die Stromerzeugung in Deutschland vor enorme Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf den allgemeinen Ausbau erneuerbarer Energien und den langen Planungshorizont für bereits heute nötige Netzausbauvorhaben.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge sind schon heute im Pkw-Segment kommerziell in Kleinserien verfügbar und auch im Bereich des Materialtransports, beispielsweise bei Gabelstaplern, im Regelbetrieb im Einsatz. Zudem wird in den nächsten fünf Jahren mit einer Vielzahl weiterer Brennstoffzellen-Produkte im Markt gerechnet, insbesondere im Bus- (Nah- und Fernverkehr) und Lkw-Segment, aber auch im Schienenverkehr. Die Nutzung von Wasserstoffzügen ist vor allem auf nichtelektrifizierten Streckenteilen aus wirtschaftlicher Sicht interessant. Darüber hinaus sind erste Tests von Brennstoffzellen im maritimen Bereich von Fähren und Hochseepassagierschiffen geplant, nachdem Brenn-

stoffzellen bereits seit Jahren im militärischen Bereich auf See eingesetzt werden. Daneben wird die Anwendbarkeit im Luftverkehr erforscht. Auch in anderen Nischenanwendungen besteht zukünftig Dekarbonisierungs- und Marktpotenzial, wie beispielsweise bei Straßendienstfahrzeugen, Baustellenfahrzeugen sowie weiteren vergleichbaren Spezialfahrzeugen wie Ground-Handling-Fahrzeugen an Flughäfen oder Lastfahrzeugen für Häfen, die bereits in ersten Pilotprojekten getestet wurden.

Wasserstoff hat aufgrund seiner höheren gravimetrischen Energiedichte (Energie/Gewicht) im Vergleich zur Batterie systemische Vorteile in bestimmten Fahrzeugsegmenten, insbesondere im Schwerlast- und Nutzfahrzeugbereich, da bei batterieelektrischen Fahrzeugen die Reichweite der Batterie entweder geringer ist oder der Energiebedarf mit Batterien aufgrund von Gewichtsrestriktionen gar nicht bedient werden kann. Je größer die Reichweite oder Nutzlast eines Fahrzeugs desto günstiger wird es, den Wasserstoffspeicher des Fahrzeugs zu vergrößern, anstatt die Batterie zu erweitern; in vielen anspruchsvollen Segmenten kommt die Batterietechnik für die Umstellung auf erneuerbare Energien sogar überhaupt nicht infrage und stellen Wasserstoff und Brennstoffzellen sowie ggf. synthetische Kraftstoffe die aus heutiger Sicht einzig möglichen Alternativen dar. Die Verwendung von Wasserstoff und Brennstoffzellen ist daher für längere Distanzen und anspruchsvollere Nutzlastprofile besser geeignet als die von Batterien, die im Gegenzug bei kürzeren Distanzen mit geringerer Nutzlast effizienter sind. Berechnungen des Hydrogen Council mit Schätzungen der Investitionskosten für das Jahr 2030 kommen zum Ergebnis, dass beide Technologien bei einer Reichweite von 300 Kilometern kostengleich sein werden, mit Vorteilen für die Batterietechnologie unterhalb dieser Reichweite und Vorteilen für die Brennstoffzellen-Techno-

nologie für größere Reichweiten (Hydrogen Council, 2017). Obwohl beide Technologien derzeit in der öffentlichen Wahrnehmung oft als Substitute gesehen werden, zeigt dies, dass beide Technologien bei jeweils spezifischen Anwendungsfällen überlegen sind und daher in Zukunft als komplementär betrachtet werden sollten, um im Transportbereich wesentliche CO₂-Reduktionen zu erreichen.

WASSERSTOFF IM BEREICH GEBÄUDEWÄRME UND STROM

Gebäude haben, insbesondere in Regionen mit ausgeprägten jahreszeitlichen Temperaturschwankungen, einen wesentlichen Anteil am Energiebedarf und liegen daher auch in Deutschland mit etwa 16% der CO₂-Emissionen auf Platz vier der Sektoren mit den größten CO₂-Emissionen. Die Emissionen fallen dabei hauptsächlich durch Verbrennungsprozesse fossiler Brennstoffe zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser an. Bezieht man auch die indirekten Emissionen durch den Stromverbrauch in Gebäuden mit ein, entfallen sogar ca. 30% der Treibhausgasemissionen in Deutschland auf den Betrieb von Gebäuden. Die gebäudebezogenen CO₂-Emissionen in Deutschland gingen seit 1990 um ca. 44% zurück. Bis 2030 müssen die Emissionen noch um weitere 23% gesenkt werden, um die nationalen Klimaziele zu erreichen. Wasserstoff kann dabei einen Beitrag zur weiteren Dekarbonisierung des Sektors leisten. Neben der Steigerung der generellen Energieeffizienz der Gebäude sowie der Dekarbonisierung der Stromproduktion müssen dabei vor allem fossile Energieträger in der Wärmeerzeugung ersetzt werden, um die gesetzten Klimaziele zu erreichen.

Wasserstoff als Energieträger zur Wärmeerzeugung ist insbesondere für Länder attraktiv, die bereits eine bestehende Erdgasinfrastruktur besitzen, unter anderem

auch Deutschland. Es kann bereits heute bis zu einem gewissen Anteil (bis zu Vol. 10%) in das Erdgasnetz beigemischt werden. Dadurch kann auf bestehende Infrastrukturen mit entsprechend geringeren Investitionsbedarfen zurückgegriffen werden, obwohl bei einer höheren Beimischungsquote absehbar zusätzliche Anpassungen an der bestehenden Gasinfrastruktur vorgenommen werden müssten.

Durch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) für Wohn- und Nichtwohngebäude kann Wasserstoff auch als Energieträger zur parallelen Produktion von Strom und Wärme eingesetzt werden. KWK-Anlagen haben einen besonders hohen elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 90% und können mit "grünem" Wasserstoff ohne schädliche Emissionen betrieben werden. Bislang wird der Großteil der herkömmlichen KWK-Anlagen allerdings auf Erdgasbasis betrieben, eine vollständige Umstellung auf regenerativ erzeugten Wasserstoff ist in Zukunft jedoch möglich.

Es gilt daher, Wasserstoff in den Bereichen, in denen er bereits heute als Rohstoff genutzt wird, erneuerbar zu erzeugen und seine Nutzung in den anderen Bereichen, die anderweitig schwierig zu dekarbonisieren sind, auszuweiten. Wasserstoff und Brennstoffzellen können dadurch einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung aller Energieverbrauchssektoren und zur Integration erneuerbarer Energien in unsere Energiesysteme leisten und damit zu einer Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts werden.

2.2 Kostenentwicklung und Wirtschaftlichkeit der Technologie

Hohe Kosten für den Einsatz der Technologie sind derzeit eines der wichtigsten Hemmnisse für die Kommerzialisierung und weitere Marktentwicklung von Wasser-

stoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen. Gleichzeitig besteht erhebliches Kostenreduktionspotenzial entlang der gesamten Wertschöpfungskette und in allen Anwendungsbereichen, das durch die Realisierung von Skaleneffekten im weiteren Markthochlauf zu signifikanten Kostensenkungen führen wird. Mittel- bis langfristig sind dadurch in allen Anwendungsbereichen Technologieeinsatzkosten erreichbar, die mit konventionellen Technologien und der Batterietechnik wettbewerbsfähig sind. Für die weitere Marktentwicklung wird dabei entscheidend sein, dass es der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in den nächsten Jahren gelingt, Skaleneffekte und weitere Kostenreduktionen zu erreichen, die zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit der Technologie und damit zu einer verbesserten Wettbewerbsfähigkeit führen und das Marktwachstum beschleunigen.

Sowohl in den Anschaffungs- bzw. Investitions- als auch in den Betriebskosten verursachen Wasserstoff-Anwendungen in beinahe allen Bereichen heute noch deutlich höhere Kosten als konventionelle Technologien. Während bei Anwendungen der Batterietechnologie in den letzten Jahren deutliche Kostenreduktionen durch Realisierung von Skaleneffekten und signifikanten Senkungen der Batteriepreise um ca. zwei Drittel seit 2010 gelangen, sind vergleichbare Potenziale bei Wasserstoff-Anwendungen heute noch größtenteils ungenutzt. Gelingt daher mittel- bis langfristig ein signifikanter Markthochlauf für Wasserstoff-Anwendungen, der den Herstellern auch in Baden-Württemberg die Realisierung von Skaleneffekten erlaubt, sind auch hier signifikante Kostenreduktionen und eine deutlich verbesserte Wirtschaftlichkeit der Technologie im Vergleich zu heute erwartbar. Ob dabei eine vollständige Kostenparität oder sogar eine Kostenreduktion im Vergleich zum Einsatz konventioneller Technologien gelingen kann, hängt einerseits von den verschiedenen Anwendungsbereichen und deren spezifischen Kostenentwick-

lungen, andererseits stark von den regulatorischen Rahmenbedingungen ab (z.B. in Bezug auf die Besteuerung konventioneller und erneuerbarer Energieträger).

Trotz des weiterhin hohen Kostenniveaus für den Einsatz der Technologie konnten bis heute im Vergleich zu den ersten Prototypen bzw. frühen Demonstrationsprojekten bereits signifikante Kostenreduktionen für Wasserstoff-Anwendungen und deren Komponenten über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg realisiert werden:

- Die Kosten für Brennstoffzellen-Stacks sind in den letzten Jahren um ca. 50% gesunken.
- Die Anschaffungskosten für Brennstoffzellen-Stadtbusse für den ÖPNV sind seit dem Einsatz im ersten großen europäischen Demonstrationsprojekt CUTE (2006 beendet) um ca. 80% gesunken.
- Die Kosten für Klein-KWK-Anlagen für private Haushalte wurden seit 2008 um ca. 60% reduziert und sollen aktuell im europäischen Projekt PACE um weitere 30% gesenkt werden, um die Kommerzialisierung voranzutreiben.

Nichtsdestotrotz sind heute nur sehr wenige Wasserstoff-Anwendungen unter spezifischen Bedingungen im direkten Kostenvergleich konkurrenzfähig zu konventionellen Anwendungen: So können in bestimmten betrieblichen Anforderungsprofilen Wasserstoff-Gabelstapler in Logistikzentren oder Warenhäusern kostengünstiger betrieben werden als andere Lösungen. Weitere kostenkompetitive Konstellationen können sich bereits heute beispielsweise bei der dezentralen Energieversorgung abgelegener Gebiete oder kritischer Infrastrukturen ergeben, wenn Energie mit Wasserstoff und Brennstoffzellen lokal erzeugt werden kann, alternativ aber über weite Distanzen mit großem Aufwand und hohen Kosten antransportiert werden muss.

Dennoch müssen kurz- und mittelfristig weitere signifikante Kostenreduktionen erreicht werden, um die Entwicklung eines kommerziellen Marktes für Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen zu ermöglichen, denn die derzeit in allen Anwendungsbereichen noch hohen Kosten gehören zu den entscheidenden Faktoren, die eine breitere Marktdurchsetzung der Technologie derzeit verhindern. Dabei sieht sich die Industrie mit der Herausforderung konfrontiert, derzeitige Kosten signifikant zu senken, ohne dass bereits ein Nachfragevolumen besteht, das die Realisierung signifikanter Skaleneffekte und damit von deutlichen Kostenreduktionen erlaubt. Gleichzeitig gehen aktuelle Marktprognosen und relevante internationale und baden-württembergische Unternehmen aber von einem deutlich steigenden Interesse am Einsatz von Wasserstoff-Anwendungen in den nächsten Jahren aus, was bereits bei noch vergleichsweise geringen Produktionszahlen Kostenreduktionen ermöglichen wird. Dadurch ist davon auszugehen, dass die Technologie zunehmend an wirtschaftlicher Wettbewerbsfähigkeit gewinnt und steigende Absatzzahlen zu weiteren Kostenreduktionen führen werden.

Dies zeigt sich beispielsweise im Pkw-Segment: Hier haben zuletzt vor allem die asiatischen Hersteller Hyundai und Toyota ambitionierte Produktionsziele für Brennstoffzellen-Pkw bekannt gegeben, die signifikante Kostenreduktionen bei allen wesentlichen Komponenten des Antriebsstrangs nach sich ziehen werden. Bis 2030 will Hyundai seine Jahresproduktion von Brennstoffzellen-Pkw auf 700.000 Stück steigern. Toyota hat kürzlich die zweite Generation seines Brennstoffzellen-Pkw Mirai vorgestellt, der ab Sommer 2020 in deutlich höherer Stückzahl als sein Vorgänger hergestellt werden soll. In wenigen Jahren will Toyota den Brennstoffzellen-Pkw so massenmarktauglich machen. Das jährliche Produktionsvolumen soll dabei von derzeit 3.000 auf 30.000

Exemplare verzehnfacht werden und der Preis um ca. 10 bis 15% sinken. Mit der für 2025 angekündigten dritten Mirai-Generation soll dann ein endgültig massenmarktaugliches Modell eingeführt werden, dass mit Kosten von derzeit geschätzt ca. 40.000 bis 45.000 EUR dann auch mit konventionellen Pkw der oberen Mittelklasse preislich konkurrieren kann. Sae Hoon Kim, Leiter des Geschäfts mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen bei Hyundai, erklärte dazu kürzlich:

„Bei rund 200.000 Einheiten pro Jahr erhält man die Skaleneffekte, um die benötigten Materialien zu einem Preis zu kaufen, der ein Wasserstoffauto auf die Kosten heutiger BEVs bringen könnte. Bei der gegenwärtigen Nachfrage dürfte dies innerhalb von fünf Jahren geschehen.“

Andere Studien gehen bereits von deutlich geringeren Stückzahlen aus, um in Abhängigkeit von der weiteren Kostenentwicklung bei Batterien Kostenparität mit batterieelektrischen Pkw zu erreichen. So gehen Industrieexperten davon aus, dass bei einer Produktion von ca. 100.000 Brennstoffzellen-Systemen deren Preis auf nur noch ein Zehntel des heutigen Niveaus sinken wird. Doch auch bereits bei einem Produktionsvolumen von mehr als 50.000 Stück könnten die Kosten für Brennstoffzellen-Antriebsstränge auf das Niveau von batterieelektrischen Antrieben sinken.

Derartige Aussagen lassen sich gegenwärtig zu Wasserstoff-Anwendungen und deren Komponenten in allen Anwendungssegmenten ebenso treffen wie über die Kosten für die Produktion und Distribution von Wasserstoff. Allerdings sollte bei der Bewertung des zukünftigen Potenzials der Technologie und der Diskussion zu deren weiterer Unterstützung nicht allein die Erreichbarkeit einer kostenmäßigen Wettbewerbsfähigkeit und zukünftigen Wirtschaftlichkeit (im Sinne der Möglichkeit eines kostengleichen oder sogar -günstigeren Ein-

satzes im Vergleich zu konventionellen Technologien) als Bedingung formuliert werden. Vielmehr sind zum einen die größere Leistungsfähigkeit der Technologie hinsichtlich der Reduktion von Emissionen und zum anderen deren Rolle für die Dekarbonisierung des Energiesystems zu berücksichtigen.

Der folgende Überblick zukünftig erwartbarer Kostenreduktionen und Wirtschaftlichkeit fokussiert sich auf diejenigen Anwendungsbereiche der Technologie, die (a) aus heutiger Perspektive die wichtigsten Anwendungsbereiche in den nächsten Jahren sein werden und zu denen (b) heute bereits belastbare Erfahrungen und Prognosen zur zukünftigen Kostenentwicklung vorliegen. In einigen anderen Anwendungsbereichen wird der Einsatz der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie zwar derzeit erforscht und erste Prototypen werden realisiert (z.B. im Schiffsbau), eine belastbare Kostenprognose ist auf dieser Grundlage aber bislang nur sehr eingeschränkt möglich; derartige Anwendungsfelder werden daher im Folgenden nicht mitbetrachtet. Vor allem in Bezug auf die Kosten für Endanwendungen wurde der "Total Cost of Ownership (TCO)"-Ansatz (Gesamtkostenansatz) als Betrachtungsgrundlage gewählt. Dieser analysiert die Gesamtkosten für den Betrieb verschiedener Wasserstoff-Anwendungen über deren Lebenszyklus hinweg und berücksichtigt dadurch die auch in Zukunft weiter erwartbaren Nachteile der Technologie hinsichtlich der Anschaffungs- bzw. Investitionskosten (Capex) gegenüber den erwartbar niedrigeren Betriebskosten (Opex, vor allem Wartungs- und Energiekosten).

Heutige Wasserstoffpreise an deutschen Tankstellen von 9,50 EUR pro kg H₂ bzw. in Demonstrations- und Pilotprojekten teilweise auch deutlich darüber (vor allem wenn "grüner" Wasserstoff aus Elektrolyse genutzt wird) müssen zukünftig signifikant reduziert wer-

den, um einen wirtschaftlichen Betrieb der Technologie in allen Anwendungsbereichen zu ermöglichen. Dabei steht heute mit der Dampfreformierung zur Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas eine etablierte Technologie zur Verfügung, die im kommerziellen Maßstab verwendet wird und Wasserstoff für heutige Nutzungen (z.B. in der Chemieindustrie oder Raffinerien) zu sehr günstigen Preisen von oftmals weniger als 2 EUR pro kg H₂ zur Verfügung stellt. Allerdings werden bei dieser Herstellungsmethode weiterhin CO₂-Emissionen von ca. 11,3 kg pro kg H₂ verursacht, die zukünftig vermieden werden müssen, wenn Wasserstoff seine zukünftige Rolle als grüner Energieträger erfüllen und einen wesentlichen Beitrag zur Erfüllung europäischer und internationaler Klimaziele leisten soll. Gleichzeitig ist bereits mit der Nutzung von mittels Dampfreformierung aus Erdgas hergestelltem Wasserstoff eine Reduktion von CO₂-Emissionen im Vergleich zur Nutzung von z.B. Diesel möglich.

Das volle Potenzial von Wasserstoff als grünem Energieträger mit vollständiger Vermeidung von CO₂-Emissionen kann jedoch nur genutzt werden, wenn zukünftig vollständig regenerative bzw. CO₂-neutrale Produktionsmethoden mit wettbewerbsfähigen Kosten zur Anwendung gebracht werden. Dafür stehen grundsätzlich die folgenden Optionen zur Verfügung:

→ Herstellung aus Elektrolyse: Der Fokus zur Herstellung von "grünem" Wasserstoff lag in den letzten Jahren klar auf dieser Technologie, vor allem auf der Weiterentwicklung der PEM-Elektrolyse, die bedeutende Fortschritte gemacht hat. Diese ist insbesondere in der Lage, die durch volatile Stromerzeugung entstehenden Lastprofile zu bedienen. Daneben steht mit der Alkali-Elektrolyse eine kommerziell etablierte Alternative zur Verfügung, die geringere Investitionskosten aufweist, jedoch vor allem für den

Dauerbetrieb mit konstanter Nutzlast geeignet ist. Mit beiden Technologiealternativen sind zukünftig signifikante Kostenreduktionen realisierbar, vor allem in Abhängigkeit von den anfallenden Stromkosten für die Wasserstoffproduktion.

→ Herstellung aus Dampfreformierung mit CO₂-Speicherung (CCS – Carbon Capture and Storage, sog. "blauer" Wasserstoff): Hierbei wird das im Herstellungsprozess anfallende CO₂ aufgefangen und z.B. unterirdisch gespeichert. In Europa sind derzeit zwei Anlagen zur großflächigen CO₂-Abscheidung und -speicherung in Norwegen in Betrieb, weitere Anlagen sind im Bau bzw. in Planung (Global CCS Institute, 2019). Zukünftig werden sehr kostenkompetitive Produktionskosten erwartet, aktuelle Studien gehen davon aus, dass heutige Wasserstoff-Produktionskosten aus Dampfreformierung von 18-48% durch die zusätzliche Nutzung von CCS steigen (IEAGHG, 2017). Allerdings bestehen Bedenken angesichts der Risiken der langfristigen Speicherung einer hierdurch entstehenden großen und nur teilweise weiterverwendbaren Menge CO₂.

→ Herstellung aus Biomasse (sog. "türkiser" Wasserstoff): Auch die Nutzung von Biomasse bzw. Biogas zur Herstellung von Wasserstoff mittels Pyrolyse kann ohne oder mit nur sehr geringen CO₂-Emissionen erfolgen. Auch hier können zukünftig attraktive Produktionskosten erreicht werden, wobei auf etablierte Produktionstechnologien zurückgegriffen wird. Allerdings steht Biomasse zur Produktion von Wasserstoff zukünftig voraussichtlich nur in begrenztem Maß zur Verfügung.

→ Weitere derzeit in Erforschung bzw. erster Erprobung befindliche Technologien umfassen die direkte Produktion von Wasserstoff aus Wasser mit Solarkraft oder die biologische Herstellung

mit Algen. Auch die Gasifizierung von Abfällen zur Herstellung von Wasserstoff wird erprobt. Diese Technologien befinden sich jedoch noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium, sodass verlässliche Kostenprojektionen zurzeit kaum möglich sind.

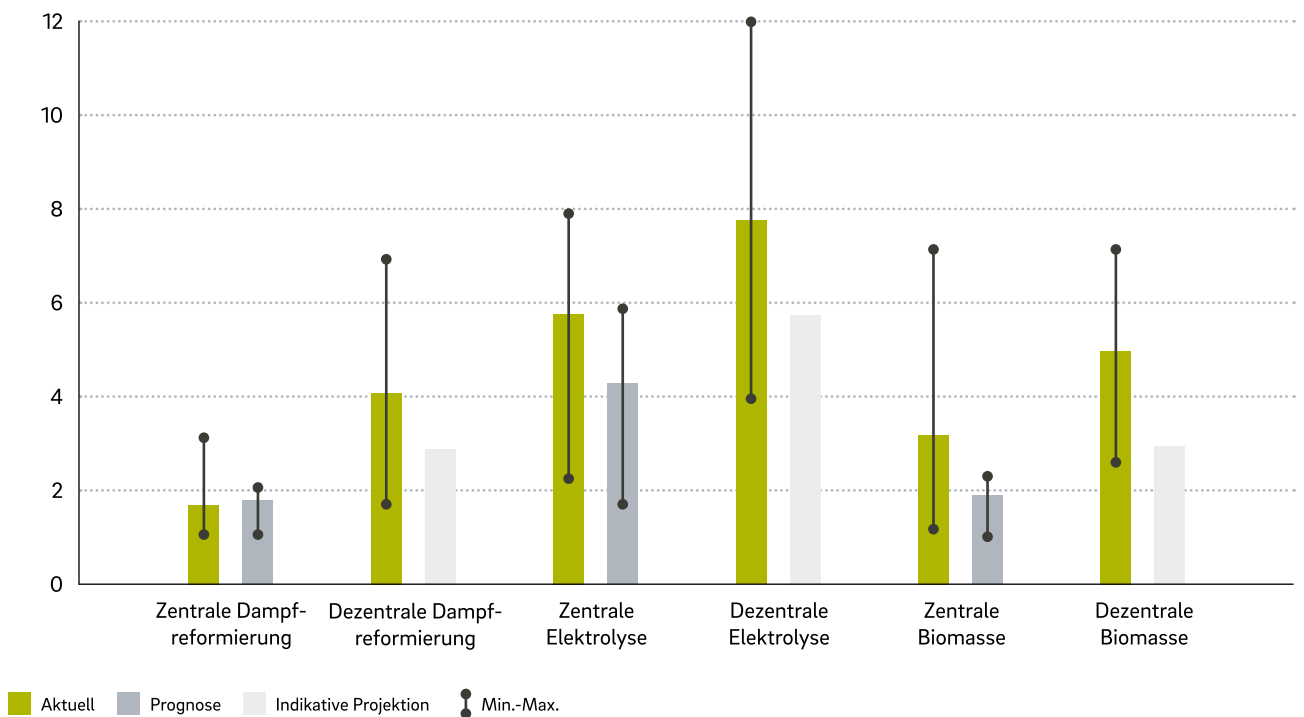
Zusätzlich fällt derzeit in einigen Produktionsprozessen der chemischen Industrie Wasserstoff als Nebenprodukt an. Auch wenn dieser Wasserstoff allgemein nicht als "grün" bzw. "sauber" angesehen wird⁴, fallen für seine Produktion keine zusätzlichen Emissionen an und er kann oft zu geringen Kosten nutzbar gemacht werden. In Regionen, in denen größere Menge solchen Wasserstoffs zur Verfügung stehen, kann dieser, ebenso wie konventionell aus Dampfreformierung hergestellter Wasserstoff, eine wichtige Rolle in der Übergangsphase hin zu einer vollständig "grünen" Wasserstoffwirtschaft spielen. Durch die Nutzung von so produziertem Wasserstoff können die Gesamteinsatzkosten der Technologie gesenkt werden, solange Skaleneffekte auf Anschaffungskosten noch nicht vollständig realisierbar sind.

Zukünftig wird voraussichtlich ein Mix verschiedener Produktionsmethoden zur Anwendung kommen, je nach lokalen Rahmenbedingungen und Potenzialen zur besonders kostengünstigen Produktion von Wasserstoff. Langfristig muss aber vollständig "grüner" Wasserstoff in allen Anwendungsfeldern genutzt werden, um das volle Potenzial der Technologie zur Emissionsreduktion zu nutzen. Generell ist dabei davon auszugehen, dass zukünftig die Produktion von Wasserstoff aus Elektrolyse mit erneuerbarem Strom den weitaus größten Anteil des benötigten Wasserstoffs bereitstellen wird. Dies wird umso mehr der Fall sein, wenn große Mengen Wasserstoff für die Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft in allen Energiesektoren benötigt werden. Gleichzeitig muss für die Deckung dieser Nachfrage der Ausbau der

erneuerbaren Energien deutlich vorangetrieben oder alternativ der Wasserstoffbedarf durch Importe gedeckt werden.

Auch wenn insbesondere die Kosten für die Herstellung von "grünem" Wasserstoff heute teilweise noch sehr hoch sind, besteht bei allen Herstellungspfaden für "grünen" Wasserstoff signifikantes Potenzial für zukünftige Kostensenkungen als wichtiger Hebel für die Erreichung einer zukünftig verbesserten Wirtschaftlichkeit der Technologie. Der europäische Industrieinteressenverband Hydrogen Europe formuliert für 2030 für die Erschließung eines Massenmarktes für "grünen" Wasserstoff das Ziel von Produktionskosten zwischen 1,5 und 3 EUR und Transportkosten von unter 1 EUR je kg H₂. Geringere Produktionskosten werden dabei für die Produktion von Wasserstoff mittels Dampfreformierung und CO₂-Speicherung (CCS – Carbon Capture and Storage), etwas höhere Kosten für die Erzeugung mit Elektrolyse angenommen. Mit diesen Zielwerten wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff kostenkompetitiv mit fossilen Treibstoffen wie Diesel oder Benzin werden kann. Entscheidend für die zukünftigen Kosten werden dabei vor allem lokale Rahmenbedingungen wie die Nutzlast der Anlagen (v.a. bei der Elektrolyse) sowie lokale Rohstoffkosten (z.B. für Strom, Biomasse, CO₂-Speicherung) sein, aus denen sich mögliche Bandbreiten für zukünftige Wasserstoff-Herstellungskosten ergeben – für die Herstellung von "grünem" Wasserstoff besteht dabei das Potenzial, Herstellungskosten von bis zu unter 2 EUR zu erreichen (Abb. 4).

⁴ Zu den Aktivitäten zur Etablierung einer klaren Zertifizierung von "grünem" Wasserstoff in Europa vgl. das von der FCH JU unterstützte Projekt "CertifHy": www.certifhy.eu.

Abbildung 4**Wasserstoff-Herstellungskosten im Vergleich [EUR/kg H₂]**

Quelle: Shell, 2017

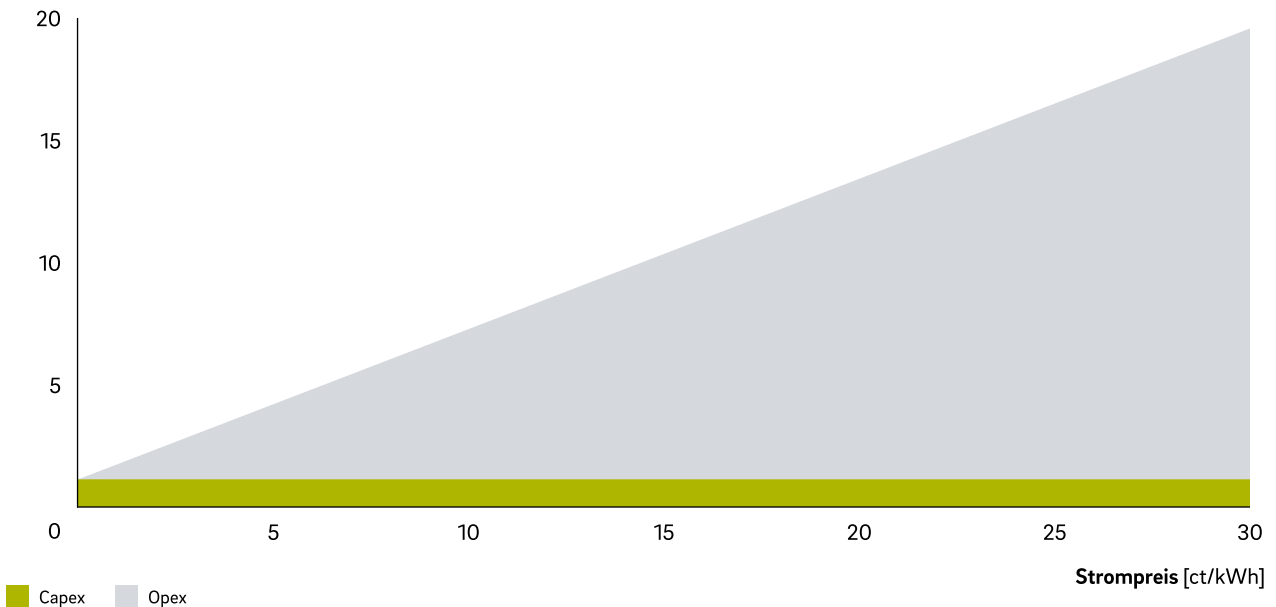
Für die Herstellung von Wasserstoff aus Elektrolyse werden zukünftig vor allem die anfallenden Stromkosten entscheidenden Einfluss auf die Wasserstoffkosten haben, wie derzeit auch vielfach in der öffentlichen Diskussion thematisiert wird. Hierbei wird in Deutschland vor allem die Befreiung von Elektrolyseuren von der EEG-Umlage bzw. die Einführung einer effektiven CO₂-Besteuerung gefordert, um die Herstellung von

Wasserstoff aus Elektrolyse bereits heute kostenkompetitiver zu machen. Auch wenn aktuelle Studien signifikante Kostenreduktionen vor allem für die hierfür benötigten PEM-Elektrolyseure voraussagen (u.a. durch die zukünftige Nutzung größerer Anlagen sowie Skaleneffekte in der Produktion), ist davon auszugehen, dass aufgrund der für die Herstellung eines Kilogramms Wasserstoff benötigten Strommenge (je nach Anlagen-

Abbildung 5

Zusammensetzung der Wasserstoffkosten für aus Elektrolyse hergestellten Wasserstoff in Abhängigkeit vom Strompreis [EUR/kg]¹

Kosten [EUR/kg]¹



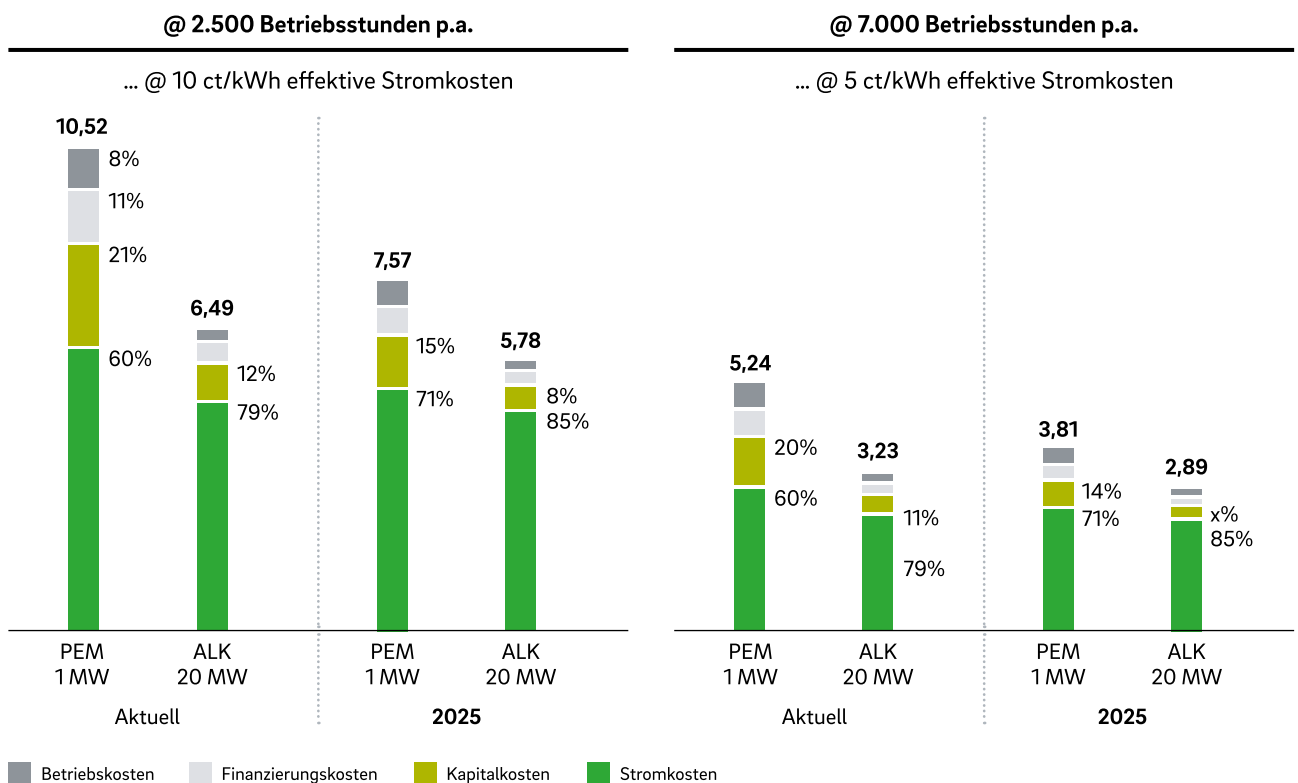
¹ PEM-Elektrolyse-Anlage mit H₂-Produktion von 3.000 kg pro Tag, 97% Nutzungsrate, Abschreibung über 10 Jahre.

Quelle: FCH 2 JU, 2018d

effizienz zwischen ca. 50 und 60 kWh/kg Wasserstoff) die Stromkosten den weitaus größten Anteil an den Gesamtproduktionskosten und damit auch am Endkundenpreis für "grünen" Wasserstoff ausmachen werden.

Daher führen beispielsweise Stromkosten von 17,09 ct pro kWh (durchschnittlicher Industriekundenstrompreis in Deutschland inkl. Steuern und Abgaben) zu reinen Wasserstoff-Produktionskosten (PEM-Elektrolyse, ohne Abschreibung für die Produktionsanlage) von ca. 11 EUR

pro kg. Verbleiben die Kosten auf diesem Niveau, ist eine breite Marktdurchdringung der Technologie nicht realistisch. Unter Berücksichtigung optimierter Lastprofile (Betriebsstunden), der Anlagengröße, der Realisierung von Skaleneffekten in der Anlagenproduktion und der Steigerung der Anlageneffizienz sowie geringeren Stromkosten für die Wasserstoff-Herstellung sind hingegen zukünftig Kostenniveaus erreichbar, die für die zukünftige Kommerzialisierung der Technologie notwendig sind (Abb. 6).

Abbildung 6**Produktionskosten für "grünen" Wasserstoff aus Elektrolyse [EUR/kg]**

Quelle: FCH 2 JU, 2018a

Zusätzliche Potenziale für die Reduzierung der Produktionskosten für "grünen" Wasserstoff aus Elektrolyse kann die Nutzung der Anlagen für verschiedene Dienstleistungen im Kontext der allgemeinen Stromnetzstabilisierung sein; prinzipiell können alle drei wesentlichen Dienstleistungsbereiche auf diesem Gebiet durch Power-to-Gas-Anlagen erbracht werden. Um hierdurch

einen spürbaren Effekt auf die Produktionskosten zu erzielen, sind ein geeigneter regulatorischer Rahmen zur dementsprechenden Nutzung der Anlagen sowie entsprechende attraktive Vergütungsmechanismen notwendig, die derzeit zwischen verschiedenen Ländern stark unterschiedlich ausfallen. In Deutschland werden vergleichsweise hohe Vergütungen gezahlt: So können

nach aktuellen Einschätzungen in Deutschland theoretisch bis zu 230.000 EUR pro MW installierte Elektrolyseursleistung (PEM) für zusätzliche Dienstleistungen eingenommen werden (unter der Annahme, dass die Erbringung dieser Dienstleistungen konfliktfrei mit der primären Wasserstofferzeugung erfolgen kann und entsprechender Bedarf an Dienstleistungen besteht). Nichtsdestotrotz muss hierbei betont werden, dass die Effekte aus solchen sekundären Umsatzquellen von PtG-Anlagen einen Anteil zur Verbesserung der Wasserstoff-Produktionskosten leisten können, der weitaus größere Hebel aber in den zur Anwendung kommenden Stromkosten liegt.

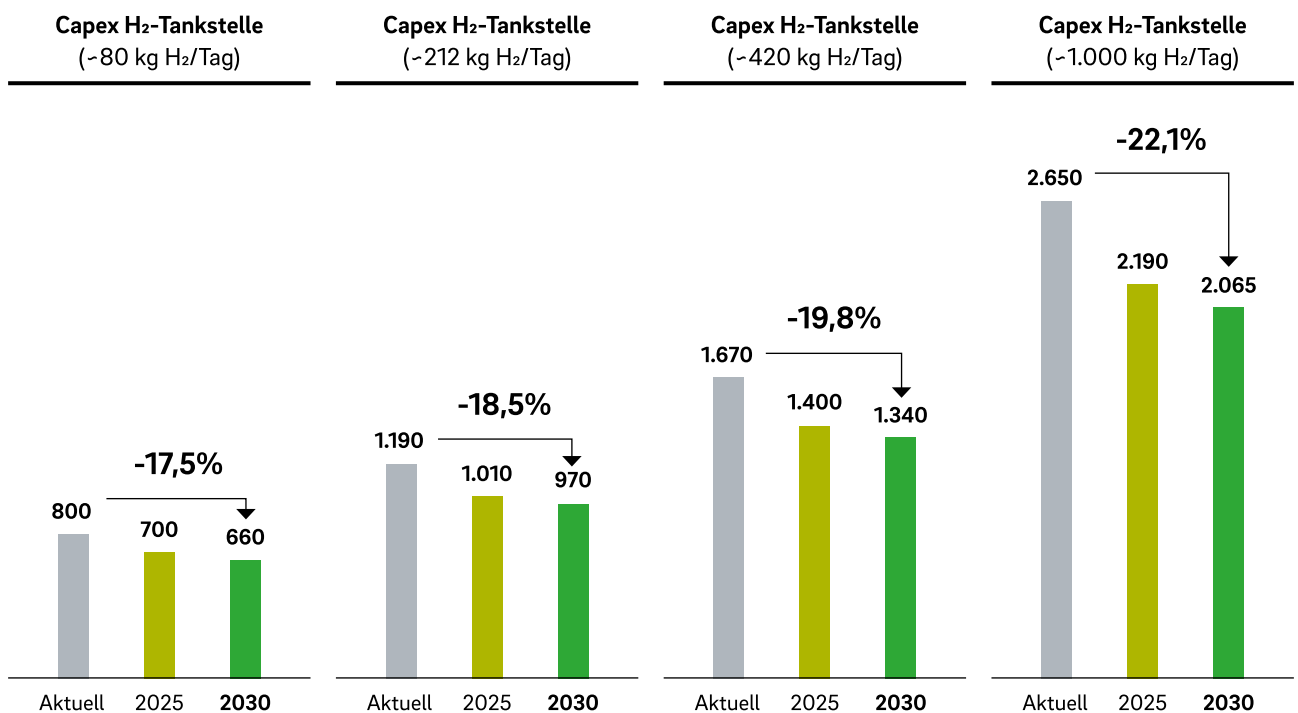
Auch bezüglich der zukünftigen Infrastruktur- und Distributionskosten müssen derzeit noch hohe Kosten deutlich reduziert werden, um die Gesamtkosten des Technologieeinsatzes signifikant zu verbessern. In den nächsten Jahren kann jedoch von deutlichen Kostenreduktionen und der Realisierung von Skaleneffekten ausgegangen werden. Heutige hohe Kosten in diesem Bereich ergeben sich vor allem durch die derzeit noch sehr hohen Investitionskosten für Wasserstoff-Tankstellen sowie teilweise aus unrentablen Logistikketten, in denen nur sehr begrenzte Mengen Wasserstoff für Demonstrationsprojekte transportiert werden, bei gleichzeitig hohen Grundinvestitionskosten für z.B. Tanks, Transportfahrzeuge, Pipelines oder Ähnliches.

Gleichzeitig sind die zukünftigen Kosten für benötigte Infrastrukturen zur Verteilung großer Mengen Wasserstoff (voraussichtlich erst nach 2030 in größerem Maßstab erforderlich), wie beispielsweise unterirdische Großspeicher, kleinere Verteilungsspeicher oder ggf. notwendige neue Pipelinenetze, derzeit nicht abschließend und verlässlich beurteilbar: Zwar bestehen im klassischen Erdgasgeschäft langjährige Erfahrungen mit dem Betrieb derartiger Infrastrukturen und den da-

mit verbundenen Investitions- und Betriebskosten, die spezifischen Bedarfe und assoziierten Kosten einer zukünftig vollumfänglich ausgebauten Wasserstoff-Infrastruktur sind jedoch bislang für Baden-Württemberg nicht vollständig bewertet worden. Generell wird derzeit davon ausgegangen, dass bestehende Erdgas-Infrastrukturen zukünftig mit hohen Synergieeffekten für die Wasserstoffversorgung nutzbar gemacht werden könnten. Absehbar notwendige Investitionen in die Umstellung dieser Infrastrukturen für Wasserstoff können aber erst klarer als heute beurteilt werden, wenn derzeit laufende Forschungs- und Demonstrationsprojekte in diesem Zusammenhang abgeschlossen und mögliche Investitionsbedarfe klarer bewertet sind.

Solche Einschätzungen gelten umso mehr bei der Bewertung der kostenmäßigen Auswirkungen hinsichtlich benötigter Infrastrukturen von Szenarien, die von einer Produktion großer Mengen in Europa benötigten Wasserstoffs z.B. in den Golf- oder anderen arabischen Staaten, in Afrika oder in Südeuropa ausgehen, wo große Mengen Sonnenenergie zu sehr geringen Energiekosten potenziell zur Verfügung stehen. Hierfür sind entsprechende Anlagen zur Verflüssigung und Re-Gasifizierung des produzierten Wasserstoffs ebenso wie Transportschiffe erforderlich, vergleichbar mit heutigen Infrastrukturen zum Transport von LNG. Solche Anlagen weisen typischerweise sehr hohe Investitionsbedarfe von mehreren Milliarden EUR auf, zudem sind die zusätzlichen Energiebedarfe und -kosten für die Verflüssigung zu beachten. Ein kosteneffizienter Betrieb solcher Infrastrukturen für Wasserstoff ist grundsätzlich nur in einem großindustriellen Produktionsmaßstab denkbar, wie er absehbar erst in langfristiger Perspektive realisiert werden wird.

Infrastrukturkomponenten, wie Tankstellen, kleinere Speichereinrichtungen bzw. Druckgasbehälter zum Transport

Abbildung 7**Prognostizierte Entwicklung der Investitionskosten für Wasserstoff-Tankstellen bis 2030 [TEUR]**

Quelle: FCH 2 JU, 2018b

mit Lkw (Stahl, ca. 200 bar) und Pipelines, sind dagegen bereits heute kommerziell im Markt verfügbar; beispielsweise betreibt Air Liquide ein Pipelinetz zur Versorgung seiner Kunden mit Wasserstoff im Ruhrgebiet. Hinsichtlich Druckgasbehältern in niedrigeren Druckbereichen aus Stahl und Pipelinekomponenten sind zukünftig keine wesentlichen Kostenreduktionen erwartbar, da diese Produkte bereits heute kommerziell

verfügbar sind. Sowohl bestimmte Komponenten von Wasserstoff-Tankstellen (v.a. Kompressoren) wie auch Druckspeicher für höhere Druckbereiche (ca. 500 bar mit Kompositmaterialien) werden derzeit aber noch technisch weiterentwickelt bzw. kommen neue technische Lösungen in den Markt, mit denen die Hersteller unter anderem die Kosten für wesentliche Infrastrukturkomponenten weiter senken wollen. Neben techni-

schen Innovationen und Verwendung neuer Materialien bestehen aber auch in diesem Bereich wesentliche Hebel zur Senkung der Investitionskosten in der weiteren Realisierung von Skaleneffekten.

Hinsichtlich der heute noch mit sehr hohen Investitionskosten verbundenen Installation von Wasserstoff-Tankstellen sind zukünftig weitere Kostenreduktionen erwartbar, da hier die zukünftige Installation größerer Anlagen, höhere Stückzahlen und Skaleneffekte sowie technologische Weiterentwicklungen (z.B. in der Kompressor- und Speichertechnik) zu weiteren signifikanten Reduzierungen der Anlagenkosten führen werden (Abb. 7).

Generell wird aber auch zukünftig mit höheren Investitionskosten für Wasserstoff-Tankstellen als für herkömmliche Tankstellen zu rechnen sein; dies ist umso mehr der Fall, wenn gerade im Schwerlastverkehr die Integration der Speicherung und Vertankung flüssigen Wasserstoffs in Tankstellenanlagen notwendig sein sollte. Trotz der im Vergleich zur Errichtung einzelner Ladepunkte für batterieelektrische Fahrzeuge hohen Kosten ist darauf hinzuweisen, dass Wasserstoff-Tankstellen eine deutlich höhere Anzahl individueller Fahrzeuge versorgen können und deren heute oftmals nicht gegebener Business Case mit der äußerst geringen Verbreitung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen zu begründen ist. Studien haben gezeigt, dass insbesondere bei höheren Anteilen von elektrischen Fahrzeugen im Gesamtfahrzeugbestand die anfallenden Infrastrukturkosten für Wasserstoff insgesamt geringer ausfallen als für die Ausstattung mit Ladeinfrastruktur für eine vergleichbare Fahrzeugmenge (Abb. 8) (Robinius et al., 2018).

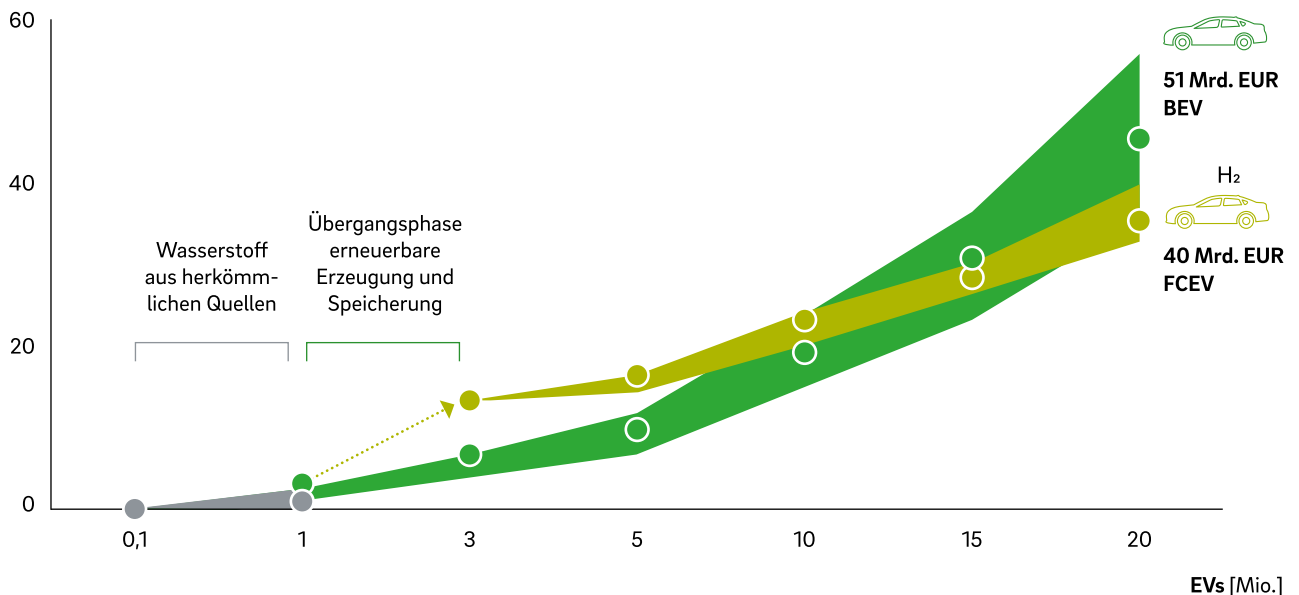
Für die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie existiert eine Vielzahl verschiedener Endanwendungen, die unterschiedliche technologische Reifegrade und Pro-

duktentwicklungsstadien aufweisen. Diese Anwendungen lassen sich entlang der folgenden wesentlichen Marktsegmente für Wasserstoff-Anwendungen strukturieren:

- Mobilität/Transport
- Gebäude (Wärme und Strom)
- Verwendung als industrieller Rohstoff
- Stromerzeugung
- Industrielle Energieerzeugung

Im Fall der Verwendung von Wasserstoff als industrieller Rohstoff ist auf die Ausführung im Abschnitt zur Wasserstoffproduktion zu verweisen. Darüber hinaus beschränkt sich die folgende Darstellung auf ausgewählte und für die weitere Marktentwicklung absehbare, besonders relevante Anwendungen, für die heute bereits belastbare Kostenabschätzungen möglich sind. Anhand von diesen Anwendungen wird das generelle Potenzial zur Realisierung von Skaleneffekten und Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Technologie illustriert.

Dabei ist generell, wie bereits erwähnt, davon auszugehen, dass für den Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Endanwendungen das Potenzial zur Realisierung von Skaleneffekten und zu einer signifikanten Kostenreduktion aktuell zu einem signifikanten Anteil noch nicht ausgenutzt wurde. Durch die heute relativ geringen verkauften Stückzahlen von Wasserstoff-Endanwendungen und Brennstoffzellen-Systemen hat ein breiterer Markthochlauf bislang noch nicht begonnen, der entsprechende Kostenreduktionen nach sich zieht. Nichtsdestotrotz wurden im Vergleich zu ersten Prototypen- oder Demonstrations-Kleinserien die Anwendungskosten bereits bis heute signifikant reduziert. Weitere signifikante Kostenreduktionen sind aber notwendig, um den Einsatz der Technologie insgesamt wirtschaftlicher zu machen und dieser zu einer breiteren Marktdurchdringung zu verhelfen.

Abbildung 8**Vergleich der kumulierten Investitionen für den notwendigen Infrastrukturaufbau [Mrd. EUR]**Kumulierte Investitionen
[Mrd. EUR]

Quelle: Robinius et al., 2018

Illustration: Nathan Stang/The Noun Project

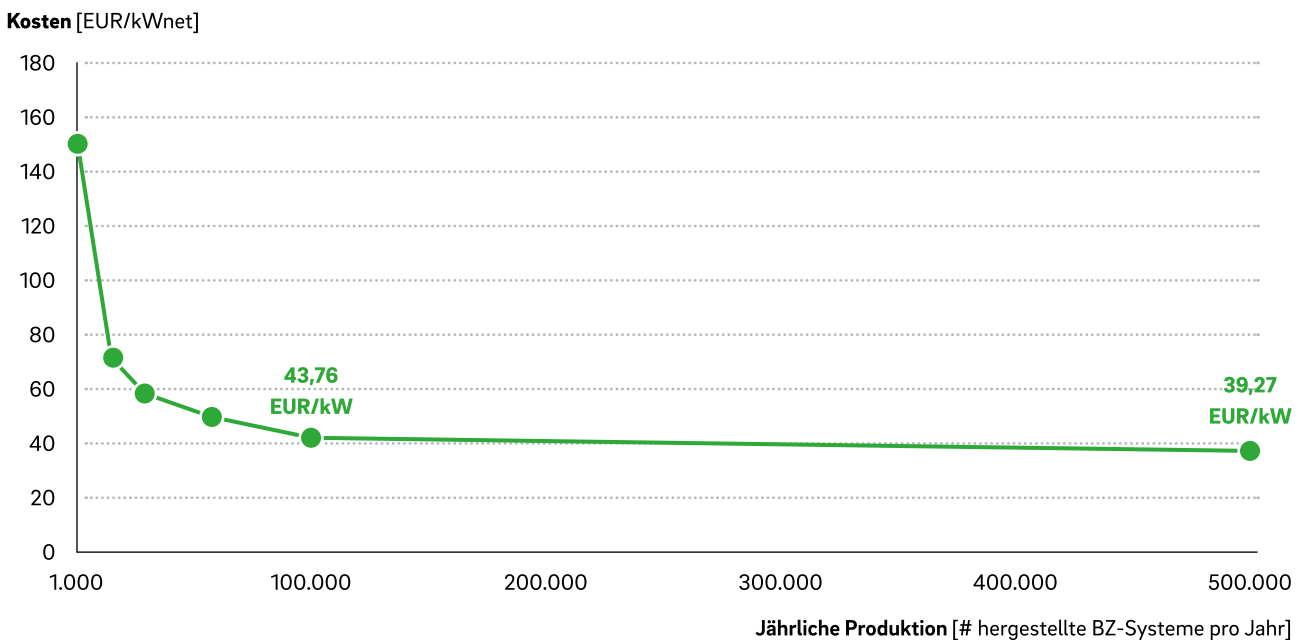
Mobilität/Transport

Grundlegende und zentrale Komponente jeder Mobilitätsanwendung, die zugleich den größten Anteil der Gesamtkosten für den Antriebsstrang ausmacht, ist das Brennstoffzellen-System selbst. Zur Reduktion der Kosten für Brennstoffzellen-Systeme wurden seitens der Industrie und der öffentlichen Fördergeber bereits wesentliche Anstrengungen unternommen, in Europa vor

allem in den von der FCH JU finanzierten Projekten Auto-Stack und Auto-Stack-Core, die in Deutschland seit 2017 durch das Projekt Autostack-Industry fortgesetzt werden. Dabei konnten zwar bereits wesentliche Fortschritte erzielt werden, eine Serienproduktion von Brennstoffzellen-Stacks und -Systemen mit Realisierung entsprechender Skaleneffekte wurde bislang allerdings nicht etabliert. Daher ist in Baden-Württemberg am Standort Ulm die Realisierung des Projekts HyFab

Abbildung 9

Kostenprojektion von Brennstoffzellen-Systemen in Abhängigkeit der jährlichen Produktion am Beispiel eines 80-kW-Pkw mit technischer Performance, die 2020 voraussichtlich erreicht wird [EUR/kW_{net}]



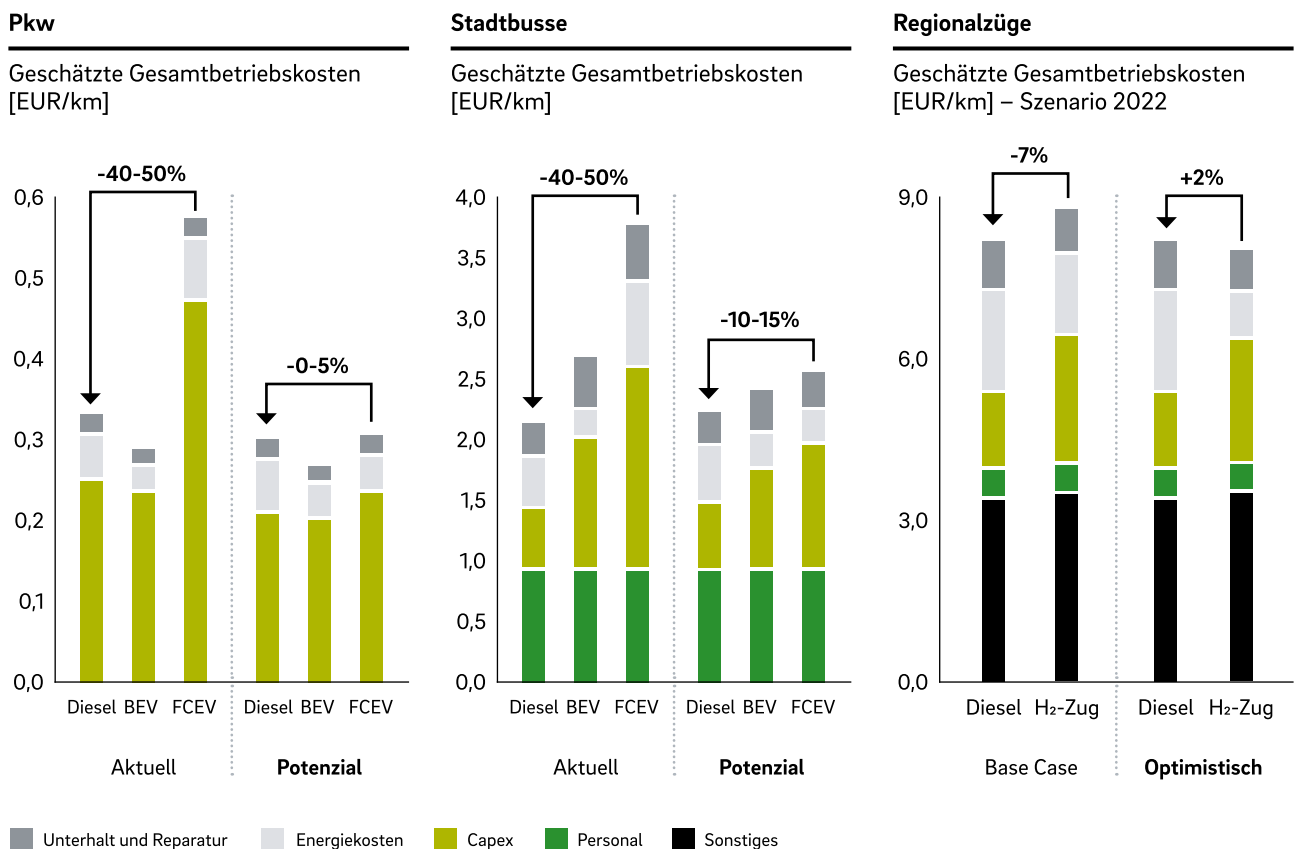
Quelle: US DOE, 2018

geplant, das die Voraussetzungen für eine zukünftige Serienproduktion von Brennstoffzellen-Systemen schaffen soll (Staatsministerium Baden-Württemberg, 2019).

Analysen der Systemkosten von Pkw-Brennstoffzellen in Abhängigkeit der jährlichen Produktionsrate zeigen die enormen Skaleneffekte, die mit zunehmenden Stückzahlen in den nächsten Jahren realisiert werden können. Die größten Einspareffekte ergeben sich bei der Steigerung der jährlichen Produktionsrate auf bis zu 100.000

Fahrzeuge. Auch im Lkw-Segment zeigt sich ein ähnliches Bild (US DOE, 2018). Dies zeigt, dass asiatische Hersteller, wie beispielsweise Toyota, die eine zukünftige Serienproduktion von 30.000 Pkw pro Jahr angekündigt haben, in den kommenden Jahren substantielle Kosteneinsparungen erzielen werden können (Abb. 9).

Diskussionen der letzten Jahre zur Anwendung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie sowie deren Kosten und infrastrukturellen Herausforderungen ha-

Abbildung 10**TCO für verschiedene Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Mobilitätsanwendungen [EUR/km]**

Quelle: FCH 2 JU, 2018b; Shift2Rail & FCH 2 JU, 2019

ben sich v.a. auf den Pkw-Bereich erstreckt und hierbei Probleme für eine breite Marktdurchdringung thematisiert (z.B. die schlechteren Wirkungsgrade in der Energienutzung und die komplexere Technik im Vergleich mit der Batterietechnologie sowie die höhere Komplexi-

tät des Infrastrukturausbaus); diese Diskussionen haben sich auch auf die Entwicklung der Technologie in anderen Anwendungsbereichen ausgewirkt. Zuletzt erkennt die öffentliche Diskussion aber an, dass die Batterie- sowie die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie

sich im Pkw-Bereich als ergänzende Technologien darstellen und die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie insbesondere im Schwerlast- bzw. hohen Betriebsanforderungsbereich deutliche Vorteile aufweist, da entsprechende Anforderungen mittels Batterietechnik kaum oder gar nicht zu bedienen sind. Wenngleich aufgrund des generell sehr großen Marktvolumens der Pkw-Bereich für die weitere Kommerzialisierung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie auch wichtig ist, sind es vor allem Anwendungen aus dem Schwerlast- und Nutzfahrzeugbereich, die nach Einschätzung von Unternehmen und Experten ein wesentliches Marktpotenzial für die Technologie darstellen, da deren Anforderungen durch die Batterietechnologie nicht oder nur teilweise bedient werden können.

Dementsprechend gehört das Segment der Stadtbusse für den ÖPNV zu denjenigen Anwendungen, in denen bereits umfängliche Erfahrungen mit der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie gesammelt wurden. EvoBus mit dem Produktionsstandort Mannheim gehört hierbei zu den Pionieren der Branche. Wenngleich von den ersten Prototypen die Anschaffungskosten für Brennstoffzellen-Busse bereits um ca. 80% gesenkt werden konnten, sind weitere signifikante Reduktionen notwendig, um einen flächendeckenden Einsatz zu ermöglichen. Während signifikante Kostenreduktionen mit dem weiteren Markthochlauf zu erwarten sind, liegen die erwartbaren Gesamtbetriebskosten auch zukünftig ca. bis zu 10% über denen konventioneller Dieselbusse.

Mit Wasserstoff betriebene Züge stellen ebenfalls ein interessantes Marktsegment für die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie dar, das in den letzten Jahren vermehrte Aufmerksamkeit erhalten hat und derzeit führend in Deutschland im Realeinsatz erprobt wird. Auch in Baden-Württemberg wird der Einsatz er-

wogen. Bedingt durch die hohen Infrastrukturkosten für die Elektrifizierung der ca. zu 50% nichtelektrifizierten Eisenbahnstrecken in Deutschland, ist der Einsatz der Technologie hier auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine sinnvolle Alternative zur Dekarbonisierung. Der Einsatz von Wasserstoffzügen ist absehbar mit nur geringen Kostenunterschieden zum Dieselmotor möglich, unter günstigen Rahmenbedingungen sind sogar Kosteneinsparungen möglich (Abb. 10).

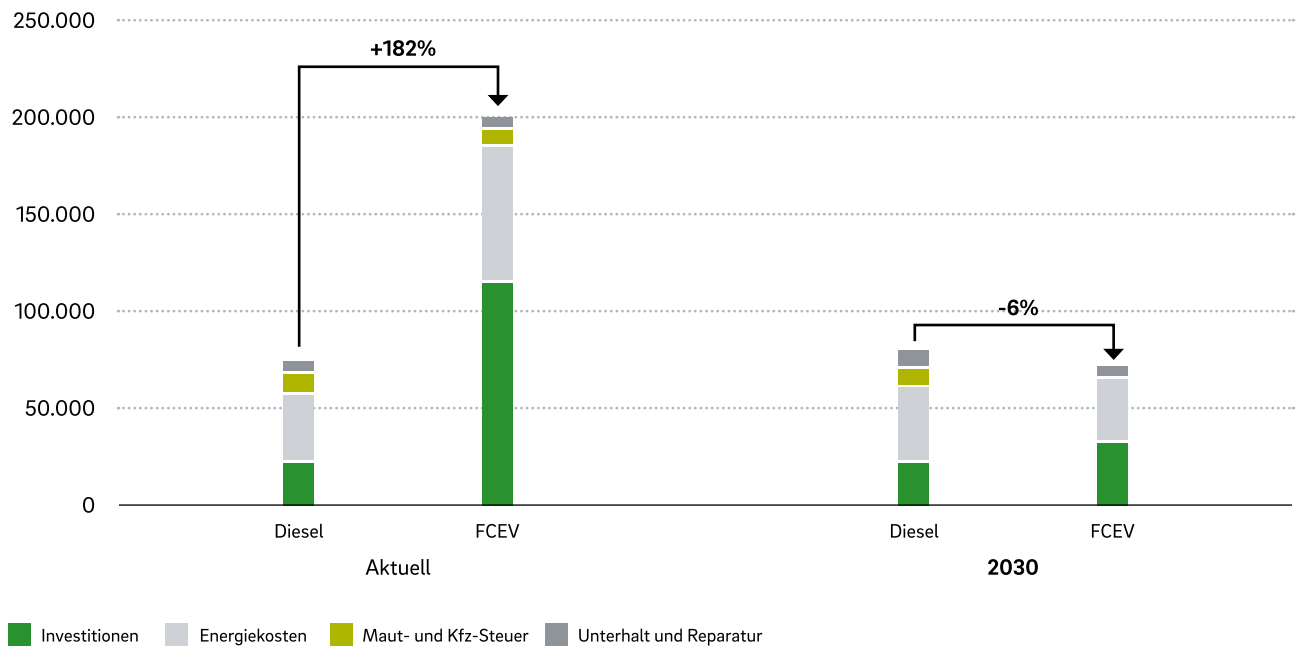
Auch in den Bereichen der leichten bis mittelschweren Nutzfahrzeuge sowie im Schwerlaststraßenverkehr wird der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie mittelfristig signifikantes Marktpotenzial zugeschrieben. Bis heute sind allerdings nur sehr wenige Modelle im Markt, die entweder in kleinen Stückzahlen oder als Demonstrations- bzw. Prototypen verfügbar sind (z.B. ca. 250 umgerüstete Renault Kangoo von Symbio, Plan zur zusätzlichen Ausstattung der Streetscooter der Deutschen Post mit Brennstoffzellen-Range Extender, Concept Sprinter F-CELL von Mercedes-Benz Vans, Crafter-Studie von VW, Pläne von Nikola Motors in Kooperation mit Iveco für Wasserstoff-Lastwagen etc.). Verlässliche Kostenvoraussagen sind daher derzeit nur begrenzt möglich. Eine Studie von e-mobil BW (2017) kommt bei der Analyse der Lebenszykluskosten zum Ergebnis, dass 2030 Wasserstoff-Lkw Kostenparität mit Diesel-Lkw erreichen können, vorausgesetzt sie profitieren von einer Maut- und Kfz-Steuerbefreiung und sind in Serienproduktion mit entsprechend hohen Stückzahlen verfügbar (Abb. 11).

Zusätzliches Marktpotenzial für die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie besteht in weiteren Nischenanwendungen, wie z.B. Straßendienstfahrzeugen, Abfallentsorgungsfahrzeugen, Baustellenfahrzeugen sowie weiteren vergleichbaren Spezialfahrzeugen

Abbildung 11

Vergleich der Gesamtbetriebskosten (TCO) für Diesel- und Brennstoffzellen-Lkw mit 18 t zGG 2015 und 2030 [EUR/Jahr]

Kosten [EUR/km]



Quelle: e-Mobil BW, 2017

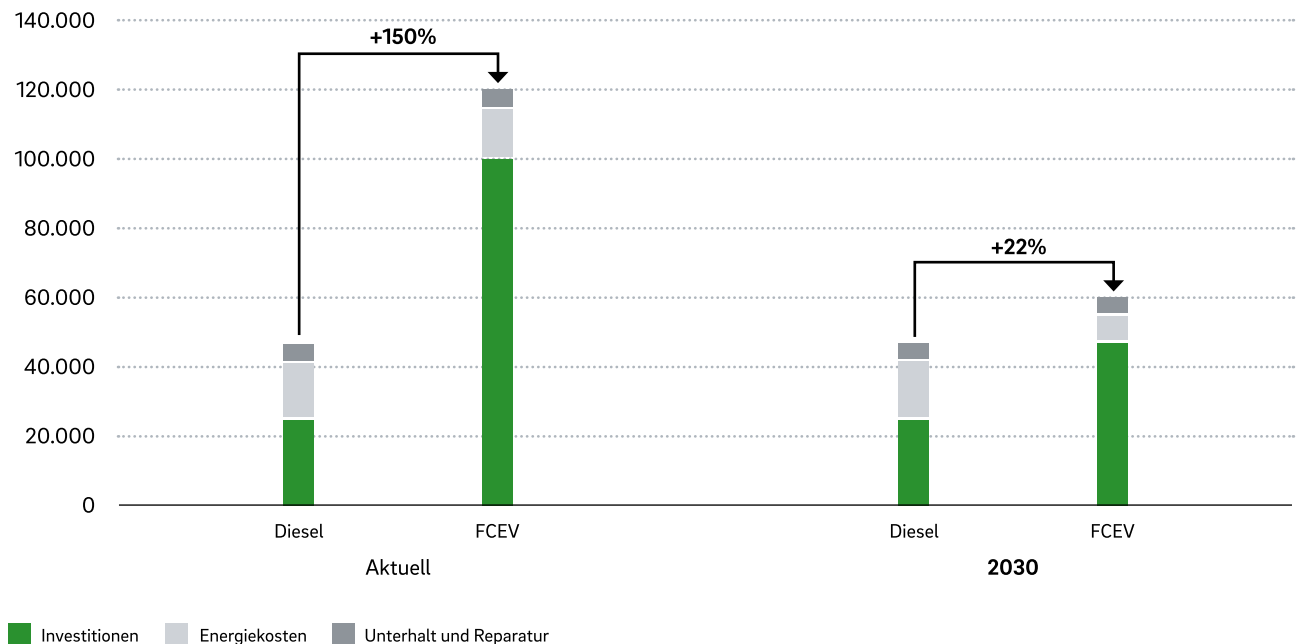
wie Ground-Handling-Fahrzeugen an Flughäfen oder Lastfahrzeugen für Häfen. Verstärktes Interesse hat in der letzten Zeit auch der Einsatz der Technologie im maritimen Bereich, z.B. auf Fähren, gewonnen. Daneben wird die Anwendbarkeit der Technologie im Flugverkehr erforscht. In allen diesen Segmenten existieren bislang, wenn überhaupt, erste Prototypen im Testeinsatz.

Eine Lebenskostenzyklusanalyse für Abfallentsorgungsfahrzeuge von e-Mobil BW (2017) kommt zu dem Ergebnis, dass auch 2030 in diesem speziellen Anwendungsfall noch keine Kostenparität mit konventionellem Dieselantrieb möglich sein wird, selbst unter Einbeziehung aller Kostenreduktionen der einzelnen Komponenten und des verwendeten Wasserstoffs (Abb. 12).

Abbildung 12

Vergleich der Gesamtbetriebskosten (TCO) für Diesel- und Brennstoffzellen-Abfallentsorgungsfahrzeuge 2015 und 2030 [EUR/Jahr]

Kosten [EUR/km]



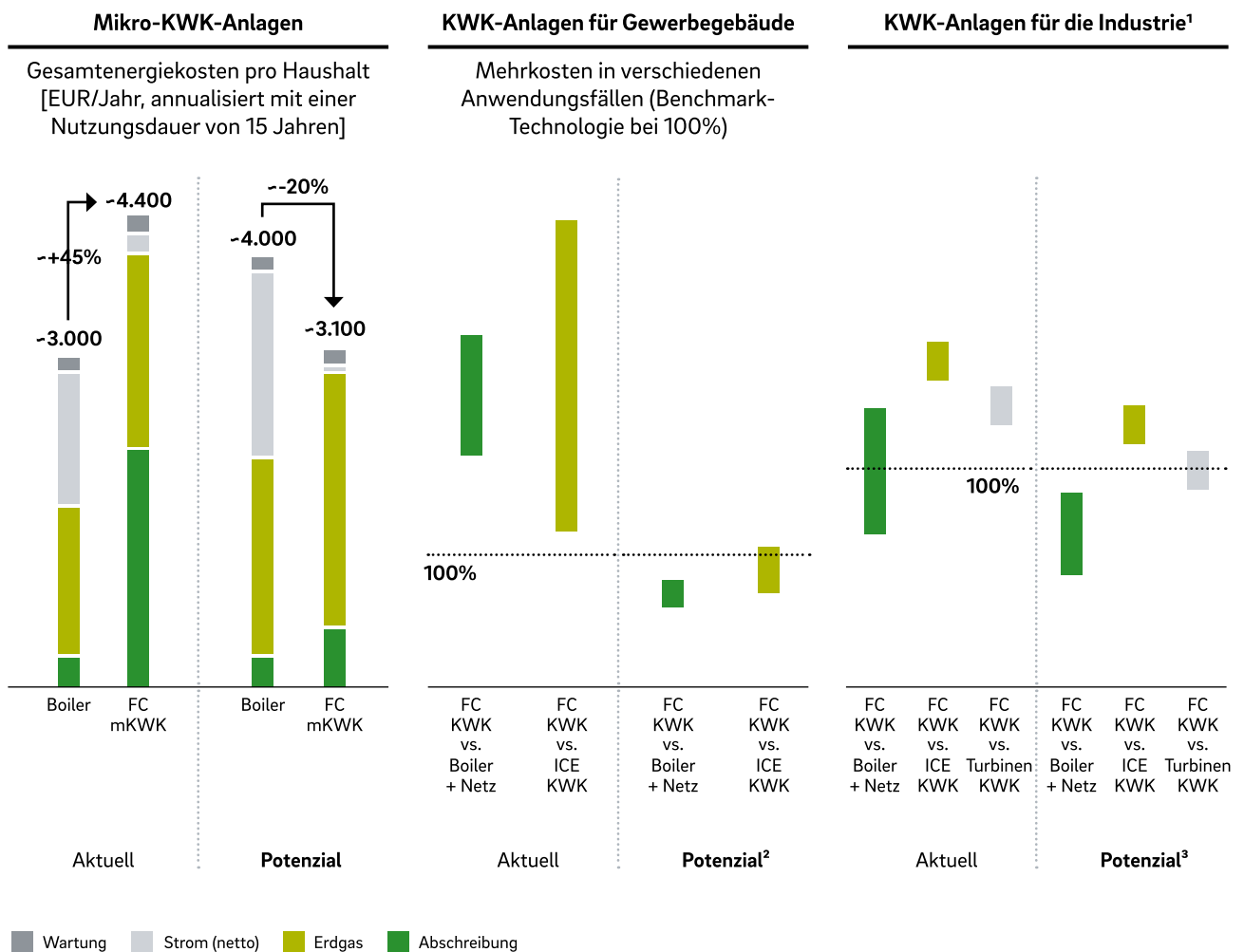
Quelle: e-Mobil BW, 2017

GEBÄUDEWÄRME UND STROM

Die Entwicklung von stationären Brennstoffzellen zur dezentralen Energieversorgung (Wärme und Strom) ist vor allem für die Versorgung von Individualhaushalten mit kleinen KWK-Modulen bereits weit fortgeschritten, wenngleich die meisten derzeit verwendeten Modelle Erdgas als Grundrohstoff zur Energieerzeugung nutzen

(und dadurch nicht emissionsfrei sind und nicht auf der Nutzung erneuerbarer Energie beruhen). In Zukunft ist allerdings der Betrieb auch allein auf Wasserstoffbasis möglich.

Während KWK-Anlagen für Individualhaushalte heute noch ca. 45% teurer in den Gesamtbetriebskosten sind als herkömmliche Energieerzeugungsmethoden, sind

Abbildung 13**Kostenvergleich für verschiedene KWK-Anwendungen [EUR/km]**¹ Am Beispiel eines Chemiewerks; ICE = Internal Combustion Engine (Verbrennungsmotor).² Signifikante Volumina benötigt, hier z.B. 5.000 kumulierte Einheiten je Hersteller (im Idealfall unterstützt durch Synergien durch andere stationäre Brennstoffzellensegmente).³ Signifikante Volumina benötigt, hier bis zu 50 MW installierte Kapazität je Nutzer.

Quelle: FCH 2 JU, 2018b

zukünftig signifikante Kostenreduktionen möglich, die eventuell zu deutlichen Einsparungen gegenüber der herkömmlichen Boiler-Technologie führen.

Auch für größere Anlagen, z.B. für große Gebäudekomplexe oder Industrieanlagen, werden stationäre Brennstoffzellen-Anwendungen bereits eingesetzt und können zukünftig einen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten. Dennoch muss der Markt für KWK-Anlagen in Industrie und Gewerbe in Europa zu einem Großteil erst noch entwickelt werden, während die asiatischen und amerikanischen Märkte bereits weiter entwickelt sind. Hier können sich zukünftig ebenfalls signifikante Kostenreduktionen ergeben (Abb. 13).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für die Realisierung der oben beschriebenen möglichen Skaleneffekte und Kostenreduktionen und damit für die Ermöglichung einer verbesserten und in Teilen wettbewerbsfähigen Wirtschaftlichkeit der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie in allen Segmenten ein weiteres signifikantes Marktwachstum erforderlich ist. Dieses weitere Marktwachstum bedarf insbesondere in den nächsten Jahren, wenn die Technologiekosten zunächst weiterhin noch hoch sind, öffentlicher Förderung, um Produkte in den Markt zu bringen und die Produktionszahlen zu erhöhen. Ohne deren Steigerung werden sich die beschriebenen Kostenreduktionen nicht verwirklichen lassen. Gleichzeitig muss die Industrie zielgerichtet in die Senkung der Anwendungskosten investieren und auch preislich attraktive Produkte im Markt anbieten, die eine wachsende Zahl an Käufern finden.

Marktentwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen- Technologie





Die weltweite Nachfrage nach Wasserstoff hat sich seit 1975 mehr als verdreifacht und wächst kontinuierlich weiter (IEA, 2019). Bis heute besteht der weltweite Wasserstoffmarkt aber fast ausschließlich aus dem Handel mit konventionell erzeugtem Wasserstoff, der als Rohstoff und Industriegas in verschiedenen industriellen Fertigungsprozessen verwendet wird (beispielsweise in Raffinerien oder der chemischen Industrie). Der Marktanteil von regenerativ erzeugtem "grünen" Wasserstoff und Produkten der Brennstoffzellen-Industrie, die eine Realisierung der Potenziale von Wasserstoff als erneuerbarem Energieträger ermöglichen (vgl. Kap. 2.1), ist dagegen derzeit noch gering. In den vergangenen Jahren nimmt der Anteil in wichtigen globalen Leitmärkten jedoch kontinuierlich zu und verschiedene Länder weltweit haben ambitionierte Ziele zum Ausbau der Nutzung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff und Brennstoffzellen-Anwendungen in den nächsten Jahren formuliert. Gleichzeitig hat eine wachsende Anzahl von Unternehmen, die zum Beispiel im internationalen Industrieverband Hydrogen Council und seinem europäischen Pendant Hydrogen Europe organisiert sind, "grünen" Wasserstoff und Brennstoffzellen als zukünftig relevantes Geschäftsfeld identifiziert und investiert in wachsenden Volumina in die Technologie. Bis 2030 und vor allem danach erwarten Unternehmen und Branchenexperten weltweit ein signifikantes Marktwachstum für Wasserstoff und Brennstoffzellen und den Start der Entwicklung eines globalen Massenmarktes, der signifikante wirtschaftliche Potenziale für die in ihm tätigen Unternehmen bereithält.

Für den Markthochlauf von regenerativ erzeugtem Wasserstoff und dessen Anwendungen fehlen teilweise noch politische und regulatorische Rahmenbedingungen, die den Aufbau eines wettbewerbsfähigen Geschäftsmodells und die Kommerzialisierung der Technologie

sowie ein signifikantes Marktwachstum ermöglichen. Im Mobilitäts- und Verkehrssektor, in dem Wasserstoff-Anwendungen bereits in Kleinserie produziert werden und der ein wichtiges Marktsegment für die Entwicklung der Technologie darstellt, konzentriert sich die Marktentwicklung alternativer Antriebe derzeit vor allem auf massive Investitionen in die Batterietechnologie, die im Zentrum öffentlicher Debatten zur Null-Emissions-Energienutzung steht und heute bereits über ein vergleichsweise breites und kommerziell besser verfügbares Produktportfolio, vor allem im Pkw-Bereich, verfügt. Gleichzeitig gehen wichtige Unternehmen davon aus, dass mit einer breiteren Marktdurchdringung von Null-Emissions-Antrieben und der steigenden Notwendigkeit, auch Fahrzeuge mit anspruchsvollen Nutzprofilen und im Schwerlastbereich zu elektrifizieren, Wasserstoff und Brennstoffzellen eine immer wichtigere Rolle spielen werden, die mit höheren Produktionsvolumina und Brennstoffzellen-Fahrzeugen auf Straße, Schiene, Wasser und möglicherweise auch in der Luft einhergehen wird.

Der Blick auf die weltweiten Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen zeigt, dass die Anzahl an Ländern, die sich ambitionierte Ziele zur Förderung der Technologien setzen sowie nationale Strategien zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft formulieren, kontinuierlich wächst. Als führende Märkte weltweit sind insbesondere die derzeitigen Leitmärkte Japan, Südkorea, China, USA (insb. Kalifornien) und Deutschland/Europa anzuführen, die die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie seit mehreren Jahren intensiv fördern, unter anderem durch hohe staatliche Subventionen. Darüber hinaus weiten wichtige Industrieunternehmen ihre Aktivitäten im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie aus oder steigen neu in das entstehende Geschäftsfeld ein, vor allem in den Bereichen Energiespeicherung und Anwendungen für den Mobili-

täts- und Verkehrssektor. Führende Energie-, Transport- und Industrieunternehmen gründeten auf dem Weltwirtschaftsforum in Davos im Januar 2017 einen Wasserstoffrat, den Hydrogen Council, der mit 60 Mitgliedsunternehmen inzwischen den weltweit größten Zusammenschluss von Unternehmen zur Weiterentwicklung der Wasserstoffwirtschaft darstellt. Vorangetrieben wird die Entwicklung der Technologie in den vergangenen Jahren auch durch länderübergreifende Zusammenschlüsse von Unternehmen und Forschungsinstitutionen sowie durch Public-Private-Partnerships.

In einem Report zur Zukunft von Wasserstoff, der für die G20-Tagung der Umwelt- und Energieminister in Japan im Juni 2019 verfasst wurde, betont die Internationale Energieagentur (IEA), dass aufgrund der hohen internationalen Aufmerksamkeit, die der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie in Politik und Wirtschaft derzeit zukommt, aktuell der richtige Zeitpunkt sei, um das Potenzial von Wasserstoff für eine saubere, sichere und kosteneffiziente energiewirtschaftliche Zukunft zu evaluieren und dessen Realisierung und großflächige Anwendung zu starten (IEA, 2019). Diese Einschätzung kann aus Sicht der Studie und der in ihrem Rahmen interviewten relevanten Unternehmens-Stakeholder aus Baden-Württemberg deutlich unterstrichen werden. Die Unternehmen erwarten in den nächsten Jahren einen sich beschleunigt entwickelnden Markt, der auch in seiner Hochlaufphase zunehmend kommerziell attraktiv wird und in dem sie sich für die Zukunft positionieren wollen. Eine solche frühzeitige Positionierung im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Markt, der Aufbau von Technologiekompetenzen, das Vorantreiben von Innovationen sowie der Aufbau von Produktionskapazitäten durch weitere und verstärkte Investitionen in den nächsten Jahren sind wichtige Voraussetzungen für baden-württembergische Unternehmen, um sich wettbewerbsfähig im Markt zu positionieren und relevante

Marktanteile zu sichern. Infolge der weltweit wachsenden Bedeutung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie im Rahmen der Energiewende, der steigenden Aktivitäten wichtiger Industrieunternehmen in diesem Bereich sowie der zunehmend zuträglichen Rahmenbedingungen ist mittel- und langfristig in allen relevanten Märkten mit einem signifikanten Marktwachstum zu rechnen.

Im Folgenden wird ein Überblick über aktuelle Rahmenbedingungen für den Markthochlauf von Wasserstoff und Brennstoffzellen sowie über mittel- und langfristige Marktentwicklungsszenarien bis zu den Jahren 2030 und 2050 für den globalen, europäischen, deutschen und baden-württembergischen Markt gegeben. Für die Bewertung der zukünftigen wirtschaftlichen Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie für den Industrie- und Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg ist aufgrund der starken Exportorientierung der lokalen Wirtschaft insbesondere die Marktentwicklung in Gesamteuropa (mit Deutschland als wichtigem Leitmarkt) sowie global mit den zentralen Leitmärkten in Ostasien (China, Japan, Südkorea) und in Nordamerika (v.a. Kalifornien) relevant⁵. Ein Fokus bei der Betrachtung der möglichen Marktentwicklung im Rahmen dieser Studie wird auf den Mobilitäts- und Verkehrssektor gelegt, dem eine Schlüsselrolle beim Aufbau der Wasserstoffwirtschaft zugeschrieben wird und der für den Industriestandort Baden-Württemberg eine zentrale Rolle spielt⁶.

⁵ Mit einer Exportquote von 39,7% (Stand 2018) gilt Baden-Württemberg derzeit als exportstärkstes Bundesland (Statistisches Landesamt BW, 2019a).

⁶ Rund ein Drittel der deutschen Unternehmen der Automobilindustrie ist in Baden-Württemberg ansässig, weshalb der Mobilitäts- und Verkehrssektor eine zentrale Bedeutung für das Bundesland hat (Clusterportal BW, 2019). Die resultierende Kernkompetenz Baden-Württembergs im Mobilitäts- und Verkehrssektor bestätigte unter anderem auch die im Rahmen der Studie durchgeführte Online-Umfrage, bei der von allen teilnehmenden Unternehmen "Mobilität" als klare Stärke des Industriestandorts Baden-Württemberg hervorgehoben wurde.

Über die zukünftige Marktentwicklung von Wasserstoff und Brennstoffzellen existieren je nach zugrunde gelegten Annahmen unterschiedliche Prognosen, die teilweise deutlich voneinander abweichen. Als Grundlage für die im Folgenden betrachteten mittel- und langfristigen Marktentwicklungsszenarien wurden die Marktstudien des Hydrogen Council und des Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), zwei der weltweit größten Initiativen im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen, herangezogen (Hydrogen Council, 2017; FCH 2 JU, 2019). Im Rahmen dieser Studien wurden Marktentwicklungsszenarien für 2030 und 2050 für den globalen und europäischen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Markt über alle relevanten Sektoren erstellt. Die dort prognostizierten Szenarien repräsentieren aus Sicht der Studie den derzeit aktuellsten und breitesten Überblick über die zukünftige Marktentwicklung von Wasserstoff und Brennstoffzellen und beruhen wesentlich auf den Einschätzungen der weltweit führenden Unternehmen im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen, die einen direkten Einblick in den aktuellen Markt sowie dessen Entwicklung haben und deren eigene Investitionsentscheidungen wesentlich von der Markteinschätzung abhängen. Die dort entwickelten Szenarien werden daneben von weiteren Marktstudien, teilweise zu einzelnen Marktsegmenten, der letzten Jahre bestätigt (Shift2Rail & FCH 2 JU, 2019; FCH 2 JU, 2018a; FCH 2 JU, 2018b; FCH 2 JU, 2018c). Auch die im Rahmen der Studie durchgeführten Experteninterviews sowie die Online-Umfrage unter baden-württembergischen Unternehmen der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie bestätigen mit ihrer grundsätzlichen Perspektive auf die weitere Marktentwicklung die durch den Hydrogen Council und das FCH JU entworfenen Marktentwicklungsszenarien.

Aufgrund einer Vielzahl von Einflussfaktoren, wie beispielsweise der weiteren technologischen Entwicklung und des jeweils aktuellen Stands des Umbaus des Ener-

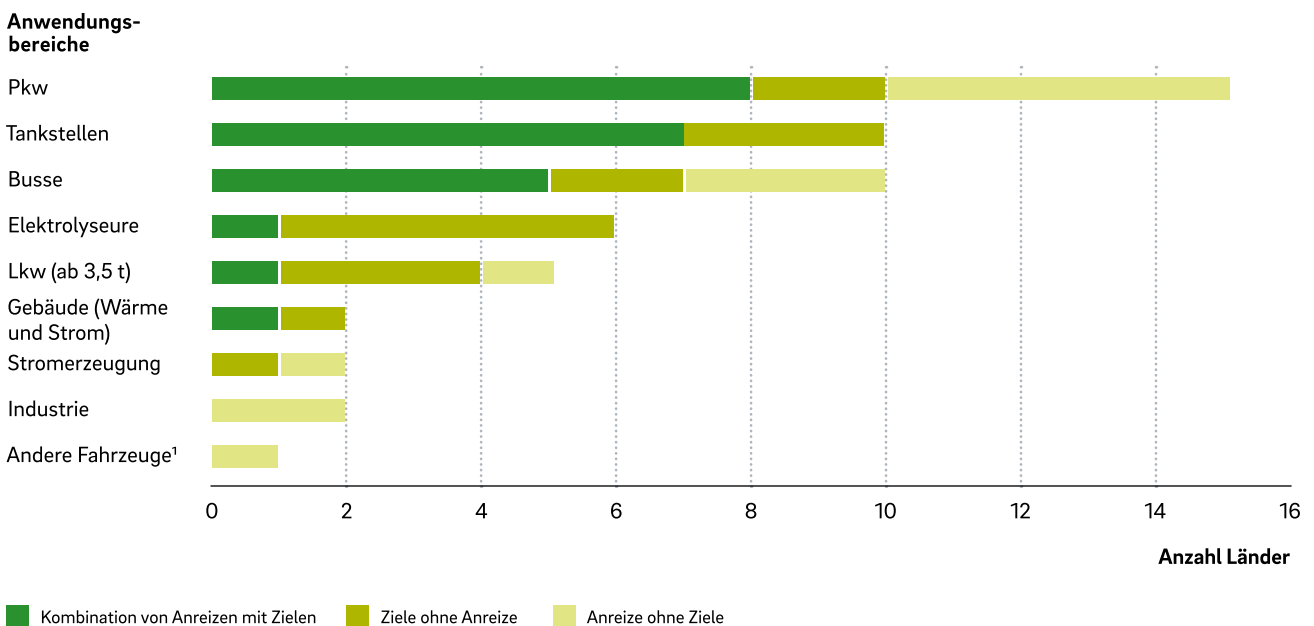
giesystems insgesamt, sind Prognosen zur Entwicklung des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktes nichtsdestotrotz mit Schwierigkeiten verbunden und müssen daher – insbesondere in der Langfristperspektive bis 2050 – mit entsprechenden Einschränkungen und unter Berücksichtigung der jeweils aktuellen politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen betrachtet und bewertet werden.

3.1

Globale Marktentwicklung

Die globale Marktentwicklung von Wasserstoff und Brennstoffzellen wird zukünftig maßgeblich von den Zielen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen bestimmt, die auf der Pariser Klimakonferenz im Jahr 2015 beschlossen wurden. Alle 197 Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention unterzeichneten das Pariser Klimaabkommen und stimmten damit zu, umfassende Maßnahmen zu ergreifen, um die globale Erderwärmung unter 2 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu halten, und die Bemühungen zu intensivieren, den Temperaturanstieg in diesem Jahrhundert noch weiter auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen (United Nations, 2015)⁷. Die Erreichung dieser Ziele erfordert weltweit einen Umbau der Energiesysteme sowie eine Dekarbonisierung zentraler Energieverbrauchssektoren, bei denen Wasserstoff und Brennstoffzellen eine bedeutende Rolle eingeräumt wird (vgl. z.B. IEA, 2019; Hydrogen Council, 2017 sowie Kap. 2.1).

⁷ Im November 2019 reichten die USA, die zu den weltweit größten CO₂-Emittenten gehören, jedoch die Kündigung des Klimaabkommens ein, welche Ende 2020 wirksam wird und deren Auswirkung auf die globalen Klimaziele, deren Erreichung und Implikationen für den Aufbau einer Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Wirtschaft noch unklar sind.

Abbildung 14**Politisches Engagement zur Unterstützung des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktes nach Anwendungen**

Quelle: IEA, 2019

¹ z.B. leichte Nutzfahrzeuge (bis 3,5 t)

Global wird die Marktentwicklung inzwischen von einer wachsenden Anzahl von Ländern vorangetrieben, die die Entwicklung und Anwendung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie durch politische Maßnahmen und Investitionen fördern. Dabei beschränkt sich die staatliche Unterstützung nicht auf einzelne Marktsegmente, sondern oftmals werden breite Strategie- und Förderansätze verfolgt. Innerhalb der G20 und der Europäischen Union (EU) haben bis heute elf Länder politische Initiativen zur Förderung der Wasserstoff- und

Brennstoffzellen-Technologie in Kraft gesetzt, neun haben bereits konkrete nationale Fahrpläne für die Entwicklung und Anwendung der Technologie definiert (IEA, 2019). Die Maßnahmen umfassen entweder konkrete Ziele für bestimmte Anwendungsbereiche von Wasserstoff und Brennstoffzellen, unterschiedliche Formen von Anreizsetzungen (z.B. Kaufprämien für Brennstoffzellen-Fahrzeuge) oder Kombinationen aus konkreten Zielen und Anreizen. Die aktuellen Fördermaßnahmen der Länder betreffen die Hauptanwen-

dungsbereiche Mobilität und Verkehr, Wasserstoff-Infrastruktur (insb. Aufbau von Tankstelleninfrastrukturen), Wasserstoff-Herstellung und Power-to-Gas, Gebäude (Wärme und Strom), Stromerzeugung und Industrie. Abb. 14 gibt einen Überblick über die aktuelle globale Förderung von verschiedenen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen. Anwendungen im Mobilitäts- und Verkehrssektor, insbesondere Pkw, Busse und Lkw, werden derzeit am stärksten gefördert, was das Potenzial unterstreicht, das Wasserstoff und Brennstoffzellen zukünftig in diesem Bereich zugesprochen wird.

Eine herausragende Bedeutung bei der Entwicklung des globalen Wasserstoffmarktes kommt den derzeitigen Leitmärkten Japan, Südkorea, China, USA (insb. Kalifornien) und Deutschland/Europa zu. Die genannten Länder bzw. Regionen haben sich bereits heute ambitionierte Ziele für den Markthochlauf gesetzt und fördern diesen unter anderem durch wegweisende Public-Private-Partnerships, die Unterstützung von Pilotprojekten und durch zielgerichtete Investitionen. Das Förderspektrum reicht von Zuschüssen für Forschung und Entwicklung über Investitionen in den Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur bis hin zur Ankurbelung der Nachfrage durch öffentliche Aufträge:

- **Japan:** Die Regierung Japans integrierte 2017 bereits bestehende Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Projekte in eine nationale Wasserstoffstrategie mit ambitionierten Zielen. Die Strategie sieht bis 2030 unter anderem 5,3 Mio. Brennstoffzellen in Häusern, 800.000 Brennstoffzellen-Fahrzeuge, darunter 1.200 öffentliche Busse mit Brennstoffzellenantrieb, auf den Straßen vor (Kölling, 2019; METI, 2017).
- **Südkorea:** Südkorea möchte durch intensive Ankurbelung der Wasserstoffwirtschaft bis 2040 unter anderem 6,2 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeu-

ge produzieren, davon 3,3 Mio. für das eigene Land, und 940.000 Haushalte mit Brennstoffzellen versorgen. Die Regierung kündigte im Oktober 2019 des Weiteren an, bis 2022 drei Wasserstoff-Pilotstädte realisieren zu wollen, die mit Brennstoffzellen mit einer Gesamtleistung von 9,9 MW und 700 Brennstoffzellen-Fahrzeugen (davon 670 Pkw und 30 Busse) ausgestattet werden sollen (DWV, 2019a; The Korea Herald, 2019).

- **China:** Auch China fördert die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie seit mehreren Jahren intensiv. Bereits 2016 wurden in der "Energy Saving and New Energy Vehicle Technology Roadmap" nationale Ziele für die Entwicklung von Brennstoffzellen und den Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur festgelegt (NOW, 2019). Darüber hinaus verfolgt die chinesische Regierung den Plan, bis 2030 eine Flotte von 1 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeugen auf die Straße zu bringen, und subventioniert Brennstoffzellen-Fahrzeuge und Tankstellen massiv⁸.
- **USA:** Die USA gewähren steuerliche Vorteile für die Speicherung von CO₂ in geologischen Lagerstätten und setzen Anreize für die Umwandlung von CO₂ in andere Produkte, z.B. durch Kombination mit Wasserstoff. In Kalifornien wurde des Weiteren bereits 1999 das "California Fuel Cell Partnership" gegründet, eine Public-Private-Partnership, die

⁸ Käufer in 17 Provinzen erhalten laut einem Bericht der South China Morning Post in diesem Jahr Zuschüsse in Höhe von bis zu 160.000 Yuan (rund 20.600 EUR) pro Brennstoffzellen-Pkw bzw. bis zu 400.000 Yuan (rund 51.500 EUR) für Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge. Zudem vergeben die lokalen Behörden in zehn Städten Subventionen in Höhe von bis zu 4 Mio. Yuan (rund 515.000 EUR) für den Bau jeder Wasserstoff-Tankstelle. Daneben sollen die Kosten für Brennstoffzellen-Systeme bis 2025 auf 4.000 Yuan (rund 515 EUR, jeweils Umrechnungskurs Yuan in EUR vom 24.11.2019) pro Kilowatt gesenkt werden (Ng, 2019). Im Oktober 2019 wurde bekannt, dass die chinesische Regierung bis Ende 2020 die staatlichen Subventionen durch die Zentralregierung für Brennstoffzellen-Fahrzeuge jedoch beenden und im Anschluss nur noch auf lokale Förderungsprogramme setzen möchte (Li, 2019).

sich für die Erweiterung des Marktes für Brennstoffzellen-Fahrzeuge einsetzt (IEA, 2019).

- **Deutschland:** Deutschlands Bundesregierung hat sich in dem im Oktober 2019 vorgelegten Klimaschutzprogramm 2030 klar zur Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie bekannt. Zudem kündigte die Bundesregierung die Vorstellung einer nationalen Wasserstoffstrategie an, die sich die Förderung der weiteren Entwicklung und breiten Anwendung der Technologie zum Ziel setzt. Bereits seit 2006 fördert die Bundesregierung darüber hinaus über das "Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie" (NIP) Pilotprojekte mit finanziellen Mitteln in Höhe von mittlerweile über 1 Mrd. EUR.

Neben Deutschland fördern in Europa auch zunehmend weitere Länder die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie mit gezielten Projekten und Fördermaßnahmen, so beispielsweise Frankreich und Norwegen:

- **Frankreich:** Im Juni 2018 stellte der französische Umweltminister einen Strategieplan vor, der unter anderem vorsieht, Wasserstoff in verschiedene Wirtschaftsbereiche zu integrieren. Bis 2023 sollen unter anderem 100 Wasserstoff-Tankstellen in Frankreich errichtet und 5.000 leichte sowie 200 schwere Nutzfahrzeuge (wie Busse und Lkw) auf die Straße gebracht werden. Die Vorhaben sollen mit 100 Mio. EUR staatlich gefördert werden (Bönnighausen, 2018).
- **Norwegen:** Norwegen verfügt über mehrere Instrumente, um die Wasserstoff-Nutzung zu fördern, darunter das staatliche Programm PILOT-E, im Rahmen dessen die Entwicklung einer wasserstoffbetriebenen Hochgeschwindigkeitsfähre und eines Kurzstreckenfrachtschiffs unterstützt wird. Die Regierung arbeitet außerdem an einer Wasserstoffstrategie für die Bereiche

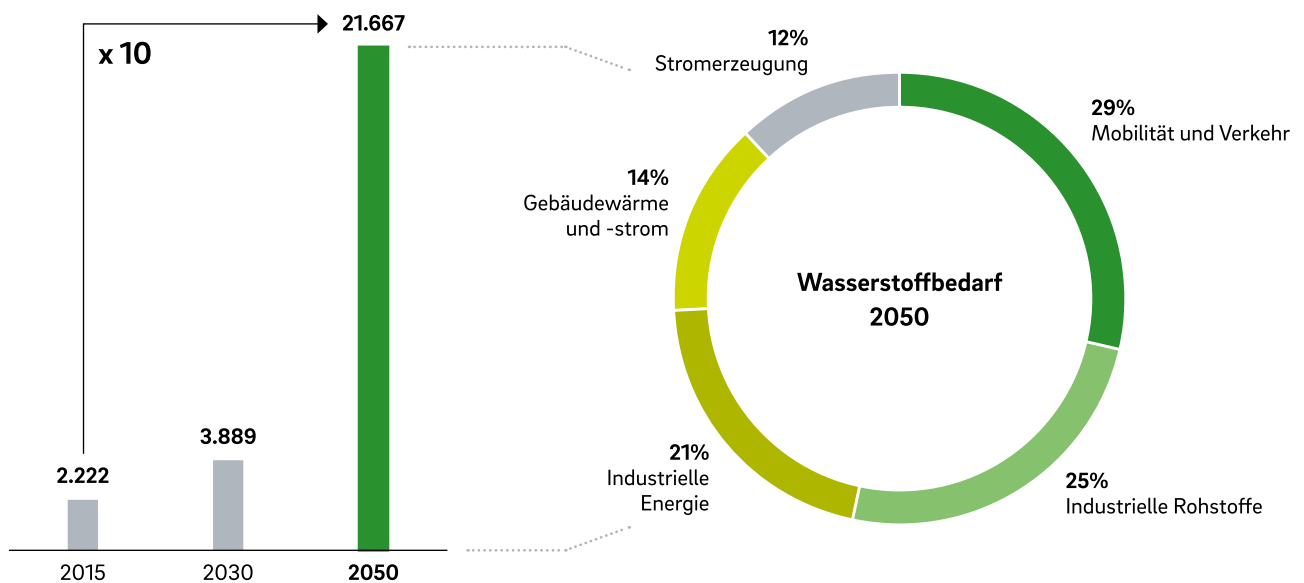
Forschung, Entwicklung, Kommerzialisierung und Nutzung (IPHE, 2019).

ZUKÜNFTIGE MARKTENTWICKLUNG

Auf Basis aktueller Marktprognosen sowie der Einschätzung relevanter internationaler Unternehmen der Branche sowie auch der baden-württembergischen Industrie kann mittel- und langfristig von einer weltweit signifikanten Marktentwicklung über alle wesentlichen Leitmärkte hinweg im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen ausgegangen werden.

2015 betrug die globale Wasserstoffnachfrage rund 2.200 TWh des Endenergiebedarfs. Bis 2030 kann von einem moderaten Wachstum der Nachfrage nach Wasserstoff auf rund 3.900 TWh ausgegangen werden (Hydrogen Council, 2017). Die Entwicklung des Massenmarktes wird für die Folgejahre erwartet: Bis 2050 wird eine Verzehnfachung der jährlichen Nachfrage gegenüber 2015 auf rund 21.700 TWh (18% des globalen Endenergieverbrauchs) prognostiziert – damit wird ein deutliches Marktwachstum erwartet, ohne dass die Rolle von Wasserstoff am gesamten globalen Energiebedarf als überproportional hoch angenommen wird. Abbildung 15 zeigt auf, wie sich der Wasserstoffbedarf 2050 auf die zentralen Sektoren Mobilität und Verkehr, Gebäude (Wärme und Strom), Stromerzeugung und Industrie (Energie und Rohstoffe) aufteilt. Während Wasserstoff aktuell fast ausschließlich in Industrie- und Raffinerieprozessen zum Einsatz kommt, wächst dessen Bedeutung in den anderen Sektoren in den kommenden Jahrzehnten nach aktuellem Stand deutlich. Fast ein Drittel der Nachfrage wird 2050 für den Sektor Mobilität und Verkehr erwartet.

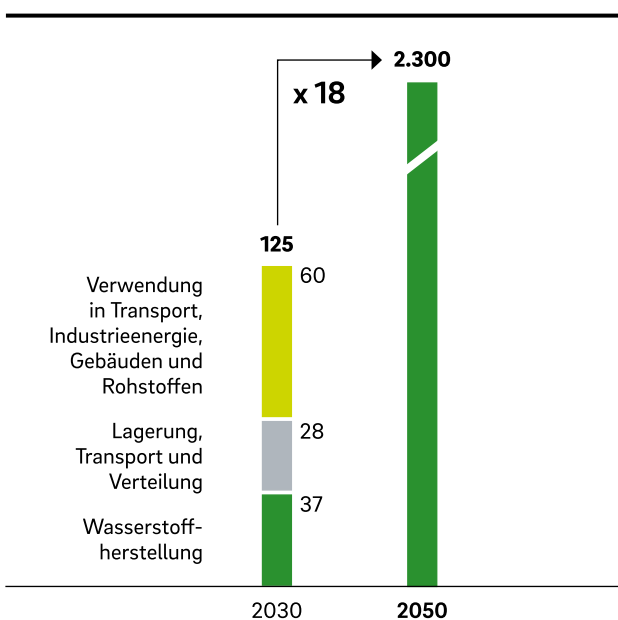
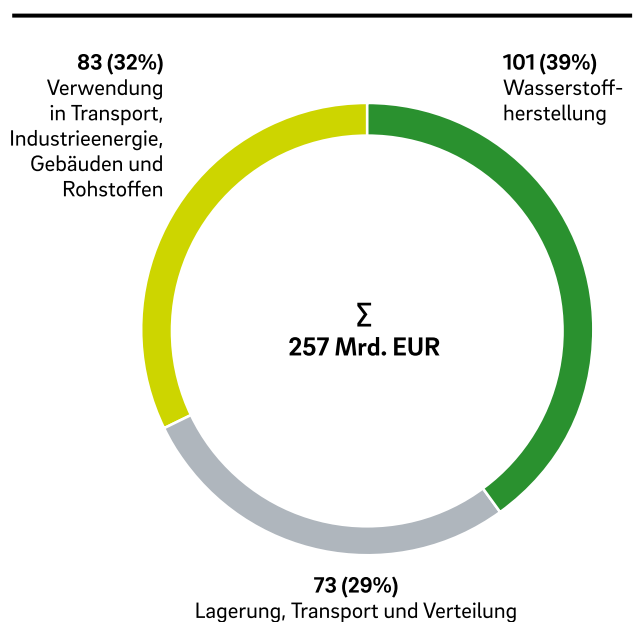
Diese Entwicklung der Wasserstoffnachfrage geht mit einem starken erwarteten Umsatzwachstum im Markt

Abbildung 15**Prognostizierte Entwicklung der globalen Wasserstoffnachfrage [TWh]**

Quelle: Hydrogen Council, 2017

einher. Das Volumen des globalen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktes (inkl. Equipment und Anwendungen) wird vom Hydrogen Council 2030 auf rund 125 Mrd. EUR geschätzt. Wie Abbildung 16 zeigt, wird dabei das größte Umsatzpotenzial auf Ebene der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen erwartet, danach folgen die Wasserstoff-Herstellung und Wasserstoff-Infrastruktur, d.h. Lagerung, Transport und Verteilung von Wasserstoff. Durch eine solche Marktentwicklung könnten weltweit bis 2030 rund 1,5 Mio. Arbeitsplätze

in der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie entstehen. Im Vergleich zum ambitionierten Marktentwicklungsszenario für den europäischen Markt bis 2030 (siehe nachfolgenden Abschnitt) ist diese Prognose als eher moderat einzustufen; gleichzeitig liegt sie über dem europäischen Business-as-usual-Szenario. Geht man von einem schnellen Markthochlauf in den kommenden Jahren aus, können der Umsatz und die Entwicklung der Arbeitsplätze in der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie bis 2030 weltweit noch deut-

Abbildung 16**Prognostizierte globale Wasserstoffmarktentwicklung in den Bereichen Umsatz und Investitionen****Jahresumsatz [Mrd. EUR¹]****Investitionsbedarf bis 2030 [Mrd. EUR¹]**

Quelle: Hydrogen Council, 2017

¹ Umrechnungskurs USD in EUR vom 30.09.2019 (1 USD = 0,9175 EUR).

lich höher ausfallen: Auf Basis einer Hochrechnung des ambitionierten europäischen Szenarios auf den weltweiten Markt sind bereits bis 2030 weltweite Umsätze von bis zu 300 Mrd. EUR möglich, wodurch bis zu 4,5 Mio. Arbeitsplätze entstehen können.

Ambitionierter im Vergleich zu den Prognosen für Europa sind die Annahmen des Hydrogen Council für den globalen Markt 2050: Langfristig (bis 2050) wird die Entwicklung eines globalen Massenmarktes mit einer Markt-

größe von bis zu 2,3 Bill. EUR sowie 30 Mio. Arbeitsplätzen erwartet (Abb. 16). Diese Entwicklung setzt jedoch bis 2050 einen signifikanten Markthochlauf in allen Sektoren voraus, der über die zentralen Leitmärkte hinausreicht und den globalen Markt flächendeckend umfasst.

Ein dynamischer Ausbau des globalen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktes bis hin zur Realisierung der Vision eines kommerziellen Massenmarktes bis 2050 erfordert kontinuierliche Investitionen, insbesondere

seitens Regierungen und Industrieunternehmen, vor allem in den nächsten Jahren. Kumuliert sind bis 2030 rund 257 Mrd. EUR Investitionen notwendig, um die weitere Marktentwicklung wie prognostiziert voranzubringen. Wie Abbildung 16 aufzeigt, müssen entlang der Wertschöpfungskette vor allem Investitionen in den Ausbau von Kapazitäten zur Herstellung von Wasserstoff (z.B. Power-to-Gas-Anlagen), in die benötigte Infrastruktur (z.B. Tankstellen) sowie in die Entwicklung der verschiedenen Anwendungssegmente und den Aufbau benötigter Produktionskapazitäten fließen.

Eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktes kommt dem Mobilitäts- und Verkehrssektor zu. Da Wasserstoff eine zentrale Rolle bei der Dekarbonisierung wichtiger Transportanwendungen spielen kann und vor allem bei Großanwendungen und im Schwerlastbereich sowie bei anspruchsvollen Nutzungszyklen derzeit keine vielversprechenden technologischen Alternativen zur Verfügung stehen, ist eine starke Entwicklung in der Anwendung der Technologie und der Nachfrage nach Wasserstoff in diesem Segment zu erwarten. Dieses Marktsegment ist auch für die heutige baden-württembergische Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie von entscheidender Bedeutung (vgl. Kap. 4.1) und birgt die größten wirtschaftlichen Potenziale für die lokalen Unternehmen.

Im Jahr 2018 wies der globale Brennstoffzellen-Fahrzeugbestand in allen Segmenten weniger als 13.000 Fahrzeuge auf (AFC TCP, 2019). Dies könnte sich in absehbarer Zeit ändern. Für die wichtigen Fahrzeugsegmente Pkw, Busse, Lkw (große Transporter ab einem Gewicht von 3,5 t) und leichte Nutzfahrzeuge (kleine Transporter bis zu einem Gewicht von 3,5 t) kann in den kommenden Jahren ein starker Anstieg des jährlichen Absatzes an Brennstoffzellen-Fahrzeugen erwartet werden (Abb. 17):

- **Brennstoffzellen-Pkw:** Im Jahr 2030 könnten weltweit etwa 4 Mio. Brennstoffzellen-Pkw verkauft werden, was etwa 3% des erwarteten Gesamtabsatzes entspricht. Bis zum Jahr 2050 könnte der jährliche Absatz auf 45 Mio. Brennstoffzellen-Pkw bzw. 35% des erwarteten Gesamtabsatzes ansteigen.
- **Brennstoffzellen-Busse:** Für Brennstoffzellen-Busse wird für das Jahr 2030 ein weltweiter jährlicher Absatz von ca. 20.000 Fahrzeugen prognostiziert, was einem Anteil von bis zu 10% am erwarteten Gesamtabsatz im Segment Busse entspricht. Dieser Anteil könnte bis 2050 auf etwa 30% bzw. auf einen jährlichen Absatz von 60.000 Brennstoffzellen-Bussen ansteigen.
- **Brennstoffzellen-Lkw:** Der Anteil an Brennstoffzellen-Lkw am Lkw-Gesamtabsatz 2030 könnte rund 3% betragen und bis 2050 auf einen Anteil von 25% ansteigen.
- **Leichte Nutzfahrzeuge:** Für leichte Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge werden Anteile von knapp 6% am Absatz in 2030 und bis zu 50% in 2050 prognostiziert. Neben dem Schwerlastverkehr kann daher vor allem im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge von einer wichtigen Rolle von Wasserstoff und Brennstoffzellen zur Dekarbonisierung ausgegangen werden.

Für den Brennstoffzellen-Fahrzeugbestand bedeutet diese Entwicklung einen signifikanten Zuwachs: Bis 2030 könnten weltweit bereits 10 bis 15 Mio. Pkw und 500.000 Lkw mit Wasserstoff betrieben werden. Langfristig (bis 2050) könnten weltweit mehr als 400 Mio. Brennstoffzellen-Pkw, 15 bis 20 Mio. Brennstoffzellen-Lkw und 5 Mio. Brennstoffzellen-Busse (entspricht einem Anteil von etwa 25% am Gesamtbestand des jeweiligen Segments) zum globalen Fahrzeugbestand gehören. Baden-Württembergs starke Ausrichtung auf die

Abbildung 17**Prognostizierter jährlicher Absatz Brennstoffzellen-Fahrzeuge, 2030 und 2050**
[% des jeweiligen Segments]

Quelle: Hydrogen Council, 2017

Automobilindustrie bietet hierbei optimale Voraussetzungen, um von der erwarteten Marktentwicklung in diesem Bereich zu profitieren.

Zu dieser Entwicklung tragen unter anderem ehrgeizige nationale Ziele für Brennstoffzellen-Fahrzeuge bei, die derzeit insbesondere die asiatischen Leitmärkte sowie Kalifornien verfolgen. Japan nutzt die Olympischen Spiele 2020 in Tokyo als Gelegenheit, um Technologie und Markt anzukurbeln. Die gesamte olympische Fahrzeugflotte soll mit Wasserstoff fahren, darüber hinaus sollen 2020 40.000 Brennstoffzellen-Fahrzeuge und bis 2030 800.000 Brennstoffzellen-Fahrzeuge auf die Straße gebracht werden (METI, 2017) (Abb. 18). Auch China hat entsprechend ambitionierte Maßnahmen ergriffen: Der chinesische Markt soll von 5.000 Brennstoffzellen-

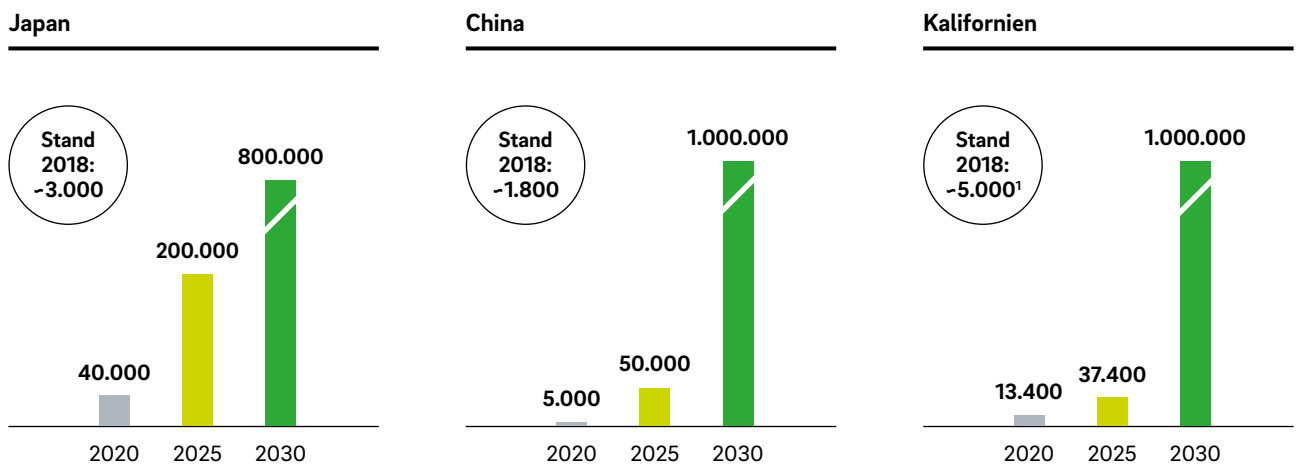
Fahrzeugen im Jahr 2020 auf etwa 1 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeuge im Jahr 2030 wachsen (Ng, 2019; AFC TCP, 2019) (Abb. 18)⁹. Auch Kalifornien, in dem derzeit die meisten Brennstoffzellen-Fahrzeuge im Einsatz sind, möchte bis 2030 bereits 1 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeuge auf die Straßen bringen (AFC TCP, 2019).

Angesichts des aktuellen Bestands an Brennstoffzellen-Fahrzeugen in den betrachteten Märkten erscheinen diese Ziele teilweise noch ambitioniert, insbesondere in der Perspektive bis 2030. Gelingt es den Ländern jedoch,

⁹ Jedoch könnte die Verkündung der chinesischen Regierung von Oktober 2019, die bislang gewährten staatlichen Subventionen für Brennstoffzellen-Fahrzeuge ab 2021 einstellen zu wollen, Auswirkungen auf das ambitionierte Ziel für 2030 haben (Li, 2019).

Abbildung 18

Ambitionen in Bezug auf den Brennstoffzellen-Fahrzeugbestand in Japan, China und Kalifornien bis 2030
 [# Fahrzeuge]



¹ Geschätzter Gesamtbestand in Kalifornien auf Basis von AFC TCP (2019) und California Air Resource Board (2018).
 Quelle: AFC TCP, 2019

durch Allianzen aus Regierung und Herstellern in absehbarer Zeit Kostenreduktionen zu erzielen und die Produktionsvolumina zu erhöhen, könnte der Markthochlauf schnell vorangetrieben werden, da die Technik und Produktion der Brennstoffzellen-Fahrzeuge, insbesondere in Japan, schon weit fortgeschritten ist und beispielsweise Toyota die Serienfertigung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen vorantreibt.

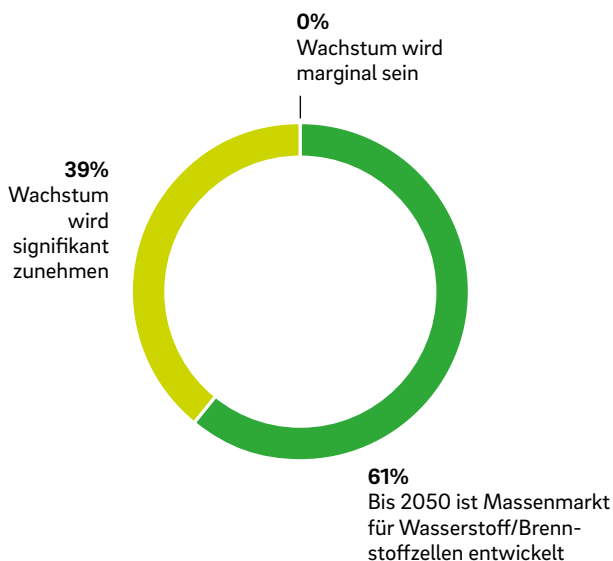
Das Erreichen der ambitionierten Ziele der Länder weltweit setzt auch einen kontinuierlichen Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur voraus. Um die für das Jahr

2030 prognostizierte weltweite Zahl an Brennstoffzellen-Fahrzeugen auf den Straßen mit Wasserstoff zu versorgen, müssten weltweit etwa 15.000 Wasserstoff-Tankstellen bereitstehen. Dies setzt massive Investitionen in den Ausbau des Tankstellennetzes von ungefähr 18 Mrd. EUR bis zum Jahr 2030 voraus.

Von einer starken weltweiten Marktentwicklung gehen auch Unternehmen und Forschungsinstitutionen in Baden-Württemberg aus. Die Ergebnisse der Experteninterviews und der Online-Umfrage zeigen, dass diese langfristig bis 2050 durchweg mit einem signifikanten

Abbildung 19**Einschätzung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktentwicklung bis 2050 im Rahmen der Online-Umfrage [% je Antwortkategorie]**

FRAGE: "Wie schätzen Sie die weitere Marktentwicklung von Wasserstoff und Brennstoffzellen bis 2050 ein?" (n = 31)



Quelle: Roland Berger

Marktwachstum bis hin zur Entwicklung eines Massenmarktes rechnen (Abb. 19).

Eine starke Entwicklung der Wasserstoffnachfrage erwarten die befragten Akteure mittelfristig dabei ebenfalls insbesondere für den Mobilitäts- und Verkehrssektor. Dabei fällt bei Betrachtung der Umfrageergebnisse auf, dass das stärkste Marktwachstum bis 2030 im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen für die Segmente Lkw und

Busse erwartet wird, während weniger als ein Drittel der Teilnehmer davon ausgeht, dass der Pkw-Sektor sich weltweit am stärksten entwickeln wird (Abb. 20). Ein Grund für dieses Ergebnis ist das hohe Potenzial, das Wasserstoff und Brennstoffzellen im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge zugesprochen wird. Brennstoffzellen-Fahrzeuge können weitere Distanzen zurücklegen als batteriebetriebene Fahrzeuge. Der Brennstoffzellenantrieb wird daher vor allem als interessant für Fahrzeuge erachtet, die eine hohe Reichweite benötigen und für die Batterien aufgrund der geringeren Energiedichte und des hohen Gewichts nicht infrage kommen.

Mittelfristig (bis 2030) wird von den befragten Unternehmen und Forschungsinstitutionen mit dem stärksten Marktwachstum in den aktuellen Leitmärkten, vor allem in Ostasien in China, Japan und Südkorea, gerechnet. Nordamerika und Deutschland folgen auf Platz drei und vier, jedoch mit deutlichem Abstand (Abb. 21). Daran zeigt sich klar, dass China, Japan und Südkorea im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen mittelfristig die Zukunftsmärkte bilden, was sicher auch auf die umfangreichen Maßnahmen der Länder zur Förderung der Anwendung der Technologie zurückzuführen ist. Die befragten Unternehmen erwarten jedoch trotz erwartetem stärkeren Wachstum der ostasiatischen Länder in 2030 die Hälfte ihrer Umsätze im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen in Europa zu erzielen, was verdeutlicht, dass auch Europa weiterhin als wichtiger Leit- und Heimatmarkt eine bedeutende Rolle für die einheimischen Unternehmen spielt. Dennoch sollten frühzeitig Maßnahmen ergriffen werden, um das Potenzial, das der außereuropäische Markt für inländische Unternehmen bietet, durch Investitionen in den Ausbau des Technologievorsprungs bestmöglich auszuschöpfen.

Abbildung 20**Erwartete Marktentwicklung verschiedener Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktsegmente im Rahmen der Online-Umfrage [%]**

FRAGE: "Welche H₂/BZ-Marktsegmente entwickeln sich aus Ihrer Sicht bis 2030 weltweit am stärksten? (n = 31)"

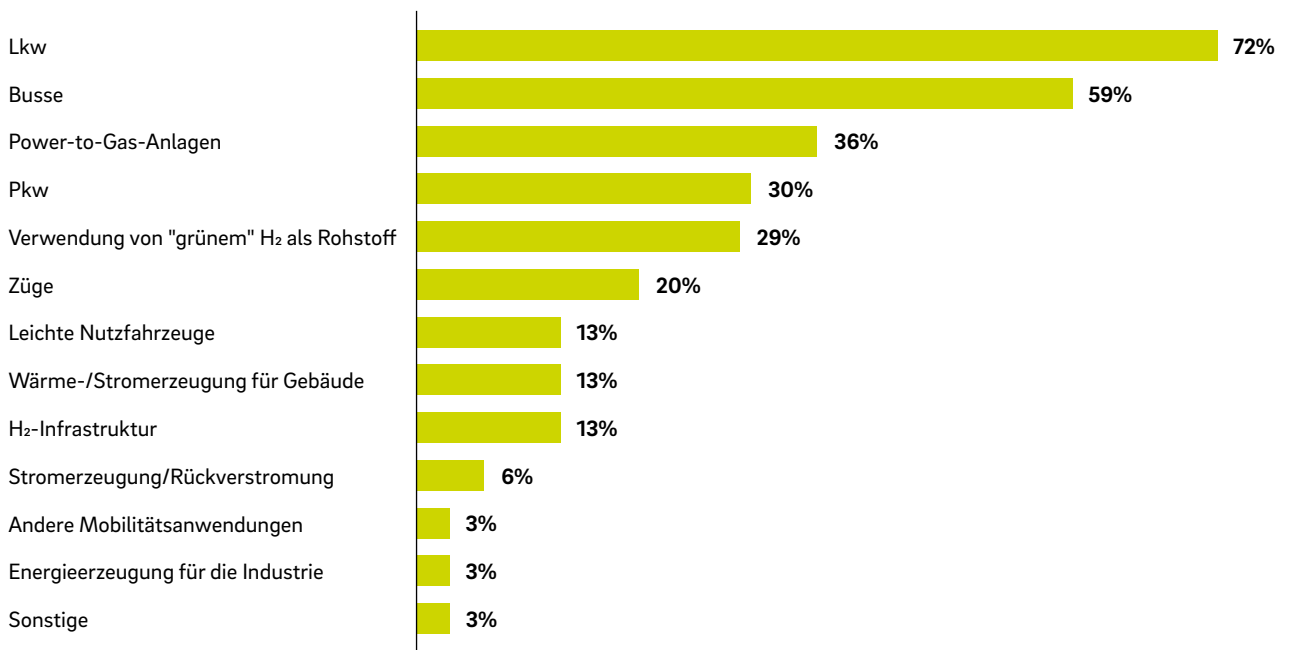
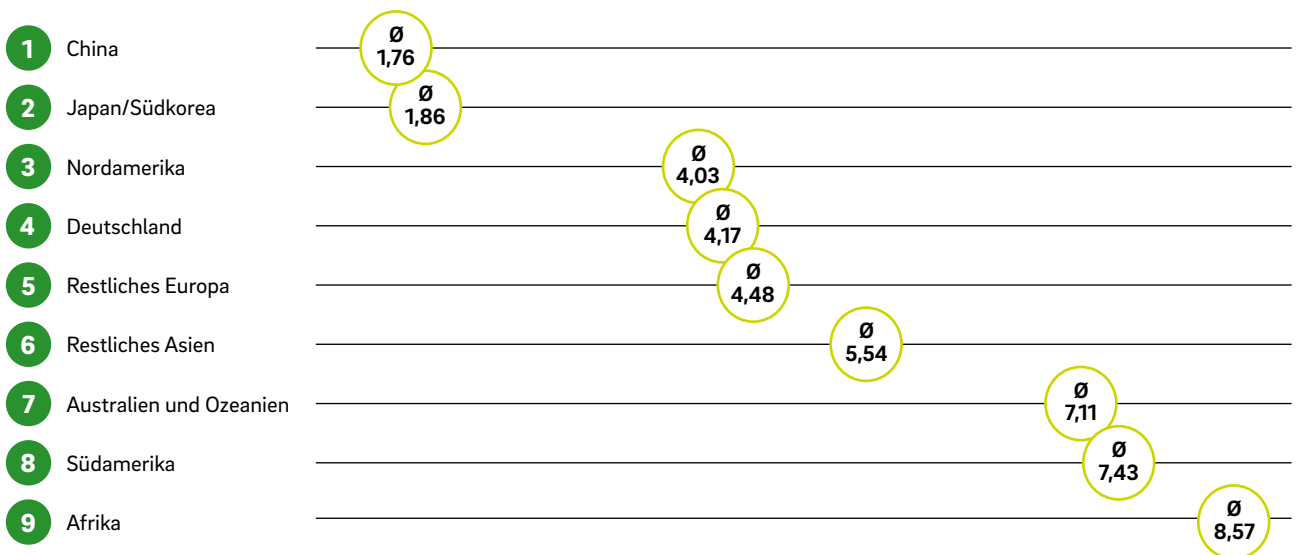


Abbildung 21

Ranking verschiedener Regionen nach erwartetem Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktwachstum bis 2030 durch Teilnehmer der Online-Umfrage [Durchschnitt der Rankings zwischen 1 und 9]

FRAGE: "Bitte priorisieren Sie folgende Regionen basierend auf Ihrer Einschätzung des jeweiligen H₂/BZ-Marktwachstums bis 2030"¹ (n = 29)



Quelle: Roland Berger

¹ Prioritäten von 1-9, wobei für 1 das stärkste Marktwachstum erwartet wird.

3.2 Marktentwicklung in Europa

Auch im europäischen Markt wird der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie eine Schlüsselrolle zur Verwirklichung von Energie- und Klimazielen wie der Reduzierung der Treibhausgasemissionen eingeräumt. Der Beitrag der EU zum Klimaabkommen von Paris sieht vor, dass Treibhausgasemissionen bis 2020

um 20%, bis 2030 um 40% und bis 2050 um 80 bis 95% gegenüber dem Jahr 1990 reduziert werden. Zur Erreichung der ambitionierten Ziele sieht die EU verschiedene Maßnahmen vor, die die Marktentwicklung im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen begünstigen:

- Mit der neuen "EU-Richtlinie für erneuerbare Energien" hat sich die EU zum Ziel gesetzt, den Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch bis 2030 auf mindestens 32% zu erhöhen.

Weiterhin verpflichteten sich die Mitgliedsstaaten dazu, dass bis 2030 mindestens 14% der im Transportsektor verbrauchten Energie erneuerbar ist (EU, 2018a).

- Des Weiteren legte die EU im April 2019 neue CO₂-Emissionsnormen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge fest. Die durchschnittlichen Emissionen der in der EU zugelassenen Neuwagen müssen demnach bis 2025 um 15% und bis 2030 um 37,5% gegenüber den Emissionsgrenzwerten des Jahres 2021 sinken (bei neuen leichten Nutzfahrzeugen bis 2030 um 31%) (EU, 2019a).
- Seit 2019 gelten darüber hinaus zum ersten Mal verbindliche Emissionsgrenzwerte für Neufahrzeuge im Segment der schweren Nutzfahrzeuge (u.a. Lkw und Busse) in der EU. Bis 2025 sollen die Grenzwerte um durchschnittlich 15% gegenüber dem Jahr 2019 und bis 2030 um 30% sinken, was als wichtiger Treiber der Wasserstoffentwicklung in den betreffenden Segmenten betrachtet wird (EU, 2019b).
- Mit Blick auf die CO₂-Emissionen in der Industrie trat bereits 2005 das "EU-Emissionshandels-system" (EU-EHS) in Kraft. Die überarbeitete EU-EHS-Richtlinie sieht unter anderem vor, dass die vom EU-EHS erfassten Industriezweige im Zeitraum von 2021 bis 2030 ihre Emissionen um 43% gegenüber dem Niveau von 2005 senken müssen (EU, 2018c).

Darüber hinaus hat sich Europa durch die gezielte Förderung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie durch unterschiedliche Maßnahmen und als Standort wichtiger im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen engagierter Unternehmen zu einem wesentlichen internationalen Leitmarkt entwickelt¹⁰:

- Ende 2018 legte die EU eine strategische Vision für den Zeitraum bis 2050 für eine "moderne,

wettbewerbsfähige, wohlhabende und klimaneutrale Wirtschaft" vor. Die Vision legt dar, wie Klimaneutralität durch Investitionen in implementierungsfähige technologische Lösungen sowie durch Abstimmung von Maßnahmen in wichtigen Bereichen wie der Industriepolitik und Forschung und Entwicklung erreicht werden soll. Wasserstoff und Power-to-X wird dabei eine wichtige technologische Bedeutung beigemessen (EU, 2018b).

- Während des Energieministertreffens der EU in Linz im September 2018 unterzeichneten Vertreter aus Industrie und Politik eine gemeinsame Erklärung für eine europäische Wasserstoff-Initiative sowie die "Hydrogen Initiative", deren Ziel es ist, politische Rahmenbedingungen zu unterstützen, durch die Wasserstoff-Technologien zügig in allen Energiesektoren implementiert werden können (Hydrogen Initiative, 2019).

Darüber hinaus unterstützt die EU seit mehreren Jahren bereits verschiedene konkrete länderübergreifende Initiativen sowie Pilot- und Demonstrationsprojekte zur Erforschung, Entwicklung und Erprobung von Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologien. Bereits 2008 wurde das Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) als Public-Private-Partnership der Europäischen Kommission, der europäischen Industrie sowie führender europäischer Forschungsinstitutionen gegründet, das Forschung, technologische Entwicklung und Demonstrationsprojekte im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen unterstützt. In der aktuellen zweiten Phase des FCH JU (von 2014 bis 2020) werden

¹⁰ Zum europäischen Leitmarkt gehören dabei derzeit insbesondere nord- und westeuropäische Länder.

wesentliche Entwicklungen und Projekte mit einem Volumen von 1,3 Mrd. EUR gefördert.

ZUKÜNFTIGE MARKTENTWICKLUNG

Aktuelle Prognosen gehen von einem möglichen und angesichts der derzeitigen Entwicklungen realistischen Pfad hin zur großflächigen kommerziellen Anwendung von Wasserstoff und Brennstoffzellen in Europa bis 2050 aus, dessen Realisierung signifikante wirtschaftliche Potenziale für europäische Unternehmen mit sich bringt (FCH 2 JU, 2019).

Dabei kann in den Zeiträumen bis 2030 und 2050 zwischen einem "Business-as-usual"- und einem "ambitionierten" Szenario unterschieden werden:

- Im "Business-as-usual"-Szenario (BAU) wird von einer moderaten Weiterentwicklung der politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen ausgegangen, die zu moderaten Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie in Pilotprojekte und damit zu einer insgesamt moderaten Marktentwicklung führen, die aber als weitgehend gesichert angesehen werden kann.
- Das "ambitionierte" Szenario geht von einer kooperativen Wasserstoff-Strategieplanung zwischen Politik, Industrie und Investoren aus, die zu hohen F&E-Investitionen und zu einer deutlich beschleunigten Marktentwicklung, vor allem bis 2050, beitragen könnte. Mit der Verwirklichung dieses Szenarios könnte ein wichtiger Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen und damit zur Erreichung des 2-Grad-Ziels des Pariser Klimaabkommens geleistet werden. Vor dem Hintergrund der Zunahme der aktuellen Bestrebungen zur Dekarbonisierung über alle Sektoren hinweg sowie auf Basis der Ergebnisse der Exper-

teninterviews, der Umfrage sowie unserer eigenen Analysen aus der Vergangenheit, halten wir das Eintreten des ambitionierten Szenarios bei entsprechenden und frühzeitigen Maßnahmen und Investitionen für realistisch, weshalb dieses im Folgenden ausführlicher betrachtet wird als das BAU-Szenario und insbesondere für die Marktentwicklungsprognosen für Deutschland und Baden-Württemberg herangezogen wird.

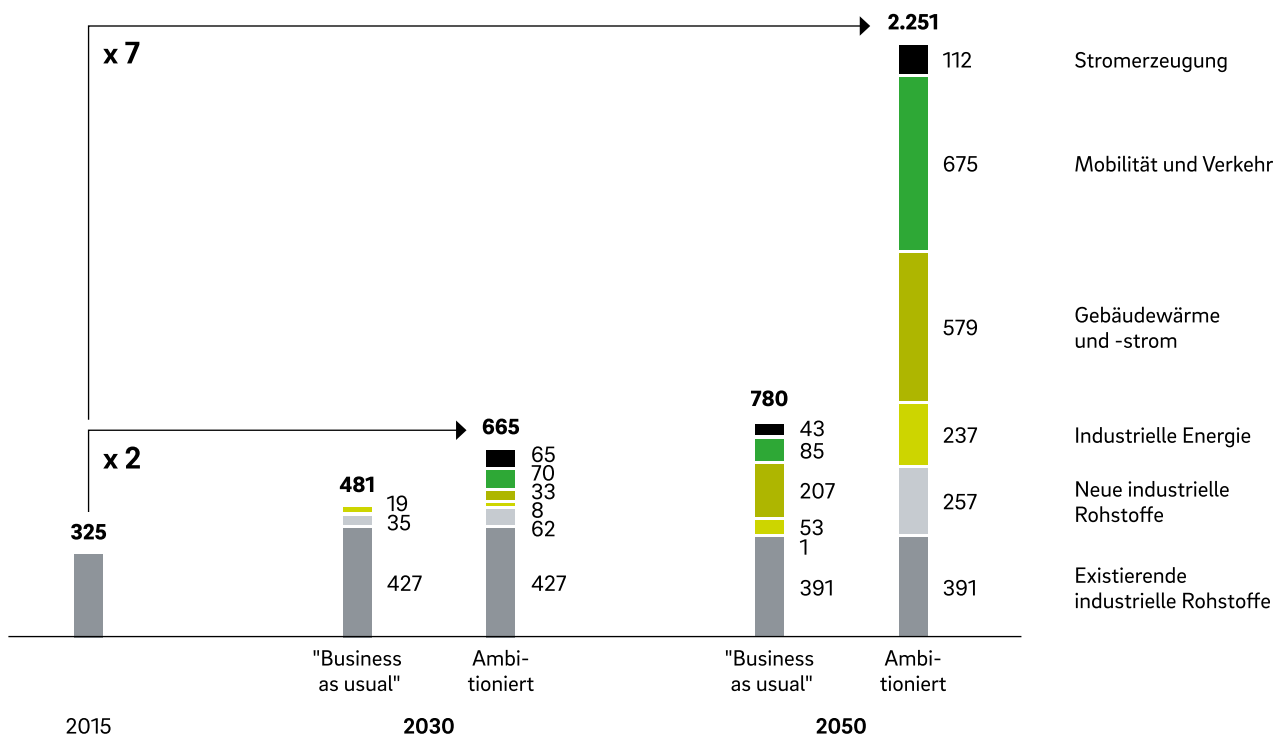
Im Vergleichsjahr 2015 deckte Wasserstoff mit 325 TWh 2% der Gesamt-Endenergienachfrage in der EU. In beiden Szenarien der europäischen Marktprognose wird ein deutlicher Anstieg der Wasserstoffnachfrage in allen relevanten Sektoren prognostiziert. Wie Abbildung 22 illustriert, verdoppelt sich die Nachfrage nach Wasserstoff gegenüber 2015 im ambitionierten Szenario bis 2030 demnach auf ca. 665 TWh (6% der prognostizierten Endenergienachfrage der EU). Die Entwicklung eines Massenmarkts wird jedoch erst nach 2030 erwartet: Im ambitionierten Szenario bis 2050 könnte ein Anstieg um den Faktor sieben gegenüber 2015 auf rund 2.250 TWh erfolgen (24% der prognostizierten Endenergienachfrage der EU). Im BAU-Szenario gestaltet sich der Anstieg moderater. Bis 2030 wird eine Nachfrage von 481 TWh (+48% ggü. 2015) und bis 2050 von 780 TWh (+140% ggü. 2015) erwartet. Bis 2030 gehen beide Szenarien jedoch von einem grundsätzlich ähnlichen Marktentwicklungsverlauf aus.

Dabei wird auch in Europa ein starker Zuwachs der Nachfrage in den Sektoren Mobilität und Verkehr sowie Gebäude (Wärme und Strom) erwartet. Im Jahr 2050 könnte der Mobilitäts- und Verkehrssektor mit einem Anteil von rund 30% im ambitionierten Szenario den größten Bedarf an Wasserstoff in Europa aufweisen (Abb. 22).

Es wird angenommen, dass europäische Unternehmen innerhalb des wachsenden Wasserstoff- und Brennstoff-

Abbildung 22

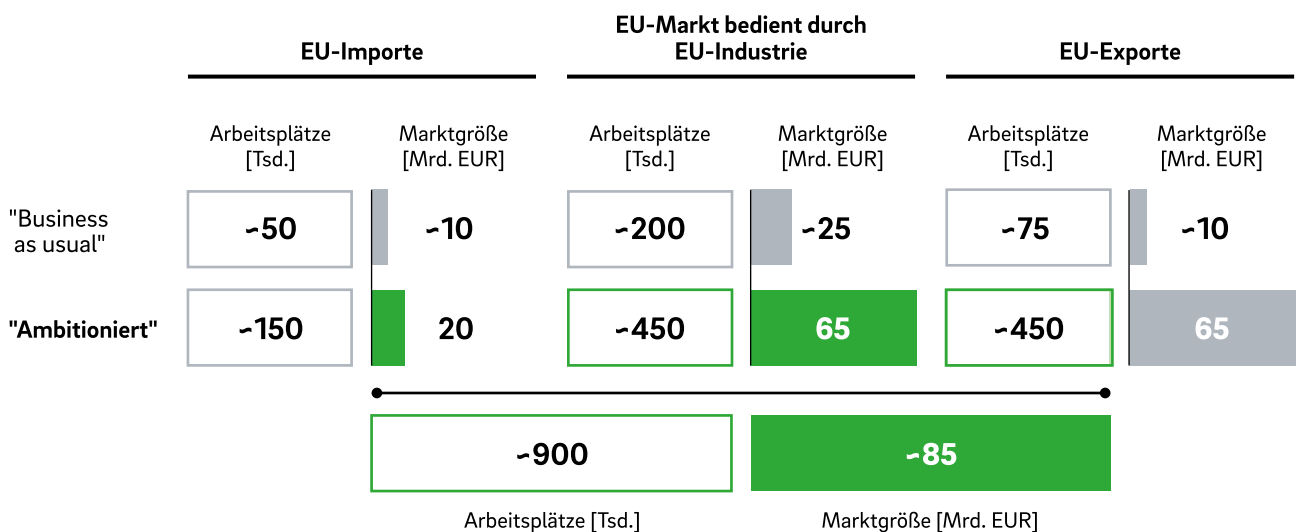
Prognostizierter Wasserstoffbedarf in Europa in 2030 und 2050 nach Sektoren [TWh]



Quelle: FCH 2 JU, 2019

zellen-Marktes in Europa bis 2030 eine starke Marktpositionierung einnehmen. Mittelfristig (bis 2030) wird davon ausgegangen, dass je nach Wertschöpfungsstufe von einem Marktanteil von 60 bis 90% mit Umsätzen von insgesamt 65 Mrd. EUR im ambitionierten Szenario sowie Umsätzen von 25 Mrd. EUR im BAU-Szenario für europäische Unternehmen im europäischen Markt aus-

gegangen werden kann. Zählt man die prognostizierten Importe von nichteuropäischen Unternehmen in Höhe von 20 Mrd. EUR im ambitionierten Szenario bzw. von 10 Mrd. EUR im BAU-Szenario hinzu, ergibt sich bis 2030 eine europäische Marktgröße von 85 Mrd. EUR im ambitionierten Szenario sowie von 35 Mrd. EUR im BAU-Szenario.

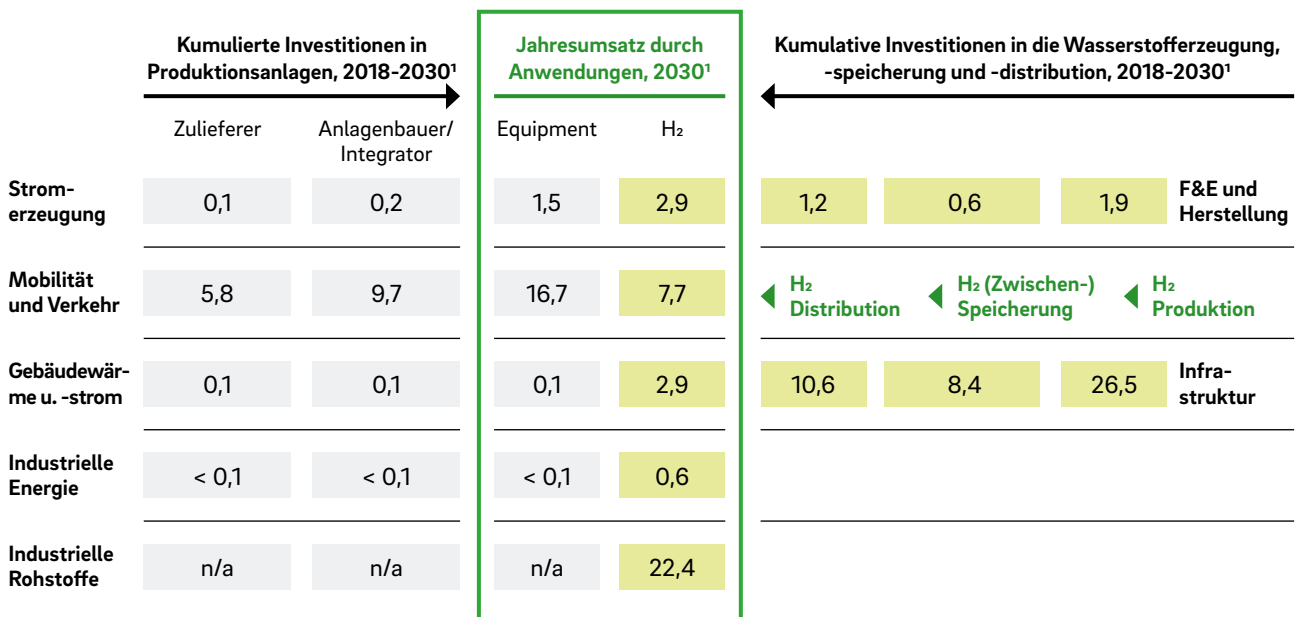
Abbildung 23**Prognostizierte Umsätze und Arbeitsplätze in der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Europa 2030**

Quelle: FCH 2 JU, 2019

Der weltweite Marktanteil europäischer Unternehmen wird für das Jahr 2030 auf 10 bis 25% geschätzt. Dabei wird für Exporte europäischer Unternehmen ein Umsatzpotenzial in 2030 in Höhe von 65 Mrd. EUR im ambitionierten Szenario und von 10 Mrd. EUR im BAU-Szenario angenommen.

Mit Blick auf die Entwicklung des Arbeitsmarktes kann davon ausgegangen werden, dass durch die EU-Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie (inkl. Exporten in den globalen Markt) nach dem ambitionierten Szenario bis 2030 bis zu 900.000 Arbeitsplätze und im BAU-Szenario bis zu 275.000 Arbeitsplätze bereitgestellt werden könnten.

Um das ambitionierte Szenario realisieren zu können, sind bis 2030 kumulierte Investitionen entlang der Wertschöpfungskette von rund 65 Mrd. EUR erforderlich. Dazu gehören Investitionen in die Infrastruktur, in Forschung und Entwicklung sowie in neue Produktionsanlagen, einschließlich Zulieferern, spezialisierter Materialien und Endanwendungen, wie die Entwicklung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen oder die Nachrüstung von industriellen Wärmeanlagen (Abb. 24). Ein Großteil dieser Investitionen bis 2030 (etwa 75%) muss in die Wasserstoff-Herstellung, -Speicherung und -Distribution fließen, unter anderem in Power-to-Gas-Anlagen und Wasserstoff-Tankstellen. Die restlichen rund 25% der Investitionen werden für die Entwicklung und den Aufbau neuer

Abbildung 24**Benötigte Investitionen bis 2030 zum Aufbau der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Europa**
[Mrd. EUR]

¹ Einschließlich Investitionen/Erträgen für Aftermarket-Dienstleistungen und neue Geschäftsmodelle (Annahme: 8% der Investitionen/Umsatzerlöse).

Quelle: Hydrogen Roadmap Europe team; FCH 2 JU, 2019

Produktionsanlagen in den Anwendungsgebieten Verkehr, Gebäude, Industrie und Stromerzeugung benötigt.

Mit Blick auf die Nachfrageentwicklung speziell im für Baden-Württemberg zentralen Sektor Mobilität und Verkehr wird prognostiziert, dass bis 2030 im ambitionierten Szenario etwa 4,2 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeuge und bis 2050 rund 53 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeuge auf europäischen Straßen im Betrieb sein könnten. Die 4,2 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeuge in 2030 verteilen sich auf

3,7 Mio. Pkw, 45.000 Lkw und Busse sowie 500.000 leichte Nutzfahrzeuge, die 53 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeuge in 2050 verteilen sich auf 45 Mio. Pkw, 250.000 Busse, 1,7 Mio. Lkw und 6,5 Mio. leichte Nutzfahrzeuge. Der jährliche Absatz von Brennstoffzellen-Fahrzeugen steigt in den kommenden Jahren nach diesem Szenario damit stark an: 2030 wird ein über alle Segmente kumulierter jährlicher Absatz von 1,2 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeugen und für 2050 von 8 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeugen erwartet.

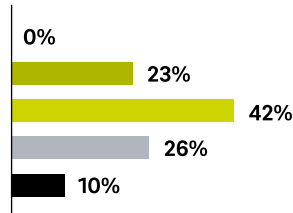
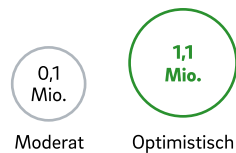
Abbildung 25

Bewertung verschiedener Marktentwicklungsszenarien für 2030 im Mobilitäts- und Verkehrssektor durch Umfrageteilnehmer [# verkaufte Fahrzeuge je Segment pro Jahr, % je gewählte Antwortkategorie]

FRAGE: "Bitte geben Sie an, inwiefern sich die jährlichen Verkaufszahlen der folgenden Brennstoffzellen-Fahrzeugtypen in Europa im Vergleich zu den folgenden moderaten und optimistischen Szenarien bis zum Jahr 2030 Ihrer Einschätzung nach entwickeln" (n = 31)

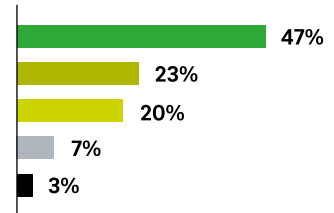
SZENARIO 1

Pkw mit Brennstoffzelle



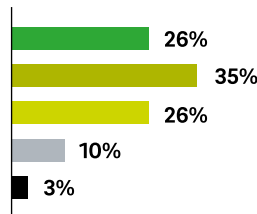
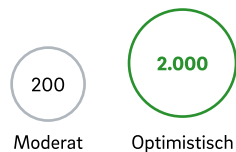
SZENARIO 2

Lkw mit Brennstoffzelle



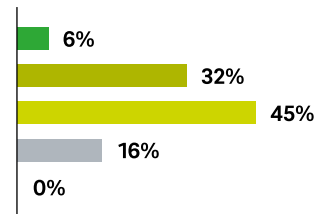
SZENARIO 3

Busse mit Brennstoffzelle



SZENARIO 4

Leichte Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzelle



■ Höher als optimistisches Szenario
 ■ Optimistisches Szenario
 ■ Zwischen moderat und optimistisch
 ■ Moderates Szenario
 ■ Niedriger als moderates Szenario

Quelle: Roland Berger

Um die Wasserstoffversorgung dieser stark wachsenden Anzahl von verkauften und sich im Umlauf befindlichen Brennstoffzellen-Fahrzeugen, insbesondere im ambitionierten Szenario, sicherzustellen, müssen bis zum Jahr 2030 rund 3.700 Wasserstoff-Tankstellen und bis 2050 33.000 Wasserstoff-Tankstellen in Europa zur Verfügung stehen. Dies stellt einen starken Anstieg gegenüber den in Europa aktuell installierten 130 Wasserstoff-Tankstellen dar und bedarf bis 2030 Investitionen in Höhe von etwa 8 Mrd. EUR¹¹.

Die im Rahmen der Studie durchgeführte Online-Umfrage unter baden-württembergischen Unternehmen bestätigt das ambitionierte Marktentwicklungsszenario für Europa. Im Rahmen der Umfrage wurden auf Basis der Marktentwicklungsprognosen entwickelte moderate und optimistische Marktentwicklungsszena-

¹¹ Eine aktuelle Übersicht über die Verfügbarkeit von Wasserstoff-Tankstellen in Europa liefert H2 Mobility unter www.h2.live.

rien für verschiedene Segmente abgefragt. In Abbildung 25 sind die vier abgefragten Szenarien im Mobilitäts- und Verkehrssektor und deren Bewertung dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass in Baden-Württemberg aktive Unternehmen und Forschungsinstitutionen bereits bis 2030 eine starke Absatzentwicklung, insbesondere für das Lkw-Segment, erwarten; knapp die Hälfte der Teilnehmer schätzte den Absatz von Brennstoffzellen-Lkw 2030 in Europa höher als im vorgeschlagenen ambitionierten Szenario (Abb. 25). Gründe dafür sind, dass Brennstoffzellen im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge derzeit die einzige technologische Alternative darstellen, die auch anspruchsvolle Nutzungsprofile abdecken kann, und die Regulierung bereits heute starke Anreize für eine schnelle Dekarbonisierung in den nächsten Jahren setzt. Auch im Bereich der Brennstoffzellen-Busse wird eine vergleichsweise hohe Absatzentwicklung erwartet. Busse profitieren wie Lkw im Vergleich zur Batterie von der höheren Reichweite von Brennstoffzellen, weshalb die Technologie dort ebenfalls sehr gute Anwendungschancen hat.

Ein rascher Markthochlauf bis 2030 und die prognostizierten Stückzahlen von Fahrzeugen und der damit verbundenen Umsatzpotenziale sind jedoch nur erreichbar, wenn Zulieferer und OEMs rechtzeitig entsprechende Produktionskapazitäten schaffen und Produkte bereitstellen, die reif für die kommerzielle Serienfertigung und zu kompetitiven Preisen verfügbar sind. Hierbei ist insbesondere die verstärkte Initiative europäischer OEMs vor dem Hintergrund der derzeitigen Aktivitäten der internationalen Konkurrenz gefragt, da ansonsten wichtige Wertschöpfung in Europa verloren geht und andernfalls nicht garantiert ist, dass in Europa Brennstoffzellen-Anwendungen in ausreichender Stückzahl rechtzeitig verfügbar sind, um das prognostizierte Marktwachstum zu erreichen.

3.3 Marktentwicklung in Deutschland

Deutschland verfolgt im Rahmen der Klimapolitik ambitionierte Ziele, bei deren Verwirklichung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie eine wachsende Bedeutung beigemessen wird. Bis 2030 sollen die Treibhausgasemissionen in Deutschland gegenüber dem Basisjahr 1990 um mindestens 55% reduziert werden. Dieses Ziel wurde im Energiekonzept 2010 festgelegt und seitdem mehrfach durch die Bundesregierung bestätigt. Bis 2050 soll durch eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 80 bis 95% darüber hinaus weitestgehend Treibhausgasneutralität erreicht werden. Verschiedene Zielwerte sollen die Erreichung dieser Ziele sicherstellen. Das "Erneuerbare-Energien-Gesetz" (EEG) von 2017 sieht beispielsweise vor, dass der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch bis 2035 auf 55 bis 60% und bis 2050 auf mindestens 80% steigen soll, wohingegen der Koalitionsvertrag der Bundesregierung aus 2018 mit einem Anteil von 65% im Jahr 2030 noch ein weitaus ambitionierteres Ziel verfolgt. Darüber hinaus forciert die Bundesregierung auch mit dem Kohleausstieg, der bis 2038 umgesetzt sein soll, der "Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie" und der "Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität" die Transformation des Energiesystems und des deutschen Mobilitäts- und Verkehrssektors.

2016 verabschiedete die Bundesregierung den Klimaschutzplan 2050, der als Leitlinie für die Erreichung der deutschen Klimaschutzziele dient und konkrete Minderungsziele für einzelne Sektoren, darunter für Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude und Verkehr, festlegt (BMU, 2016). Im Oktober und Dezember 2019 legte die Bundesregierung einen Entwurf für ein Klimaschutzprogramm 2030 vor, in welchem konkrete Maßnahmen für die Erreichung der Klimaschutzziele bis 2030 formu-

liert sind. Neben Maßnahmen, die einen indirekten Effekt auf die Entwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie haben können (z.B. Einführung einer CO₂-Bepreisung), bekennt sich die Bundesregierung im Rahmen des Klimaschutzprogramms auch konkret zur zukünftigen Bedeutung und zum Einsatz von ("grünem") Wasserstoff (BMU, 2019c):

- Für den Einsatz sowie zur Entwicklung und Skalierung von Elektrolyse- und Raffinerieprozessen möchte die Bundesregierung zukünftig geeignete Rahmenbedingungen schaffen und diese durch Investitionen in Forschung und Innovation sowie durch Marktanreizprogramme unterstützen.
- Mittel- und langfristig soll die Brennstoffzellen-Technologie im Mobilitäts- und Verkehrssektor zu einer breiten Anwendung gebracht werden. Unter anderem soll die Anschaffung von Lkw mit "alternativen, klimaschonenden Antrieben einschließlich Wasserstofftechnologien" unterstützt und der Ausbau der notwendigen Tankinfrastruktur gefördert werden. Die von Bund und Herstellern getragene Kaufprämie für Pkw mit Elektro-, Hybrid- und Brennstoffzellenantrieb soll verlängert und die Entwicklung marktreifer Nutzfahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzellen für alle Segmente weiterhin gefördert werden.
- In neuen "Reallaboren der Energiewende" sollen Wasserstoff- und Sektorkopplungstechnologien erprobt werden. Gefördert werden sollen außerdem Forschungsprojekte im Bereich Power-to-X, unter anderem, um die Erzeugung von "grünem" Wasserstoff langfristig marktfähig zu machen.

Daneben hat die Bundesregierung die Vorstellung einer nationalen Wasserstoffstrategie angekündigt, die die Entwicklung der Forschungs- und Umsetzungsmaßnahmen zur Produktion, zur Speicherung, zum Transport

und zur Nutzung von Wasserstoff weiter spezifizieren und damit wichtige Rahmenbedingungen für die zukünftige Marktentwicklung von Wasserstoff und Brennstoffzellen in Deutschland definieren soll. Auch der Bundesrat setzt sich für den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft ein. In Beschlüssen vom 11. Oktober 2019 und vom 8. November 2019 bekräftigte er die Entwicklung einer nationalen Wasserstoffstrategie und forderte die Bundesregierung unter anderem dazu auf, die in der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie beschlossenen Regelungen mit ambitionierten nationalen Zielen zu verknüpfen und die Produktion von nachhaltigen Kraftstoffen durch anreizsetzende Regelungen voranzutreiben. Insbesondere betonte der Bundesrat die Bedeutung von "grünem" Wasserstoff für die Erreichung der Klimaziele und forderte, die Marktchancen unter anderem durch eine Reform der Steuern und Umlagen im Energiesektor sowie durch die Schaffung eines Marktanreizprogramms für den Ausbau einer Wasserstoffwirtschaft (bspw. für Investitionen in Brennstoffzellen und Elektrolyseure) zu stärken (Bundesrat, 2019a; Bundesrat, 2019b).

Eine weitere aktuelle Initiative auf Bundesebene im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen ist der Ende 2018 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) angestoßene Dialogprozess "Gas 2030", in dem die zukünftige Rolle gasförmiger Energieträger, darunter auch von Wasserstoff, von Akteuren verschiedener Sektoren erörtert wird. Im ersten Bilanzbericht von Oktober 2019 bekannte sich das BMWi klar zur industriepolitischen Bedeutsamkeit von Wasserstoff. Obwohl Deutschland auch in Zukunft Energieimporteur bleibe, sei es wichtig, einen funktionierenden Heimatmarkt als Voraussetzung für die Entwicklung entsprechender Anlagen und die internationale Wettbewerbsfähigkeit aufzubauen und deutsche Technologien bei der internationalen Wasserstoffproduktion einzubringen (BMWi, 2019).

Darüber hinaus engagieren sich in Deutschland Politik und Unternehmen bereits heute in verschiedenen konkreten Projekten und Initiativen zur Förderung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie, die das gemeinsame Ziel einer Weiterentwicklung des Marktes haben. Dazu gehören unter anderem:

- "Clean Energy Partnership" (CEP): 2002 wurde die Clean Energy Partnership in Zusammenarbeit des Bundesverkehrsministeriums und Industriepartnern gegründet, um den Aufbau der Wasserstoffmobilität in Deutschland zu fördern. Aktuell engagieren sich 15 Partner im Rahmen von CEP unter anderem für die Marktetablierung einer Wasserstoffmobilität, den sektorübergreifenden Auf- und Ausbau der Produktionskapazitäten von "grünem" Wasserstoff sowie für die Realisierung der Sektorkopplung (CEP, 2019).
- "Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband" (DWV): Als Dachorganisation der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Deutschland vertritt der DWV zentrale Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen, die im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen tätig sind. Durch enge Zusammenarbeit mit Wirtschafts- und Forschungsvertretern sowie Öffentlichkeits- und Lobbyarbeit setzt sich der Verband für die Schaffung von ökonomischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen ein, die den Aufbau der Wasserstoff- und einer nachhaltigen Energiewirtschaft sowie einen fairen Wettbewerb fördern (DWV, 2019b).
- "H2 Mobility": Zur Beschleunigung des Aufbaus einer flächendeckenden Wasserstoff-Infrastruktur hat sich im Februar 2015 das Joint Venture H2 Mobility, ein Zusammenschluss aus Automobilherstellern, Gasunternehmen und Kraftstoffhändlern, zusammengefunden. H2 Mobility wird vom NIP gefördert und möchte bis zum Jahr 2023

400 Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland installieren. Damit trägt der Zusammenschluss maßgeblich zum Aufbau einer Wasserstoffmobilität in Deutschland bei (NOW, 2015).

- "Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie" (NIP): Seit 2006 fördert die Bundesregierung die Markteinführung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie im Rahmen des nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie durch finanzielle Mittel. In der ersten Phase des NIP bis 2016 wurden insgesamt bereits 1,4 Mrd. EUR an Fördermitteln von Staat und Industrie für Demonstrationsprojekte zur Verfügung gestellt. Im Jahr 2016 genehmigte die Bundesregierung die Verlängerung des Programms für weitere zehn Jahre bis 2026 und sicherte die Unterstützung durch knapp 250 Mio. EUR an Finanzmitteln, einschließlich Zuschüssen für öffentlich zugängliche Wasserstoff-Tankstellen, Brennstoffzellen-Fahrzeuge und Käufen von Mikro-KWK-Anlagen, zu. Im Oktober 2019 überreichte das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Fördermittel im Rahmen des Programms Zukunftsschecks in Höhe von 23,5 Mio. EUR, unter anderem für die Entwicklung von Abfallsammelfahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb und die Beschaffung von Brennstoffzellen-Streetscootern für die Paketzustellung. Darüber hinaus wird unter anderem auch die Anschaffung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen in Flotten mit 5 Mio. EUR gefördert. Im Rahmen des Projekts „HyLand“ unterstützt das NIP derzeit zudem Regionen in drei Wettbewerbskategorien bei der Umsetzung konkreter Wasserstoffprojekte. In der Wettbewerbskategorie "HyStarter" ist die Stadt Reutlingen eine von neun ausgewählten Regionen, die zwei Jahre lang

organisatorisch und inhaltlich zur Entwicklung von Konzeptideen zu den Themen Wasserstoff und Brennstoffzellen beraten werden.

ZUKÜNFTIGE MARKTENTWICKLUNG

Bislang spielt Wasserstoff für die Energieversorgung in Deutschland nur eine untergeordnete Rolle. In 2015 wurden in Deutschland rund 57 TWh Wasserstoff größtenteils aus fossilen Rohstoffen erzeugt und vorwiegend in der Industrie genutzt (iwd, 2019). Vor dem Hintergrund der zunehmenden Bedeutung und Förderung der Technologie ist jedoch auch in Deutschland bis 2030 mit einem sektorübergreifenden Anstieg der Nachfrage zu rechnen. Für eine Abschätzung der zukünftigen Marktentwicklung in Deutschland wurden dabei die Annahmen für die Marktentwicklung auf europäischer Ebene zugrunde gelegt, da davon ausgegangen werden kann, dass Deutschland als wichtiger Leitmarkt innerhalb Europas einen wesentlichen Anteil zur gesamteuropäischen Marktentwicklung beitragen wird.

Legt man für Deutschland die gleiche Nachfrageentwicklung wie für die EU zugrunde (d.h. eine Verdopplung der Nachfrage bis 2030 und eine Versiebenfachung bis 2050 im ambitionierten Szenario, vgl. Abb. 22), könnte der Wasserstoffbedarf in Deutschland bis 2030 auf 114 TWh und bis 2050 auf 399 TWh steigen (Abb. 26). Aufgrund der aktuellen Bestrebungen von Politik und Industrie in Deutschland, die Markttechnologie voranzutreiben, könnte die Gesamtnachfrage nach Wasserstoff in Deutschland sich aber auch noch stärker entwickeln als der gesamteuropäische Durchschnitt (vgl. etwa die Prognosen der aktuellen Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen¹²).

Der Markthochlauf der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie führt erwartbar auch in Deutschland zu einem signifikanten Anstieg der Marktgröße. Bei einer EU-Was-

serstoff-Marktgröße von etwa 85 Mrd. EUR in 2030 (ambitioniertes Szenario) (Abb. 23) und unter der Annahme eines proportionalen Anteils des deutschen Marktes daran, kann der deutsche Wasserstoffmarkt mittelfristig bis 2030 ein Umsatzvolumen von ca. 17 Mrd. EUR ausmachen¹³.

Im Hinblick auf die Entwicklung der Beschäftigtenzahlen geht der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV) davon aus, dass bis 2030 etwa 70.000 Arbeitsplätze in Deutschland in der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie entstehen können (DWV, 2018). Bei Eintritt des im vorigen Abschnitt dargestellten ambitionierten Szenarios des FCH JU (d.h. einem raschen Markthochlauf bereits in den kommenden Jahren und entsprechend hohen Investitionen) ist bis 2030 mit einer noch höheren Zahl zwischen 120.000 und 150.000 Arbeitsplätzen in Deutschland zu rechnen. Im Vergleich zu heute zeichnet sich damit in beiden Szenarien eine starke Zunahme der Arbeitsplätze ab. Heute sind laut einer aktuellen Erhebung des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) in Deutschland rund 1.500 Mitarbeiter in der Wasserstoff- und Brennstoffzellenwirtschaft beschäftigt (VDMA, 2019)¹⁴.

Mit Blick auf die Erreichung der Klimaziele spielt der Mobilitäts- und Verkehrssektor für die weitere Marktentwicklung im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen auch in Deutschland eine zentrale Rolle. Der Verkehrssektor verursachte 2018 rund 19% der Treibhausgasemissionen in Deutschland und bislang ist es nicht ge-

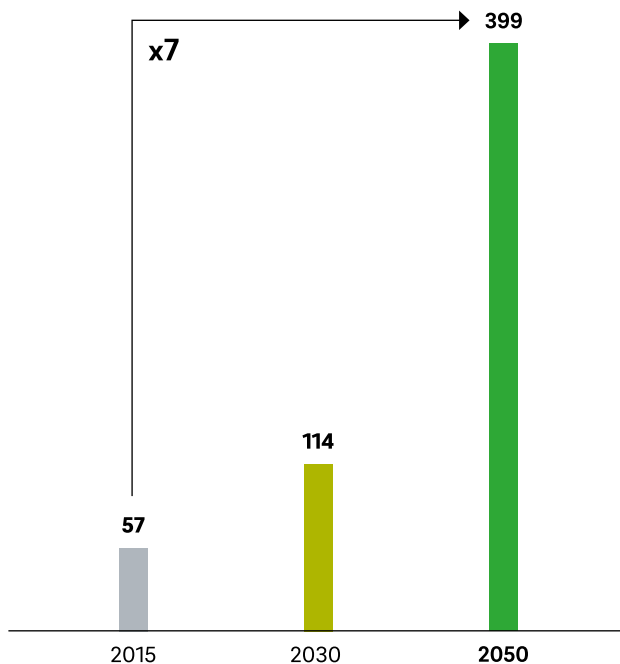
¹² Michalski et al. (2019) nehmen beispielsweise an, dass die Nachfrage nach Wasserstoff in allen relevanten Sektoren in Deutschland sowie mit dem Ziel, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 95% zu senken, bereits 2030 auf 334 TWh und 2050 bis auf 644 TWh steigen könnte.

¹³ Für die Berechnung wurde ein Anteil Deutschlands von 19,6% am EU-Volumen (Anteil BIP Deutschland an der Gesamt-EU in 2018 abzüglich Exporten und zuzüglich Importen) zugrunde gelegt.

¹⁴ Die Erhebung berücksichtigt allerdings nicht alle möglichen Marktsegmente.

Abbildung 26

Prognostizierte Entwicklung der Wasserstoffnachfrage in Deutschland bis 2030 und 2050 auf Basis des ambitionierten Szenarios des FCH JU [TWh]



Quelle: Roland Berger

lungen, die Emissionen im Vergleich zu 1990 zu senken, weshalb Wasserstoff in der Verkehrswende eine wichtige Bedeutung beigemessen wird (BMU, 2019b).

In 2018 verkehrten in Deutschland rund 500 Brennstoffzellen-Fahrzeuge (AFC TCP, 2019). Auf Basis der Annahmen zur europäischen Marktentwicklung könnte dieser Bestand in den kommenden Jahren stark wachsen und

2030 rund 700.000 Brennstoffzellen-Fahrzeuge und im Jahr 2050 rund 8,8 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeuge umfassen, davon 2030 rund 660.000 Pkw, 4.800 Busse und Lkw sowie 39.000 leichte Nutzfahrzeuge und in 2050 rund 8 Mio. Pkw, 26.000 Busse, 250.000 Lkw sowie 510.000 leichte Nutzfahrzeuge.

Für den kommerziellen Rollout von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ist eine ausreichende Anzahl an Wasserstoff-Tankstellen notwendig, um den Umstieg auf einen Wasserstoffantrieb attraktiv zu machen. Eine flächendeckende Grundversorgung bis 2030 mit Wasserstoff erfordert H2 Mobility zufolge etwa 1.000 Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland (H2 Mobility, 2018).

3.4

Marktentwicklung in Baden-Württemberg

Auch Baden-Württemberg wird von der Energiewende vor große Herausforderungen gestellt. Die baden-württembergische Landesregierung verfolgt die Ziele, den Anteil an erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch von derzeit 23% (Stand 2018) auf 89% im Jahr 2050 zu erhöhen und die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 90% gegenüber 1990 zu reduzieren (UM BW, 2018; UM BW, 2014). Um das ambitionierte Treibhausgas-Minderungsziel bis 2050 zu erreichen, ist laut des vom baden-württembergischen Umweltministerium 2017 beauftragten Forschungsvorhabens "Energie- und Klimaschutzziele 2030" bereits in den kommenden zehn Jahren eine Treibhausgasminderung um 42% notwendig (ZSW et al., 2017). Dieses Ziel wurde 2019 von der Landesregierung in den "Eckpunkten zur Weiterentwicklung des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg" verankert.

Baden-Württemberg gehört zu den Bundesländern, die sich vor diesem Hintergrund bereits seit mehreren Jahren für die Förderung und den Einsatz von "grünem" Was-

serstoff als Energieträger einsetzen und den Markthochlauf der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie fördern. Aufgrund der Stärke des Landes in der Automobilindustrie und der Bedeutung des Verkehrs- und Mobilitätssektors für die Erreichung der Klimaschutzziele liegt ein Fokus der Förderung auf dem Bereich Verkehr und Mobilität.

Die verschiedenen Aktivitäten und Kompetenzen im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen in Baden-Württemberg werden im "Cluster Brennstoffzellen BW" gebündelt. Das 2013 gegründete Cluster setzt sich für die Stärkung der Zusammenarbeit zwischen den maßgeblichen Akteuren aus Wirtschaft, Forschung, Verbänden und Politik ein, um den Ausbau der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie und die Marktreife der Anwendungen im Land voranzutreiben. Um die Automobilindustrie zukunftsfähig zu gestalten, hat die Landesregierung darüber hinaus den "Strategiedialog Automobilwirtschaft Baden-Württemberg" initiiert. Der Strategiedialog bringt alle relevanten Akteure aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft, Arbeitnehmerverbänden, Verbraucherorganisationen und Zivilgesellschaft zusammen, um die Transformation der Automobilwirtschaft in Baden-Württemberg zukunftsfähig zu gestalten. Die Akteure des Strategiedialogs erarbeiten gemeinsam innovative Transformationsmaßnahmen und Konzepte und zeigen Handlungsfelder auf. Im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen arbeitet der Strategiedialog derzeit unter anderem am Aufbau einer Infrastruktur für einen emissionsfreien öffentlichen Personennahverkehr auf Basis der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie und der Planung des Projekts "HyFab" (siehe Abb. 27) (SDA, 2019).

Im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Forschung gründete das Land bereits 1988 in Kooperation mit den Universitäten Stuttgart und Ulm (u.a.) das

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), das zu Technologien zur nachhaltigen und klimafreundlichen Bereitstellung von Strom, Wärme und erneuerbaren Kraftstoffen forscht. Darüber hinaus sind in Baden-Württemberg weitere international renommierte universitäre und außeruniversitäre Forschungsinstitutionen angesiedelt, die die Entwicklung der Technologien aktiv vorantreiben. Des Weiteren ist in Baden-Württemberg bereits heute eine Vielzahl an wichtigen Unternehmen ansässig, die in die Weiterentwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie investieren, um in absehbarer Zeit die Marktreife in verschiedenen Segmenten zu erreichen (siehe auch Kap. 4.1).

Durch das sektorübergreifende Engagement konnten in Baden-Württemberg bereits in den vergangenen Jahren mehrere wegweisende Projekte und Aktivitäten in den Bereichen Forschung, Entwicklung und Anwendung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie erfolgreich initiiert und durchgeführt werden. Abbildung 27 liefert einen Überblick über eine Auswahl aktueller Aktivitäten.

ZUKÜNFTIGE MARKTENTWICKLUNG

Im ambitionierten Szenario steigt die Nachfrage nach Wasserstoff in Deutschland bis 2030 auf 114 TWh und bis 2050 auf 399 TWh (siehe vorigen Abschnitt; FCH 2 JU, 2019). Daraus lässt sich für Baden-Württemberg eine Wasserstoffnachfrage von rund 17 TWh in 2030 und von 61 TWh in 2050 abschätzen. Auf Basis der oben getroffenen Abschätzung der Marktgröße des deutschen Gesamtmarktes in Höhe von 17 Mrd. EUR im Jahr 2030 ergibt sich daraus folgend für den Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Markt in Baden-Württemberg mittelfristig bis 2030 eine geschätzte Marktgröße in Höhe von rund 2,7 Mrd. EUR. Der heimische Markt in Baden-

Württemberg und Deutschland kann daher für die lokale Industrie eine wichtige Rolle für die Entwicklung und Demonstration eigener Produkte spielen, relevante wirtschaftliche Potenziale ergeben sich aber in deutlich größerem Maßstab auf dem europäischen und vor allem auf dem Weltmarkt.

Die rascheste Entwicklung wird dabei ebenfalls für den Mobilitäts- und Verkehrssektor angenommen. Auf Basis der Abschätzungen der Entwicklungen für den deutschen Markt und des Anteils des Fahrzeugbestands der relevanten Fahrzeugsegmente von Baden-Württemberg am deutschen Gesamtbestand ergibt sich ein Brennstoffzellen-Fahrzeugbestand für Baden-Württemberg von rund 94.000 Fahrzeugen in 2030 und von 1,2 Mio. in 2050; darunter in 2030 rund 90.000 Pkw, 500 Busse und Lkw und rund 3.800 leichte Nutzfahrzeuge und in 2050 rund 1,1 Mio. Pkw, 24.000 Lkw, 3.000 Busse und 50.000 leichte Nutzfahrzeuge¹⁵. Diese Zahlen liegen unter den von e-Mobil (2016) prognostizierten Brennstoffzellen-Fahrzeugzahlen für Baden-Württemberg, was darauf zurückgeführt werden kann, dass der erwartete Durchbruch und die Investitionen in der Wasserstoff-Technologie im Sektor Mobilität und Verkehr in den vergangenen Jahren noch nicht in dem erwarteten Maße erfolgt sind¹⁶.

Die Verwirklichung dieser Szenarien setzt auch in Baden-Württemberg einen kontinuierlichen Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur voraus. Aktuell sind in Baden-Württemberg 14 Wasserstoff-Tankstellen in Betrieb und eine weitere ist in Realisierung¹⁷. Entsprechend dem Fahrzeug-Bestandsverhältnis von Baden-Württemberg zum Fahrzeug-Gesamtbestand in Deutschland in Höhe von rund 13% müssten von den in Deutschland geplanten 1.000 Wasserstoff-Tankstellen bis 2030 etwa 130 in Baden-Württemberg installiert werden.

Durch die nationale und vor allem internationale Marktentwicklung sind erhebliche Umsatz- und Beschäftigungspotenziale für baden-württembergische Unternehmen zu erwarten. Aufgrund der hohen Exportorientierung Baden-Württembergs wird sich ein Großteil des Umsatzes, den baden-württembergische Unternehmen im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen erzielen, jedoch durch die Aktivitäten auf dem nationalen und internationalen Wasserstoffmarkt ergeben. Dies gilt insbesondere für die derzeit zwei exportstärksten Warengruppen Baden-Württembergs Kraftwagen und Kraftwagenanteile sowie Maschinen (Statistisches Landesamt BW, 2019b), da für die Herstellung von Komponenten und Systemen, wie z.B. Brennstoffzellen-Stacks, weltweit Maschinen gebraucht werden und der Mobilitäts- und Verkehrssektor eine wichtige Rolle im zukünftigen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Markt spielen wird.

Eine Prognose des gesamten Umsatzpotenzials für baden-württembergische Unternehmen sowie für die Arbeitsplatzentwicklung in Baden-Württemberg wird in Kapitel 5 gegeben.

¹⁵ Auf Basis der Fahrzeugbestände von 2016 wurden Anteile von 13,7% für das Segment Pkw, von 11% für das Segment Busse, von 9,8% für die Segmente Lkw und leichte Nutzfahrzeuge und von 13,4% für den Gesamtfahrzeugbestand über die genannten Segmente zugrunde gelegt.

¹⁶ e-mobil BW (2016) prognostizierte, dass in einem ambitionierten Szenario u.a. 140.000 Pkw, 900 Brennstoffzellen-Hybridbusse, 600 Lkw und 6.000 leichte Nutzfahrzeuge in 2030 zum baden-württembergischen Brennstoffzellen-Fahrzeugbestand gehören könnten.

¹⁷ Vgl. H2 Mobility (www.h2.live), Stand Dezember 2019.

Abbildung 27**Überblick über aktuelle Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen in Baden-Württemberg****1. Power-to-Gas-Anlage am Wasserkraftwerk Whylen**

2018 entstand auf dem Gelände des Wasserkraftwerks Whylen-Grenzach eine Power-to-Gas-Anlage mit der mittels Wasserelektrolyse "grüner" Wasserstoff erzeugt wird. Zur Herstellung wird Strom aus dem Wasserkraftwerk genutzt. Mit der Leistung der Anlage können rund 1.000 Brennstoffzellen-Fahrzeuge betrieben werden. Ziel ist die Entwicklung eines Leitfadens über den effizienten Betrieb von Power-to-Gas-Anlagen für die Industrie.

Akteure: Energiedienst Holding AG, ZSW

Projektbudget: 6 Mio. EUR

Wertschöpfungsstufe: Wasserstoff-Herstellung

Zeitraum: Einweihung im November 2018 erfolgt

Reifegrad: Pilotprojekt

2. H2ORIZON

Bei H2ORIZON handelt es sich um eine gemeinsame Forschungs- und Demonstrationsanlage der ZEAG Energie AG und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur Weiterentwicklung von Technologien zur nachhaltigen Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff und zum Aufbau eines wasserstoffbasierten vernetzten Energiesystems. Mittels Elektrolyse und Windkraft aus dem Windpark Harthäuser Wald wird Wasserstoff erzeugt, der u.a. im DLR am Standort Lampoldshausen für den Test von Raketenantrieben sowie zum Betrieb von Blockheizkraftwerken genutzt wird.

Akteure: ZEAG Energie AG, DLR

Projektbudget: rund 11 Mio. EUR

Wertschöpfungsstufe: Wasserstoff-Herstellung und Wasserstoff-Infrastruktur

Zeitraum: Einweihung im Juli 2018 erfolgt, Regelbetrieb ab Ende 2019

Reifegrad: Forschungsprojekt mit angeschlossenen Pilotprojekten

3. HyFab Baden-Württemberg – Forschungsfabrik für Wasserstoff und Brennstoffzellen

In Ulm und Freiburg soll eine Forschungsfabrik für Wasserstoff und Brennstoffzellen entstehen, in der automatisierte Fertigungsverfahren für die Assemblierung, Qualitätssicherung und Abnahme von Brennstoffzellen-Stacks sowie Verfahren zur Herstellung von zentralen Komponenten von Brennstoffzellen wie Membran-Elektroden-Einheiten erforscht, entwickelt und erprobt werden sollen. Die Umsetzung des Projekts soll gemeinsam durch Bund, Land, Wissenschaft und Industrie erfolgen (siehe auch Kap. 4.1).

Akteure: ZSW, Fraunhofer ISE und weitere Partner aus Industrie und Wissenschaft

Projektbudget: 74 Mio. EUR (geplant laut Projektskizze)

Wertschöpfungsstufe: Wasserstoff-Anwendungen

Zeitraum: Zuschlag für Landesanteil des Projekts 2019 erteilt

Reifegrad: Forschungsprojekt

4. Entwicklung von Pkw und Bussen mit Brennstoffzelle

Audi und Daimler arbeiten intensiv an der Weiterentwicklung des Wasserstoff-Antriebs für Fahrzeuge. Audi möchte bspw. am Standort Neckarsulm Anfang der 2020er-Jahre einen Oberklasse-SUV mit Brennstoffzelle produzieren. Daimler hat u.a. mit dem GLC F-CELL bereits den ersten

Brennstoffzellen-Plug-in-Hybrid-Pkw auf die Straße gebracht, der sowohl über einen Brennstoffzellenantrieb als auch eine Batterie verfügt. Am Standort Mannheim arbeitet die Daimler-Tochter EvoBus daran, ihren Elektrobuss eCitaro mit einem Brennstoffzellen-Range-Extender auszustatten.

Akteure: Daimler AG/EvoBus GmbH
Wertschöpfungsstufe: Wasserstoff-Anwendungen
Reifegrad: Kommerzielle Produkte

5. Weiterentwicklung von Polymerelektrolyt-Stacks zur Serienreife

Im April 2019 gab Bosch bekannt, in die Serienfertigung von Brennstoffzellen für Lkw und Pkw einzusteigen. Zur Weiterentwicklung und Produktion von Brennstoffzellen-Stacks kooperiert Bosch mit dem schwedischen Stack-Hersteller Powercell. Ziel ist die Entwicklung der Brennstoffzellen-Stacks zur Serienreife für den weltweiten Automobilmarkt.

Akteure: Bosch GmbH, Power Cell Sweden AB
Projektbudget: 50 Mio. EUR Lizenzkosten
Wertschöpfungsstufe: Wasserstoff-Anwendungen
Zeitraum: Kooperation in 2019 vereinbart, Stack soll bis 2022 auf den Markt kommen
Reifegrad: Forschungsprojekt

6. Testprojekt für Wasserstoff-Lkw in Europa

Im Rahmen des "H2Haul"-Förderprojekts, in dem Schwermkraftwagen mit Brennstoffzellen an mehreren Standorten in Europa getestet werden sollen, entwickelt ElringKlinger als Unternehmen mit langjähriger Erfahrung in der Produktion von Brennstoffzellen-Systemen einen Brennstoffzellenantrieb, mit dem drei Fahrzeuge der VDL Groep ausgestattet und anschließend erprobt werden sollen. Das Projekt wird durch einen Zuschuss des FCH JU gefördert.

Akteure: ElringKlinger AG in Kooperation mit der VDL Groep

Projektbudget: n/a
Wertschöpfungsstufe: Wasserstoff-Anwendungen
Zeitraum: Gestartet im Oktober 2019
Reifegrad: Pilotprojekt

7. Brennstoffzellenprojekthaus

Zur Weiterentwicklung von Brennstoffzellen setzt MAHLE auf ein eigenes Brennstoffzellenprojekthaus, in dem alle Kompetenzen verschiedener Entwicklungsbereiche des Unternehmens zum Thema Brennstoffzelle gebündelt werden. Im Projekthaus werden unter anderem das Zusammenwirken von Thermo-, Luft-, Liquid-Management und Filtration gezielt untersucht und die Wechselwirkungen einzelner Komponenten in Simulationen ermittelt, um die Grundlagen für wirtschaftliche und wettbewerbsfähige Brennstoffzellen-Fahrzeuge zu schaffen.

Akteure: MAHLE GmbH
Projektbudget: n/a
Wertschöpfungsstufe: Wasserstoff-Anwendungen
Zeitraum: Bekanntgabe im August 2019
Reifegrad: Forschungsprojekt

8. Pa-X-ell2 – Brennstoffzellen für Kreuzfahrtschiffe

Freudenberg Sealing Technologies mit Sitz in Weinheim verlatete im Oktober, in einem Kooperationsprojekt u.a. mit der Meyer Werft in Papenburg die Entwicklung einer neuen Generation von Brennstoffzellen mit integrierter Kraftstoffreformierung für einen Einsatz auf Hochsee-Passagierschiffen in Angriff zu nehmen. Das Projekt wird im Rahmen des NIP gefördert.

Akteure: u.a. Freudenberg Sealing Technologies, Meyer Werft, DLR
Projektbudget: n/a
Wertschöpfungsstufe: Wasserstoff-Anwendungen
Zeitraum: Erste Praxistests für 2021 geplant
Reifegrad: Pilotprojekt

Stand der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg





Baden-Württemberg bietet durch seine wirtschaftliche Ausgangssituation und als Standort wichtiger Unternehmen und Forschungsinstitutionen sehr gute Rahmenbedingungen, um den erwarteten nationalen und internationalen Markthochlauf der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie mitzugestalten und wirtschaftlich davon zu profitieren. Mehr als 90 im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen tätige Unternehmen mit Standorten in Baden-Württemberg decken bereits heute die gesamte Wertschöpfungskette von Wasserstoff und Brennstoffzellen in unterschiedlichen Integrationsstufen ab und bilden damit einen substanziellen Anteil an den in Deutschland und Europa in diesem Bereich aktiven Unternehmen.

Die baden-württembergische Akteurslandschaft im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen verfügt neben langjähriger Erfahrung in Forschung und Entwicklung über eine hohe technologische Kompetenz und Innovationskraft. Zu den zentralen Akteuren gehören sowohl kleine und mittelständische wie auch international agierende Großunternehmen. In den letzten Jahren sind kontinuierlich neue Akteure in das Geschäftsfeld Wasserstoff und Brennstoffzellen eingestiegen und investieren in diesem Bereich, zuletzt etwa Bosch oder Iveco. Daneben erwägen weitere Unternehmen den Markteintritt. Dadurch wächst die lokale Akteurslandschaft kontinuierlich weiter.

Mehrere baden-württembergische Unternehmen haben bereits Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen auf den Markt gebracht, die für eine kommerzielle Nutzung und bei der Bereitstellung von notwendigen Produktionskapazitäten für den Markthochlauf bereitstehen. Bedingt durch die Wirtschaftsstruktur des Bundeslandes liegt eine besondere Stärke der baden-württembergischen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie im Bereich der Anwendungen für Mobi-

lität und Verkehr mit vielen vor Ort ansässigen Zulieferern und OEMs.

Ergänzt wird die Akteurslandschaft durch 18 universitäre und außeruniversitäre Forschungsinstitutionen, die insbesondere in der angewandten Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Forschung stark aufgestellt sind und durch wegweisende Forschungs- und Demonstrationsprojekte erheblich zur Innovationskraft des Standorts Baden-Württemberg beitragen.

Aus wirtschaftlicher Sicht und mit Blick auf den aktuellen Umsatz sowie die Beschäftigungszahlen spielen Wasserstoff und Brennstoffzellen zum jetzigen Zeitpunkt noch eine eher untergeordnete Rolle, sie werden jedoch von den Unternehmen als zukünftig relevantes Geschäftsfeld wahrgenommen, in das zunehmend investiert wird. Um zukünftige Wertschöpfungspotenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie für Baden-Württemberg zu nutzen und zukünftig im internationalen Wettbewerb konkurrenzfähig zu bleiben, wird es daher in den nächsten zwei bis fünf Jahren entscheidend sein, vorhandene Kompetenzen durch Investitionen weiter auf- und auszubauen. Das Beispiel der Batterietechnologie, bei der Europa gegenüber den asiatischen Leitmärkten den Anschluss an die Technologieentwicklung sowie seine Marktposition verloren hat, zeigt deutlich, wie wichtig es ist, rechtzeitig in Zukunftstechnologien zu investieren und Marktanteile frühzeitig zu sichern.

Im Rahmen dieses Kapitels wird die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Akteurslandschaft Baden-Württembergs detaillierter vorgestellt sowie deren nationale und internationale Wettbewerbsfähigkeit analysiert. In Kapitel 4.1 wird zunächst ein Überblick über die baden-württembergischen Unternehmen und Forschungsinstitutionen, die im Bereich Wasserstoff und

Brennstoffzellen aktiv sind, sowie über aktuelle Umsatz- und Beschäftigungszahlen gegeben. Die Analyse der Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandorts folgt in Kapitel 4.2.

4.1 Marktüberblick und Akteure

UNTERNEHMENSLANDSCHAFT

Baden-Württemberg verfügt heute über eine breit aufgestellte Forschungs- und Unternehmenslandschaft im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen und gehört damit in Deutschland und Europa sowie teilweise auch im weltweiten Vergleich zu den wichtigen Technologiestandorten in diesem Bereich. Die allgemein starke Stellung des Wirtschaftsstandorts Baden-Württemberg im nationalen und internationalen Vergleich spiegelt sich in der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie wider: Bereits heute sind mehr als 90 Unternehmen und 18 Forschungsinstitutionen am Standort zum Thema aktiv. Das Spektrum reicht hierbei von kleinen bis mittelständischen Unternehmen bis hin zu international agierenden Großkonzernen, die mit weltweiten Gesamtumsätzen von bis zu rund 170 Mrd. EUR (in allen Geschäftsbereichen) zu den weltweiten Marktführern in ihren jeweiligen Branchen gehören und sich durch hohe Innovations- und Investitionskapazität sowie ausgeprägte Technologiekompetenz auszeichnen. Eine Auswahl international führender Unternehmen mit Hauptsitz bzw. Forschungs- oder Entwicklungsstandort in Baden-Württemberg, die auch im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen investieren, zeigt Abbildung 28.

Die baden-württembergische Wirtschaft verfügt über einen klaren Schwerpunkt im produzierenden Gewerbe (mit einem Anteil von rund 40% an der Bruttowertschöpfung; Statistisches Landesamt BW, 2018), insbesondere

in der Automobilindustrie sowie im Maschinenbau. Gerade in diesen Bereichen, in denen der Standort Baden-Württemberg klare Stärken aufweist, liegen vor dem Hintergrund der erwarteten weiteren Marktentwicklung für Wasserstoff und Brennstoffzellen und der zunehmend wichtigen Rolle der Technologie signifikante wirtschaftliche Potenziale für Industrie und Unternehmen.

Die im Rahmen der Studie durchgeführte Analyse der Aktivitäten der heute im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen tätigen Unternehmen aus Baden-Württemberg zeigt, dass diese in unterschiedlicher Intensität die gesamte Wertschöpfungskette der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in verschiedenen Integrationsstufen von der Komponentenherstellung bis zum Anlagenbau bzw. zur Herstellung von Endanwendungen abdecken. Klarer Schwerpunkt der Aktivitäten der im Bereich tätigen Unternehmen ist dabei – vor dem Hintergrund der allgemeinen Wirtschaftsstruktur Baden-Württembergs und der wichtigen Rolle des Automobilbaus darin nicht verwunderlich – die Herstellung von Komponenten und Endanwendungen für den Mobilitäts- und Verkehrssektor.

Abbildung 29 zeigt eine Übersicht über diejenigen Unternehmen, die heute in der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg in den verschiedenen Wertschöpfungsstufen tätig sind und ihren Hauptsitz oder einen Produktionsstandort im Land haben. Neben Unternehmen, die dem produzierenden Gewerbe zuzuordnen sind, ist derzeit vor allem eine Reihe von Unternehmen aus dem Dienstleistungssektor, vor allem im Bereich Beratung und Planung/Engineering, im Themenfeld Wasserstoff und Brennstoffzellen aktiv.

Der Bereich Betrieb und Wartung von Infrastrukturanlagen (z.B. Tankstellen, Produktionsanlagen, Verteilungsinfrastruktur und Distribution) sowie Wasserstoff-

Abbildung 28

Auswahl international führender Unternehmen mit Sitz oder Standort in Baden-Württemberg, die im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen tätig sind

[weltweiter Gesamtumsatz 2018 in Mrd. EUR, # Mitarbeiter weltweit 2018, gerundet]

DAIMLER Automobilhersteller Umsatz: 167,4 Mrd. EUR Beschäftigte: 299.000	BOSCH Mischkonzern Umsatz: 78,5 Mrd. EUR Beschäftigte: 410.000	AUDI Automobilhersteller Umsatz: 59,3 Mrd. EUR Beschäftigte: 92.000	ENBW Energieversorger Umsatz: 20,6 Mrd. EUR Beschäftigte: 22.000
MAHLE Automobilzulieferer Umsatz: 12,6 Mrd. EUR Beschäftigte: 80.000	FREUDENBERG Zulieferer (u.a. Automobil) Umsatz: 9,5 Mrd. EUR Beschäftigte: 49.000	MANN + HUMMEL Zulieferer (u.a. Automobil) Umsatz: 4,0 Mrd. EUR Beschäftigte: 21.000	ELRINGKLINGER Automobilzulieferer Umsatz: 1,7 Mrd. EUR Beschäftigte: 10.000

Quelle: Roland Berger

produktion stellt derzeit noch keinen Bereich nennenswerter Unternehmensaktivitäten dar. Bestehen die Produktionsanlagen und Infrastrukturen, die vor allem für die herkömmliche Wasserstoffnutzung als Rohstoff in der Industrie sowie für den Standort des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Lampoldshausen und seine Raketentriebwerksprüfstände vorgehalten werden, werden vor allem durch etablierte Industriegasehersteller betrieben, die nicht hauptsächlich in Baden-Württemberg ansässig sind. Auch der Betrieb der bisher in Baden-Württemberg errichteten Wasserstoff-Tankstellen wird durch die jeweils verantwortlichen Unternehmen der Initiative H2 Mobility

übernommen. Gleichzeitig beschäftigen sich aber verschiedene baden-württembergische Energieversorger und Infrastrukturbetreiber bereits mit den Potenzialen möglicher zukünftiger Geschäftsaktivitäten im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen; teilweise sind die Unternehmen schon in Demonstrationsprojekte bzw. die Entwicklung weiterer Projekte im Land involviert (so z.B. EnBW, terranets BW, ZEAG Energie, MVV Energie und weitere).

Auch im Bereich Herstellung von Produktions- und Fertigungsanlagen für Komponenten- und Endanwendungshersteller bestehen derzeit aufgrund des aktuellen

Abbildung 29**Übersicht über die im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen tätigen Unternehmen mit Standorten in Baden-Württemberg****Komponentenhersteller**

Aeroline Tube Systems Baumann	GMT Membrantechnik	Otto Egelhof
Allgemeine Gold- und Silberschneideanstalt	Gustav Wahler	Parcom Präzisionsarmaturen
Amrhein Messtechnik	H&K Behälter und Edelstahltechnik	QuinTech
between Lizenz	Hydrotechnik	Rietschle Thomas
BIN Boysen Innovationszentrum Nagold	KACO	Robert Bosch
Binder	KACO new energy	Rosenberger
Bürkert Fluid Control Systems	KNF Neuberger	S.M.A. Metalltechnik
CeramTec	Krempel	Schaeffler
Dr. Eugen Mohr	LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen	Scheuermann & Heilig
DWT-Munk, Dichtungs- und Wartungstechnik	LEONI Bordnetz-Systeme	Siemens
Eberspächer	Liebherr-International Deutschland	Smart Testsolutions
EBM-Papst	Magnet-Schultz	Staiger
Eisenbau Heilbronn	MAHLE	Stäubli Electrical Connectors
ElringKlinger	MANN+HUMMEL	Trelleborg Sealing Solutions Germany
Endress+Hauser	Mayser m.pore	U. I. Lapp
ergo: elektronik	Mehrer Compression	Umicore
Exyte (zuvor M+W Group)	Mercedes-Benz FuelCell	Valeo
Felss Group	Modine Europe	Valmet Automotive Engineering
Festo	Müller Behälter- & Anlagenbau	WS Reformer
Freudenberg	Munk	Zentro-Elektrik
FUMATECH BWT	Odenwald-Chemie	Ziehl-Abegg
Gardner Denver		

Teil-Systemintegratoren

AVL Deutschland

Diehl Aerospace

ElringKlinger

EPH elektronik

Freudenberg

FUMATECH BWT

HMF Hueber Maschinen- und Fahrzeugbau

MANN+HUMMEL

Mercedes-Benz FuelCell

Robert Bosch

Wasserelektrolyse Hydrotechnik

WS Reformer

Systemintegratoren

Audi

Daimler

EvoBus

Freudenberg

Viessmann/Hexis

Wasserelektrolyse Hydrotechnik

Beratungen/Engineering-Dienstleistungen

AKKA Technologies

AKOMBE Alexandra Huss

Arena Innovation

AtTrack

Bitter

Blauwerk

Büro für Gase- und Anwendungstechnik

DMT Produktentwicklung

Fautronix

Fichtner

GreenING

Peter Sauber Agentur

prognum Automotive

PSW Engineering

Quintech

Sebastian Wider - Engineering Services

SL-TecH2

SWE-Mobility

TechnoStart

Unicorn Engineering

Wenger Engineering

Abbildung 30

Abdeckung verschiedener Stufen der Wertschöpfungskette für Wasserstoff und Brennstoffzellen durch Unternehmen in Baden-Württemberg [Anzahl Hersteller]

Systemintegratoren¹

Automobil 3	Elektrolyseur 1	Stationäre Anlagen 2
Audi	Wasserelektrolyse Hydrotechnik	Viessmann/Hexis
Daimler		Freudenberg
EvoBus		

Teil-Systemintegratoren¹

Automobil 3	BZ-Systeme 4	Elektrolyseur 1	Stationäre Anlagen 4
Audi	Wasserelektrolyse Hydrotechnik	Viessmann/Hexis	AVL Deutschland
Daimler		Freudenberg	Diehl Aerospace
EvoBus			Freudenberg
			WS Reformer

Komponentenhersteller

STACKKOMPONENTEN	Bipolarplatten 1	Membrane/Membran-Elektroden-Einheit 7	Gasdiffusionsschicht 2
	ElringKlinger	Allgemeine Gold- und Silberschneideanstalt	Freudenberg
		between Lizenz	Umicore
		ElringKlinger	
		FUMATECH BWT	
		GMT Membrantechnik	
		Robert Bosch	
		Umicore	

Komponentenhersteller

PERIPHERIEKOMPONENTEN	Befeuchter 5	Dichtungen 7	Druckbehälter 6	Filter 4
	Freudenberg	CeramTec	Amrhein Messtechnik	MAHLE
	FUMATECH BWT	DWT-Munk Dichtungs- und Wartungstechnik	Binder	Mann+Hummel
	GMT Membrantechnik	ElringKlinger	Dr. Eugen Mohr	Freudenberg
	MAHLE	Freudenberg	Eisenbau Heilbronn	Robert Bosch
	Valmet Automotive Engineering	KACO	H&K Behälter und Edelstahltechnik	
		Odenwald-Chemie	Müller Behälter- und Anlagenbau	
		Trelleborg Sealing Solutions Germany		
	Katalysatoren 2	Kompressoren 3	Pumpen 7	Reformer 3
	BIN Boyen Innovationszentrum Nagold	Gardner Denver	Aeroline Tube Systems	Eberspächer
	Umicore	Mehrer Compression	Baumann	MAHLE
		Rietschle Thomas	EBM-Papst	WS Reformer
			Gardner Denver	
			KNF Neuberger	
			MAHLE	
			Rietschle Thomas	
			Schaeffler	

■ Hohe Abdeckung
 ■ Mittlere Abdeckung
 ■ Geringe Abdeckung

¹ Farbcodierung zur Kennzeichnung der Abdeckung der Wertschöpfungskette aufgrund der geringeren Anzahl von Akteuren in diesen Segmenten angepasst

Komponentenhersteller

PERIPHERIEKOMPONENTEN	Rohrleitungen 6	Ventile 5	Sonstige ² 14	
	Aeroline Tube Systems	Bürkert Fluid Control Systems	Exyte	Modine Europe
	Baumann	Magnet-Schultz	Gustav Wahler	Munk
	Amrhein Messtechnik	Otto Egelhof	KACO new energy	QuinTech
	CeramTec	Parcom Präzisionsarmaturen	Krempel	Rosenberger
	Felss Group	Staiger	LEONI Bordnetz-Systeme	S.M.A. Metalltechnik
	Parcom Präzisionsarmaturen		Mayser m.pore	Scheuermann & Heilig
	Rosenberger		Mercedes-Benz Fuel Cell	Stäubli Electrical Connectors
SONSTIGE SYSTEME	Kühltechnik 6	Leistungselektronik 11	Luftmanagement 4	Mess-/Steuerungstechnik 7
	MAHLE	CeramTec	EBM-Papst	Bürkert Fluid Control Systems
	Eberspächer	Eberspächer	Eberspächer	Endress+Hauser
	Siemens	Hydrotechnik	Siemens	Festo AG
	S.M.A. Metalltechnik	ergo: elektronik	Ziehl-Abegg	LAMTEC Meß- und Regeltech- nik für Feuerungen
	Valeo	Liebherr-International Deutschland		Liebherr-International Deutschland
	Ziehl-Abegg	MAHLE		Robert Bosch
		Robert Bosch		Schaeffler
		Siemens		
		Smart Testsolutions		
		U.I. Lapp		
		Zentro-Elektrik		

Hohe Abdeckung
 Mittlere Abdeckung
 Geringe Abdeckung

² Elektrische Leitungen, Klima-/Heiz-/Kühlleitungen, Kabel und Stromrichter.

Hinweis: Die Übersicht basiert auf öffentlich verfügbaren Informationen und Ergebnissen der Experteninterviews. Es kann daher keine Vollständigkeit gewährleistet werden.

Quelle: Roland Berger

Marktentwicklungsstandes noch keine nennenswerten Aktivitäten baden-württembergischer Unternehmen. Bisher gelieferte Anlagen sind Einzelanfertigungen einzelner Hersteller und kein fester Bestandteil von deren Produktportfolio. Zukünftig können sich aber mit dem weiteren Markthochlauf und der Ausweitung von Produktionskapazitäten der Komponenten und Anwendungshersteller sowie dem Einstieg in die Serienproduktion hierbei neue Marktsegmente für die lokale Maschinenbauindustrie entwickeln; vereinzelt waren baden-württembergische Unternehmen bereits am Bau von Pilotanlagen beteiligt bzw. bereiten derzeit den Markteintritt in das Segment vor.

Für eine genauere Analyse der Aktivitäten baden-württembergischer Unternehmen sind in der Gesamt-Wertschöpfungskette von Wasserstoff und Brennstoffzellen (die die Produktion, Speicherung und Distribution sowie Endanwendungen verschiedener Bereiche umfasst) verschiedene Wertschöpfungsstufen zu unterscheiden: Komponentenhersteller, Teil-Systemintegratoren und Systemintegratoren. Die erste Wertschöpfungsstufe umfasst dabei mit den Komponentenherstellern Entwickler und Produzenten von einzelnen Bestandteilen, die in komplexen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Systemen und -Anwendungen Verwendung finden. Auf dieser Stufe liegt ein klarer Schwerpunkt der aktuellen baden-württembergischen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie, verbunden mit einem klaren Fokus auf die Herstellung von Komponenten für Mobilitätsanwendungen. Dabei profitiert Baden-Württemberg von seiner etablierten starken Zulieferindustrie der Automobilwirtschaft. Diese kann dabei auf bestehende Kompetenzen aus ihrem Kerngeschäft aufbauen und weist die notwendige technologische Kompetenz im Bau von Komponenten für Mobilitätsanwendungen auf, um in diesem Segment auch im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen erfolgreich tätig zu sein.

Auf Ebene der Komponentenhersteller kann weiterhin zwischen Herstellern von Komponenten des Brennstoffzellen-Stacks, Peripheriekomponenten-Herstellern und Herstellern sonstiger Peripheriesysteme unterschieden werden.

Wie aus Abbildung 30 ersichtlich ist, decken baden-württembergische Unternehmen die Subsegmente und Einzelkomponenten von Brennstoffzellen-Anwendungen in unterschiedlicher Intensität ab – grundsätzlich sind baden-württembergische Unternehmen aber in allen relevanten Bereichen aktiv.

Stack-Komponentenhersteller entwickeln und produzieren die elementaren Bestandteile einer Brennstoffzelle bzw. eines Brennstoffzellen-Stacks. Hierzu gehören die Membran-Elektroden-Einheit, Bipolarplatten und die Gasdiffusionsschicht. Insbesondere mit Blick auf die Herstellung der Membran-Elektroden-Einheit verfügt Baden-Württemberg mit mehreren in dem Bereich aktiven Unternehmen über eine sehr gute Abdeckung bei einer der zentralen Komponenten der Technologie.

Zum zweiten Subsegment der Peripheriekomponenten zählen elementare Bestandteile, wie sie in verschiedenen Brennstoffzellen-Systemen und -Anwendungen zum Einsatz kommen, z.B. in Fahrzeugen, Elektrolyseuren, Wasserstoff-Tankstellen und stationären KWK-Anlagen. Zu den Peripheriekomponenten zählen z.B. Befeuchter, Dichtungen, Druckbehälter, Filter, Katalysatoren, Kompressoren, Pumpen und Reformer. Auch in diesem Bereich der Wertschöpfungskette decken baden-württembergische Unternehmen, wie z.B. Freudenberg, Mann+Hummel oder CeramTec, alle wesentlichen Komponenten ab. Besonders stark sind baden-württembergische Unternehmen dabei heute im Bereich Dichtungen und Pumpen vertreten.

Die dritte Untergruppe der Komponentenhersteller bilden Hersteller von Peripheriesystemen wie Kühltechnik, Leistungselektronik, Luftmanagement sowie Mess- und Steuerungstechnik. Es handelt sich dabei häufig um Bestandteile, die die technischen Abläufe, z.B. eines Fahrzeugs oder eines Elektrolyseurs, steuern und unterstützen. Auch hier sind Firmen aus Baden-Württemberg an der Produktion aller wesentlichen Komponenten beteiligt, wobei besonders die Hersteller von Leistungselektronik stark vertreten sind, zu denen z.B. Unternehmen wie Wasserelektrolyse Hydrotechnik und MAHLE gehören.

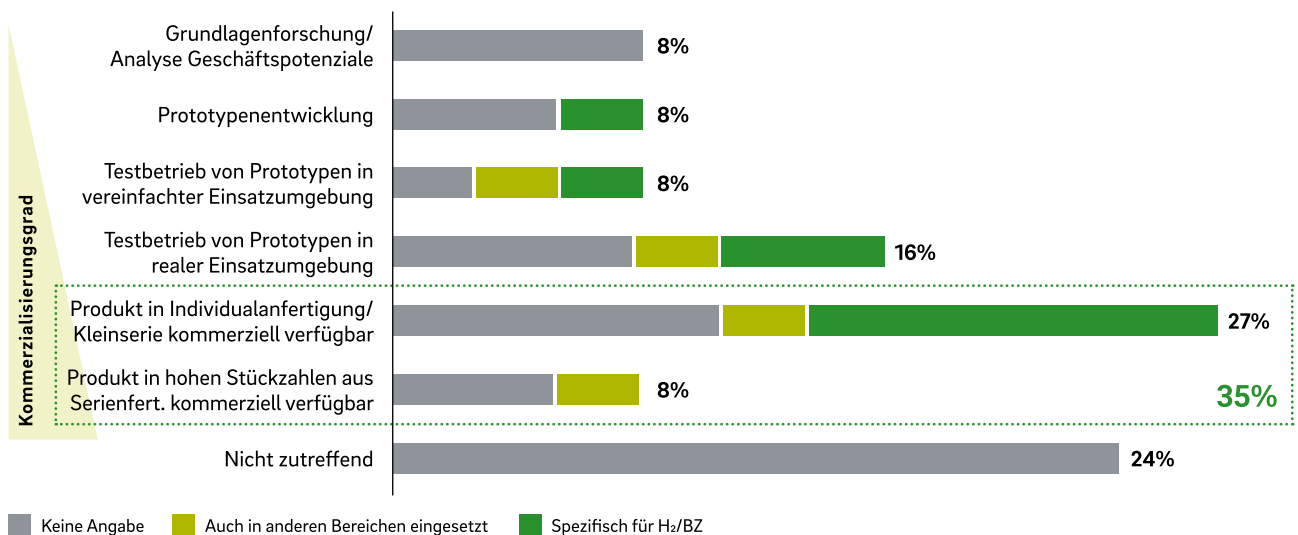
Die zweite Wertschöpfungsstufe der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie umfasst sogenannte Teil-Systemintegratoren, die einzelne Komponenten zu Subsystemen verarbeiten, die dann Bestandteil einer komplexen Brennstoffzellen-Anwendung sein können. Der dritten Stufe der Wertschöpfung werden Systemintegratoren, wie bspw. OEMs oder Anlagenbauer, zugeordnet, die eine Vielzahl technischer Subsysteme zu einem Gesamtprodukt vereinen. In diesen beiden Wertschöpfungsstufen ist die Anzahl tätiger Unternehmen naturgemäß geringer – gleichzeitig weist Baden-Württemberg aber auch hier eine breite Abdeckung der Wertschöpfung auf.

Auch bei der Betrachtung der Unternehmen auf diesen weiteren Ebenen der Wertschöpfungskette – den Teil-Systemintegratoren und Systemintegratoren – zeigt sich Baden-Württembergs Stärke in der Automobilwirtschaft. Daimler deckt beispielsweise mit seinen Tochterunternehmen Mercedes-Benz Fuel Cell, Mercedes-Benz und EvoBus die gesamte Bandbreite der Wertschöpfung im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen ab – von Forschung und Entwicklung einzelner Komponenten, wie Brennstoffzellen-Stacks, über die Integration von Brennstoffzellen-Systemen sowie die Produktion der

Endanwendungen, wie z.B. bei seiner GLC F-Cell-Kleinserie oder den geplanten ÖPNV-Bussen mit Brennstoffzellen-Range-Extender. Audi hat seine Aktivitäten zum Thema Wasserstoff und Brennstoffzelle ebenfalls in jüngster Zeit intensiviert, befindet sich aktuell aber noch im Entwicklungsstadium; dabei deckt der Standort Neckarsulm die Entwicklung für den Bereich Brennstoffzellen für den gesamten VW-Konzern ab. Das Unternehmen hat angekündigt, ab 2021 ebenfalls einen eigenen Brennstoffzellen-Pkw in Kleinserie als Leasing-Fahrzeug auf den Markt bringen zu wollen.

Wie hierbei deutlich wird, sind auf Ebene der OEMs im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen zunehmend Bestrebungen zu erkennen, mehrere Stufen der Wertschöpfung innerhalb des eigenen Unternehmens abzudecken und somit die Position im Wettbewerb weiter zu stärken; dies geschieht vor allem bei als wettbewerbsdifferenzierend ausgemachten Komponenten. So verfügt Daimler mit Mercedes-Benz Fuel Cell über ein Tochterunternehmen, das Brennstoffzellen-Komponenten und -Systeme erforscht, entwickelt und vertreibt. Damit treten die OEMs partiell in direkter Konkurrenz zur lokalen Zulieferindustrie, insbesondere mit Blick auf wettbewerbsdifferenzierende Komponenten wie Brennstoffzellen-Stacks. Andererseits lässt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch kein klarer Trend erkennen, der eine zunehmende Konzentration und Integration der Wertschöpfung bei den OEMs zur Folge hat und die Zulieferindustrie, zumindest in einigen Bereichen, überflüssig machen würde. Grundsätzlich wird für Brennstoffzellen-Systeme eine Vielzahl verschiedener Komponenten benötigt, die erwartbar nicht alle vom selben Hersteller geliefert werden können; hierfür ist das System der Automobilzulieferer fest etabliert.

Im Bereich Anlagenbau von Elektrolyseuren zur Wasserstoff-Herstellung sind in Baden-Württemberg bislang

Abbildung 31**Entwicklungsstadium der Produkte und Aktivitäten der Unternehmen im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich [% je Antwortkategorie]****Umfrage: Entwicklungsstadium der Produkte und Aktivitäten****FRAGE:** "In welchem Entwicklungsstadium befinden sich Ihre Aktivitäten und Produkte im H₂/BZ-Bereich?" (n = 37)

Quelle: Roland Berger

nur wenige Unternehmen tätig. Eines davon ist das Karlsruher Unternehmen Wasserelektrolyse Hydrotechnik, das in den Bereichen Projektierung, Fertigung und Vertrieb von Elektrolyseuren aktiv ist und schlüsselfertige und individuell erstellte Gesamtanlagen konzipiert und liefert. Allerdings wird für die Herstellung von Elektrolyseuranlagen wiederum eine Vielzahl von Komponenten benötigt, die teilweise im Bereich von Brennstoffzellen-Systemen und mobilen Endanwendungen relevant sind. Dementsprechend pro-

duziert die baden-württembergische Zulieferindustrie auch Komponenten für diesen Bereich, ohne dass jedoch ein großer Hersteller von Elektrolyseuranlagen im Land ansässig wäre.

Mit Blick auf stationäre Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen, wie z.B. KWK-Anlagen, verfügt Baden-Württemberg unter anderem mit Viessmann bzw. dessen im Land ansässigen Tochterunternehmen Hexis sowie mit Freudenberg Sealing Technologies der

Freudenberg Unternehmensgruppe über zwei namhafte Firmen, die Brennstoffzellen-Heizgeräte produzieren und vertreiben. Im Bereich Wasserstoff-Infrastruktur, wie z.B. der Herstellung von Wasserstoff-Tankstellen, gibt es derzeit keine in Baden-Württemberg ansässigen Unternehmen. In beiden Segmenten sind aber wiederum baden-württembergische Zulieferunternehmen aktiv und produzieren einzelne Komponenten für Tankstellen oder weitere Endanwendungen außerhalb des Mobilitätssektors.

Im Hinblick auf den Entwicklungs- bzw. Kommerzialisierungsgrad der von baden-württembergischen Unternehmen hergestellten Produkte im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen zeigt sich, dass viele Unternehmen, vor allem der Zulieferindustrie, bereits heute über entwickelte Produkte in Individualanfertigung bzw. Kleinserie bzw. als kommerzielles Angebot verfügen und diese aktiv im Markt vertreiben. Mehr als ein Drittel der in der Online-Umfrage befragten Unternehmen gab an, bereits Produkte in Serie zu fertigen. Zum großen Teil handelt es sich noch um Kleinserien bzw. Individualanfertigungen, es gibt jedoch auch bereits Unternehmen, die Produkte in hohen Stückzahlen aus Serienfertigung anbieten (Abb. 31).

Dazu gehören insbesondere Produkte rund um die Brennstoffzelle wie Brennstoffzellenmodule und Kühlmittelausgleichsbehälter. Ein Beispiel aus dem Bereich der Teilsystem-Integratoren mit entwickeltem Produktportfolio mit relevanten produzierten Stückzahlen liefert die Firma ElringKlinger, die seit rund 20 Jahren im Bereich Brennstoffzellen aktiv ist und vollständige Brennstoffzellen-Stacks anbietet, die in vielen Anwendungen eingesetzt werden können. Dies ist vor allem deshalb hervorzuheben, da aufgrund des derzeitigen Entwicklungsstandes des Wasserstoff- und Brennstoffzellenmarktes sich generell viele in diesem Bereich

tätige Unternehmen noch im Geschäftsentwicklungs- bzw. Forschungsstadium ihrer Aktivitäten befinden; vor allem in Bezug auf die Komponentenhersteller verfügt der Standort Baden-Württemberg jedoch schon heute über ein breit vorhandenes Produktportfolio im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen, das auf dem Weltmarkt vertrieben wird.

FORSCHUNGSLANDSCHAFT

Die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg profitiert heute von einer im Bundesvergleich stark aufgestellten und international vernetzten Forschungslandschaft, die zur hohen Innovationskraft des Standorts als wichtiger Standortfaktor beiträgt. Mit 18 in Baden-Württemberg angesiedelten universitären und außeruniversitären Forschungsinstitutionen, die im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen aktiv sind, weist Baden-Württemberg eine besonders hohe Forschungsdichte im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie auf (Abb. 32). Neben der Fraunhofer-Gesellschaft, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Max-Planck-Gesellschaft sind hierbei insbesondere das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg sowie das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zu nennen.

Die baden-württembergischen Forschungsinstitutionen sind international im Themenfeld etabliert und forschen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Wasserstoff und Brennstoffzellen – von der Wasserstoff-Herstellung über die Wasserstoff-Infrastruktur bis hin zu Wasserstoff-Endanwendungen. Ein klarer Fokus der Forschung liegt auf angewandter Forschung, ein wichtiger Bereich dabei ist nachhaltige Mobilität. Durch das Testen von Prototypen, die Durchführung von Demonstrationsprojekten und die Entwicklung von

Abbildung 32**Überblick über universitäre und außeruniversitäre Forschungsinstitutionen, die in Baden-Württemberg im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen aktiv sind**

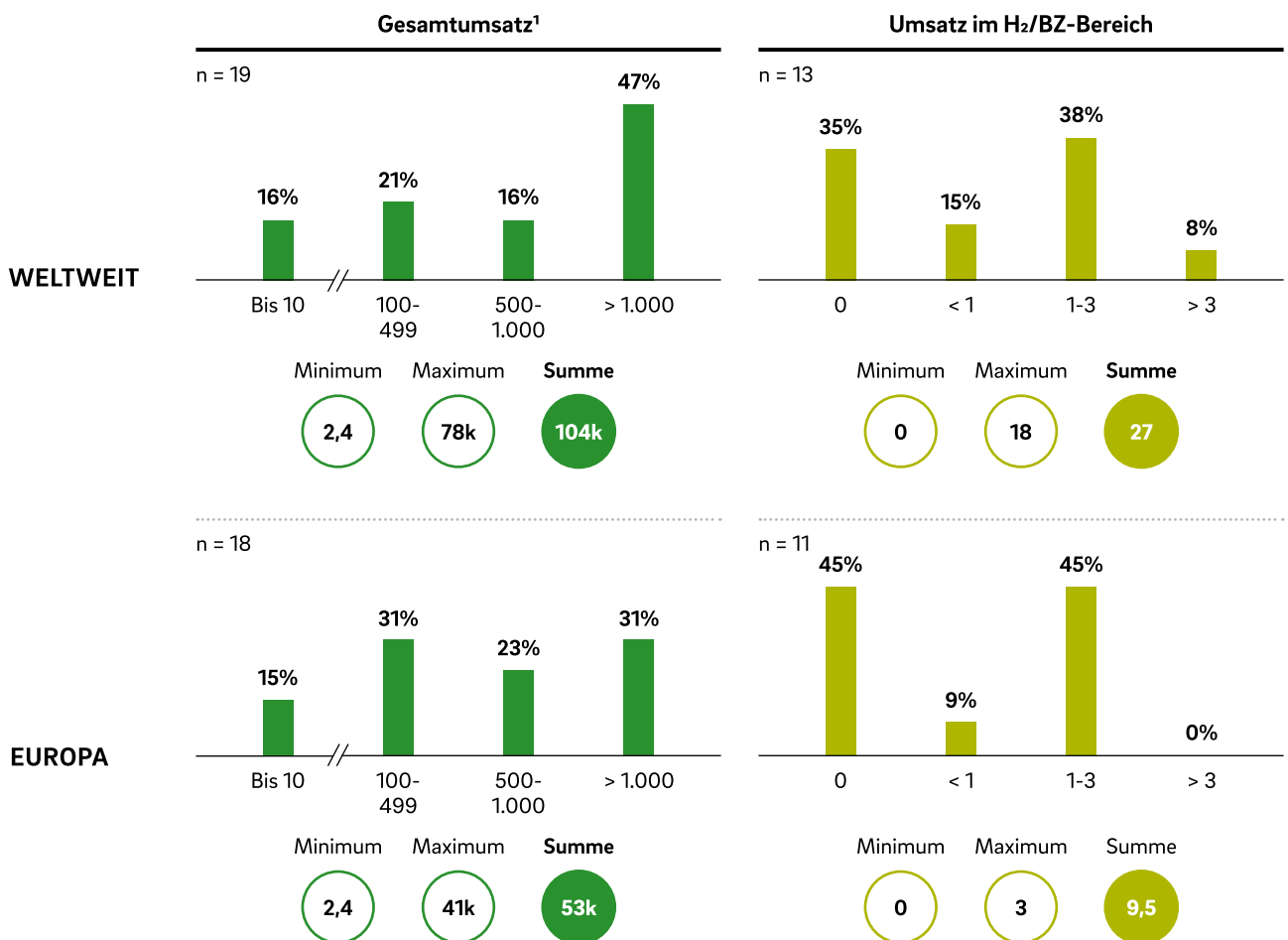
- Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Deutsches Institut für Textil- und Faserforschung
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
- Duale Hochschule Baden-Württemberg
- Europäisches Institut für Energieforschung
- Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie
- Fraunhofer-Gesellschaft
- Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung
- Hochschule Esslingen
- Hochschule Furtwangen
- Hochschule Konstanz
- Hochschule Offenburg
- Hochschule Ulm
- Karlsruher Institut für Technologie
- Max-Planck-Gesellschaft
- Universität Ulm
- Universität Stuttgart
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung BW

Quelle: Roland Berger

eigenen kommerziellen Anwendungen tragen die Forschungsinstitutionen zur kontinuierlichen technologischen Weiterentwicklung von Produkten der lokalen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie bei. Bereits heute besitzen einige baden-württembergische Forschungsinstitutionen durch den starken Fokus auf die anwendungsorientierte Forschung Patente im Bereich Wasserstoff- und Brennstoffzellen, die teilweise weltweit gültig sind.

Die baden-württembergische Forschung profitiert von den hohen Ausgaben des Bundeslandes für Ausgaben für universitäre oder sonstige nichtunternehmensinterne Forschung. Unter allen Bundesländern weist Baden-Württemberg gemessen an der Wirtschaftsleistung den höchsten Anteil an Forschungsausgaben auf und hat darüber hinaus in den vergangenen fünf Jahren die höchsten Fördermittel vom Bund erhalten.

Verschiedene aktuelle Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die die Forschungsinstitutionen unter anderem auch in Zusammenarbeit mit lokal ansässigen Unternehmen durchführen, positionieren Baden-Württemberg als einen international wichtigen Forschungsstandort der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie – insbesondere im Mobilitäts- und Verkehrssektor. Besondere Bedeutung hierbei hat das aktuell in Planung befindliche Projekt "HyFab-Baden-Württemberg". Im Rahmen des Projekts soll eine Forschungsfabrik für Brennstoffzellen und Wasserstoff in Ulm und Freiburg errichtet werden, in der automatisierte Fertigungs- und Qualitätssicherungsverfahren für Brennstoffzellen-Stacks entwickelt und erprobt werden sollen (Staatsministerium Baden-Württemberg, 2019). Der Fokus liegt dabei auf dem Einsatz im Automobilbereich. Der nach aktuellen Planungen geschätzte Finanzmittelbedarf von rund 74 Mio. EUR in den nächsten zehn Jahren wird durch das Land mitfinanziert. Zu

Abbildung 33**Überblick über Gesamtumsatz der Unternehmen sowie im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich**
[Mio. EUR]**Umfrage: Umsätze der Unternehmen insgesamt und im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich****FRAGE:** "Bitte geben Sie folgende Kennzahlen Ihres Unternehmens an: Gesamtumsatz und Umsatz im H₂/BZ-Bereich"

Minimum = kleinstes teilnehmendes Unternehmen nach Umsatz

Maximum = größtes teilnehmendes Unternehmen nach Umsatz

¹ Keine Teilnahme von Unternehmen mit einem Gesamtumsatz zwischen 10 und 100 Mio. EUR.

den beteiligten Hauptakteuren aus der Wissenschaft gehören das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) und das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg (Fraunhofer ISE). Außerdem ist auch die Industrie mit den OEMs Audi, Daimler und BMW sowie zahlreichen Zulieferunternehmen beteiligt. Die Kooperation von Forschung und Industrie bietet Baden-Württemberg die Chance, seine starke Position im Brennstoffzellen-Bereich im nationalen und internationalen Wettbewerb zu festigen und eine technologische Vorreiterrolle in der seriellen Brennstoffzellenstack-Produktion in Europa zu erwerben.

UMSATZ UND BESCHÄFTIGUNGSZAHLEN

Wasserstoff und Brennstoffzellen stellen derzeit noch einen Nischenmarkt dar, der nach Einschätzung vieler befragter Unternehmen aber bereits in den nächsten Jahren zunehmend kommerziell relevant wird und in den die Unternehmen daher zunehmend investieren. Die an der im Rahmen der Studie durchgeführten Umfrage teilnehmenden Unternehmen gaben an, weltweit aktuell etwa 27 Mio. EUR im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen umzusetzen (Abb. 33). Extrapoliert man diese Umfrageergebnisse auf die gesamte baden-württembergische Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie, ergibt sich ein geschätzter Gesamtumsatz der in Baden-Württemberg ansässigen Unternehmen im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen von im vergangenen Jahr rund 80 Mio. EUR weltweit.

An diesen Zahlen zeichnet sich die aktuell starke Positionierung Baden-Württembergs in der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie ab: Mit weltweit geschätzten Umsätzen in Höhe von rund 80 Mio. EUR erzielen die teilnehmenden baden-württembergischen Unternehmen damit einen signifikanten Anteil der Ge-

samtumsätze aller deutschen Unternehmen in diesem Bereich¹⁸. Die Umfrage verdeutlicht ebenfalls die große Bedeutung des europäischen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktes für die teilnehmenden baden-württembergischen Unternehmen, die dort über 35% ihrer Gesamterlöse erzielen (Abb. 33).

In Bezug auf die Beschäftigungszahlen gaben die an der Umfrage teilnehmenden Unternehmen an, im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen derzeit 442 Mitarbeiter weltweit zu beschäftigen, davon 290 in Baden-Württemberg. Damit sind etwa 65% der Mitarbeiter der baden-württembergischen Unternehmen im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich direkt in Baden-Württemberg beschäftigt. Eine Extrapolation dieser Zahlen auf alle Unternehmen, die derzeit im Bereich tätig sind, ergibt, dass heute rund 840 Personen in Baden-Württemberg im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen beschäftigt sind. Da viele der im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich Beschäftigten in der Forschung und Entwicklung tätig sind und die Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Unternehmen oftmals in Baden-Württemberg angesiedelt sind, entstehen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Know-how und Innovationen vorrangig vor Ort.

Erzielte Umsätze und geschaffene Arbeitsplätze werden heute vor allem durch das produzierende Gewerbe im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen bereitgestellt. Neben weiterem Wachstum in diesen Branchen könnten die Umsatz- und die Beschäftigungszahlen zukünftig zusätzlich auch durch sich entwickelnde Geschäftstätigkeiten im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen

¹⁸ Vgl. VDMA (2019); in den dort angegebenen Umsatzvolumina sind allerdings nicht alle relevanten Segmente der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie erfasst, sodass der Anteil Baden-Württembergs zunächst überproportional hoch erscheint.

von Energieversorgern, Netzbetreibern, Betreibern von Wasserstoff-Erzeugungsanlagen, Power-to-Gas-Anlagen, Tankstelleninfrastrukturen sowie Dienstleistern für Wartungs- und Reparaturleistungen von Endanwendungen und Infrastrukturanlagen weiter ansteigen. Daneben ergeben sich durch den Transport von Wasserstoff zukünftige Geschäftsfelder für Gasnetzbetreiber, die die nötige Infrastruktur bereitstellen. Somit entstehen für eine Vielzahl von weiteren Industrien und Segmenten zusätzliche Umsatzquellen und Beschäftigungsmöglichkeiten infolge der Entwicklung des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktes. Eine detaillierte Prognose der Umsatz- und Wertschöpfungspotenziale sowie der Beschäftigtenzahlen des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektors in Baden-Württemberg erfolgt in Kapitel 4.

4.2 Wettbewerbsfähigkeit und Perspektiven

Die in der Branche tätigen baden-württembergischen Unternehmen verfügen heute im europäischen und internationalen Vergleich in vielen Bereichen der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Wertschöpfungskette über eine gute bis sehr gute Positionierung im Vergleich zum Wettbewerb. Die größte Wettbewerbsfähigkeit weist die baden-württembergische Zulieferindustrie für Endanwendungen auf, insbesondere im Mobilitätsbereich. Vor allem die Zulieferunternehmen verfügen bereits heute über kommerziell verfügbare Produkte, die in verschiedenen Anwendungen zum Einsatz kommen können. Die Produkte gehören bezüglich des technischen Entwicklungs- und Innovationsstandes sowie in puncto Qualität zu den führenden Produkten auf dem Weltmarkt und werden global nachgefragt. Gleichzeitig besteht international ein vielfältiger Wettbewerb für die lokale Industrie, innerhalb dessen Unternehmen aus Baden-Württemberg hinsichtlich der Marktanteile nicht

unbedingt Marktführer sind, aber in der Spitzengruppe des Wettbewerbs anzusiedeln sind und sich auf Augenhöhe mit dem internationalen Wettbewerb befinden. Die bereits bestehenden Kompetenzen im Bereich der Brennstoffzellenstack-Entwicklung und -Herstellung sowie die angekündigten Investitionen weiterer Unternehmen, wie etwa des größten Automobilzulieferers der Welt Bosch (Bosch, 2019), in diesen Markt ebenso wie die geplante Errichtung der Forschungsfabrik HyFab (Staatsministerium Baden-Württemberg, 2019) eröffnen Baden-Württemberg die Chance, zu einem der führenden Standorte für diese Kernkomponente der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie zu werden.

Eine differenziertere Betrachtung erfordert die Bewertung der Rolle der lokalen OEMs im Bereich Wasserstoff- und Brennstoffzellen. Auf der einen Seite verfügen die in Baden-Württemberg ansässigen OEMs über langjährige Expertise in der Technologie und leisten wichtige Entwicklungsarbeit in diesem Bereich. So gehört beispielsweise Daimler zu den weltweiten Pionieren der Entwicklung von Brennstoffzellen-Antriebssträngen für Fahrzeuge und war einer der ersten Produzenten von Testfahrzeugen und Erprobungs-Kleinserien und verfügt daher über hohes technologisches Know-how. Auch Audi hat am Standort Neckarsulm die Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben für den gesamten VW-Konzern übernommen, ist seit mehreren Jahren in diesem Bereich aktiv und plant, Anfang der 2020er-Jahre die erste Kleinserie eines von Brennstoffzellen angetriebenen Pkw auf den Markt zu bringen. Im zukünftig wichtigen Marktsegment des Bus- und Schwerlastverkehrs plant Europas größter Bushersteller EvoBus, Tochter des Daimler-Konzerns, die Serienproduktion eines batteriebetriebenen Busses mit Brennstoffzellen-Range Extender ab 2022. Daimler arbeitet zudem an der Entwicklung und serienmäßigen Produktion eines Brennstoffzellen-Lkw, der ab Ende des kommenden Jahrzehnts auf

den Markt kommen soll. Auch CNH Industrial/Iveco will zukünftig stark in Brennstoffzellenantriebe für Lkw investieren, wobei der baden-württembergische Standort in Ulm möglicherweise eine wichtige Rolle spielen kann. Hinsichtlich produzierter Stückzahlen sowie des Ambitionsniveaus der zukünftigen Produktionsausbaupläne und der Aktivitäten zum Ausbau des Produktportfolios sind derzeit jedoch vor allem asiatische Hersteller den OEMs am Standort zum Teil deutlich voraus. Auch wegen der Bedeutung der heimischen OEMs für die lokale Zulieferindustrie wird für die zukünftige Position des Standorts im globalen Wettbewerb entscheidend sein, ob die heimischen OEMs in den nächsten Jahren Investitionsentscheidungen treffen, die den heutigen Abstand zur internationalen Konkurrenz verringern können.

Andere Segmente der Wertschöpfungskette der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie sind weniger stark durch baden-württembergische Unternehmen besetzt, dementsprechend spielen lokale Unternehmen auf dem globalen Markt nur eine eingeschränkte Rolle. Vor allem sind es erneut Zuliefererunternehmen, die Komponenten beispielsweise für Elektrolyseure und PtG-Anlagen liefern und dabei ebenfalls hinsichtlich des technischen Reifegrads ihrer Produkte mit dem Wettbewerb auf Augenhöhe agieren können. Im Bereich der stationären Brennstoffzellen-Anwendungen sind derzeit nur wenige lokale Unternehmen tätig. Es besteht jedoch eine Kooperation mit dem internationalen Marktführer aus Japan, so dass Unternehmen am Standort von dessen Know-how profitieren und sich auch in diesem Marktsegment zukünftig wettbewerbsfähig positionieren können.

Baden-Württemberg verfügt daneben mit seiner breit aufgestellten Forschungslandschaft über auf internationalem Niveau agierende Institutionen, die für die (Weiter-)Entwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Tech-

nologie eine entscheidende Bedeutung haben und ein wichtiger Standortfaktor für die lokale Industrie sind.

Um die zukünftigen Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg differenziert zu beurteilen, wird im Folgenden ein detaillierter Blick auf die Wettbewerbsfähigkeit der lokalen Unternehmen in den verschiedenen Stufen und Segmenten der Wertschöpfungskette geworfen. Hierbei wurden wesentlich auch die Ergebnisse der Online-Umfrage baden-württembergischer Unternehmen und der Interviews zu deren eigener Einschätzung ihrer Wettbewerbsfähigkeit in die Analyse einbezogen.

KOMPONENTENHERSTELLER

Auf der Stufe der Komponentenhersteller ist Baden-Württemberg aufgrund seiner starken Zulieferindustrie, vor allem auch im Automobilsektor, sehr gut aufgestellt. Obwohl der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Markt für die meisten Unternehmen noch ein Nischenmarkt ist, verfügen bereits heute viele der Zulieferer über fertig entwickelte und kommerziell verfügbare Produkte für Brennstoffzellen-Anwendungen. Insgesamt können die Unternehmen in Baden-Württemberg die gesamte Produktpalette typischer Komponenten abdecken. Zudem gehören viele der baden-württembergischen Zulieferer zu den internationalen Marktführern in ihrem jeweiligen Segment sowie zu den umsatzstärksten Unternehmen weltweit mit entsprechender Innovations- und Investitionskapazität, z.B. Bosch, ElringKlinger, MAHLE, Freudenberg und Mann+Hummel. Aufgrund ihrer weltweiten Marktpräsenz und der bereits bestehenden technologischen Kompetenzen haben die lokalen Zulieferunternehmen das Potenzial, auch im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Markt eine führende Position einzunehmen.

Inwieweit die Komponentenhersteller, vor allem der Zulieferindustrie im Automobilbereich, von der zukünfti-

gen Entwicklung des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktes profitieren werden, hängt auch davon ab, wie die regionalen Unternehmen vor allem an der erwartbar starken Marktentwicklung in Asien partizipieren können. Gleichzeitig sind die Unternehmen abhängig von der Entwicklung eines ausreichenden Marktwachstums in Europa und der Präsenz der europäischen OEMs in diesem Markt. Um nachhaltig wettbewerbsfähig zu sein, müssen die Unternehmen Skaleneffekte vergleichbar mit denen der asiatischen Hersteller erreichen können. Aufgrund der aktuell dynamischeren Entwicklung der Technologie in Asien wird der Erfolg der heimischen Zulieferunternehmen daher vor allem auch von deren Aktivitäten in diesen Wachstumsmärkten abhängen. Viele Unternehmen sind zwar bereits heute international und insbesondere auch in Asien aktiv, dennoch bestehen oftmals höhere Eintrittsbarrieren in diese Märkte, wie z.B. andere Normen und Spezifikationen, die dort präsen- te Bevorzugung einheimischer Hersteller oder regulatorische Hürden, die die Unternehmen vor zusätzliche Herausforderungen stellen. Um Wertschöpfungspotenziale in den asiatischen Märkten realisieren zu können, ist häufig der Aufbau lokaler Produktionskapazitäten notwendig. Dies kann im Umkehrschluss jedoch bedeuten, dass dem Standort Baden-Württemberg ggf. Wertschöpfungsanteile entzogen werden und ins Ausland abwandern. Fokus der baden-württembergischen Standorte wären dann vor allem Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

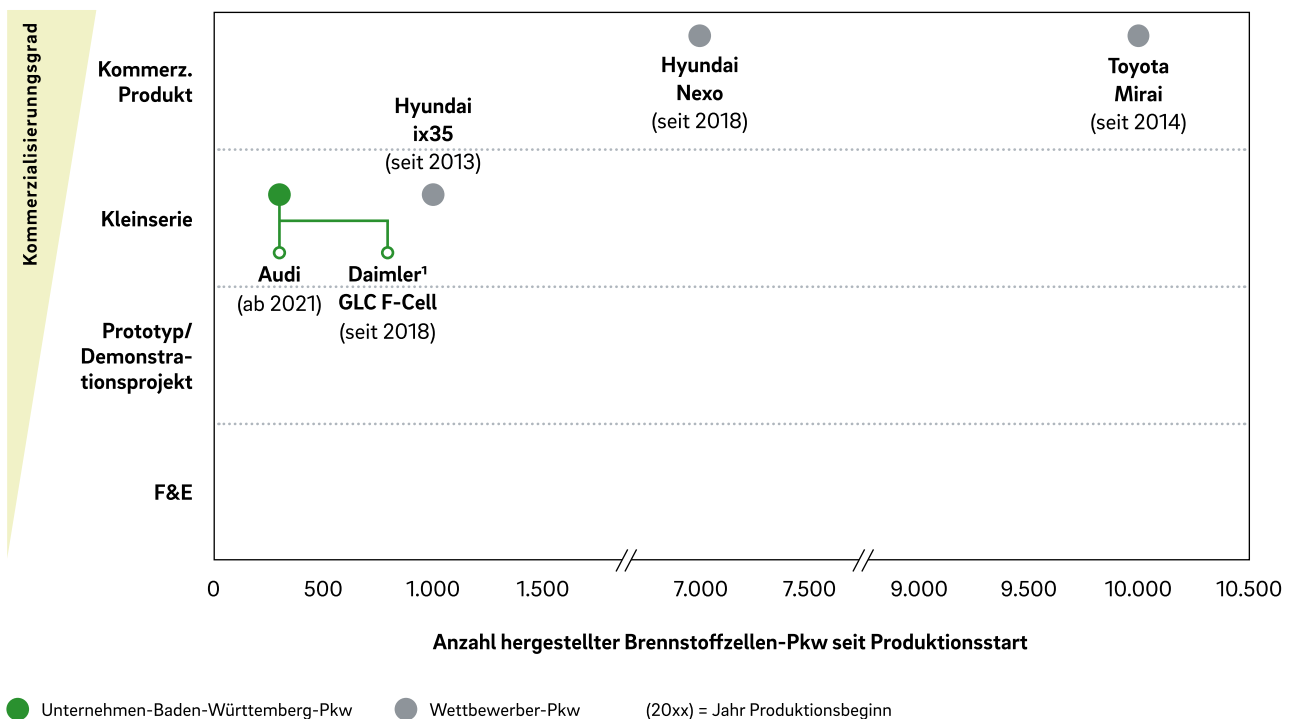
Zudem ist im Automobil-Segment die zukünftige Rolle und Positionierung der OEMs von entscheidender Bedeutung, da die Aktivitäten der OEMs eng mit denen der Zulieferindustrie verbunden sind. Insbesondere der Mobilitäts- und Verkehrssektor, in dem Baden-Württemberg eine klare Stärke besitzt, hat das Potenzial, zukünftig einer der wichtigsten Anwendungsbereiche der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie zu werden.

OEMs, die verstärkt in die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie investieren, werden auch perspektivisch Investitionen der Zulieferer in diesem Bereich auslösen. Die großen lokalen Automobil-OEMs sind bereits seit längerer Zeit im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich aktiv, haben jedoch gegenwärtig noch keine Produkte bzw. nur Kleinserien auf dem Markt. Die asiatischen Marktführer hingegen produzieren ihre Produkte, wie z.B. den Toyota Mirai, teilweise bereits in größeren Serien.

Eine stärkere Positionierung der OEMs wird auch die Marktposition der lokalen Zulieferindustrie zukünftig stärken. Einige Unternehmen der lokalen Zulieferindustrie sind bisher in Anbetracht der noch nicht klar erkennbaren Umsatzpotenziale und der unklaren Positionierung der lokalen OEMs bisher noch nicht oder nur in eingeschränktem Maße bereit, größere Investitionen in die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie zu tätigen. Andere Zulieferer hingegen orientieren sich bereits jetzt sehr stark an den weltweiten Wachstumsmärkten, z.B. in Asien. Sollten lokale und andere europäische OEMs zukünftig im Markt nur eine Nischenposition einnehmen, kann die lokale Zulieferindustrie nur international tätig sein, was mit einer verschärften Wettbewerbssituation (z.B. durch längere Lieferketten oder höheren Logistikkosten), höheren Markteintrittsbarrieren und insgesamt höheren Risiken sowie einer Verlagerung von Wertschöpfung aus Baden-Württemberg, Deutschland und Europa verbunden ist.

BRENNSTOFFZELLEN-SYSTEME

Die technologische Kernkomponente jeder Brennstoffzellen-Anwendung, der Brennstoffzellen-Stack, wird ebenfalls von mehreren Unternehmen in Baden-Württemberg hergestellt bzw. ist die zukünftige Herstel-

Abbildung 34**Anzahl hergestellter Brennstoffzellen-Pkw seit Produktionsstart je OEM**¹ Exakte Anzahl unbekannt, ca. mehrere Hundert.

Quelle: Roland Berger

lung geplant. Der nationale Marktführer ist hier das baden-württembergische Unternehmen ElringKlinger, das umfassende Kompetenzen in diesem Bereich aufgebaut hat. Die Brennstoffzellen-Stacks der Fima werden bereits heute schon in zahlreichen Brennstoffzellen-Systemen verwendet und sind heute kommerziell bereits verfügbar. Auch investiert ElringKlinger in die zukünftige Serienproduktion von Brennstoffzellen-Systemen und

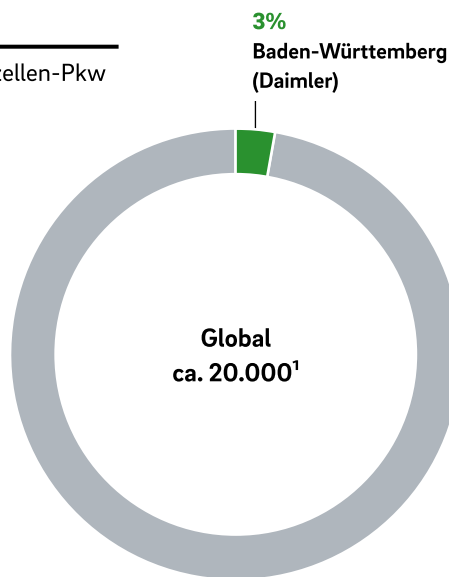
treibt die Entwicklung in diesem Bereich voran. Weiterhin hat Bosch als Weltmarktführer im Automobil-Zulieferer-Segment angekündigt, verstärkt in die Brennstoffzellen-Technologie zu investieren und Kapazitäten für eine Serienfertigung von Brennstoffzellen-Stacks für den Einsatz in Automobilen aufzubauen (Bosch, 2019). Die Weiterentwicklung des Brennstoffzellen-Stacks soll in Zusammenarbeit mit dem europäischen Marktführer

Abbildung 35

Schätzung Marktanteile der bis heute hergestellten Brennstoffzellen-Pkw [# Brennstoffzellen-Pkw, %]

Marktanteile Brennstoffzellen-Pkw

Globale Anzahl hergestellter Brennstoffzellen-Pkw



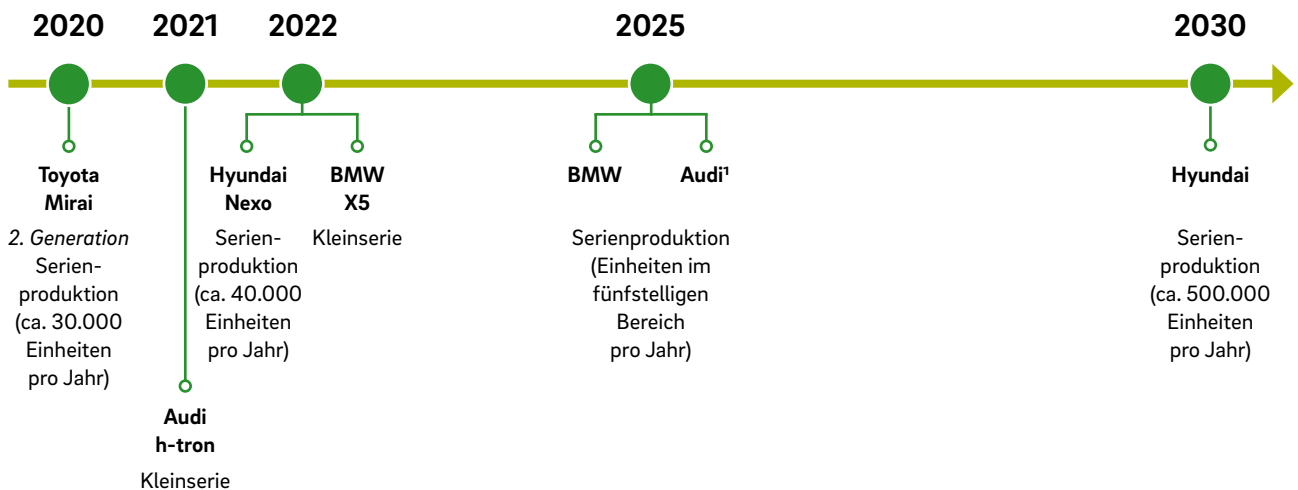
¹ Hochrechnung, Stand Ende 2019.

Quelle: Roland Berger

PowerCell erfolgen. Die industrielle Fertigung der Brennstoffzellen-Stacks soll dann durch Bosch allein erfolgen. Zudem wird die industrielle Fertigung von Brennstoffzellen-Stacks durch das von Forschung und Industrie ins Leben gerufene Forschungsprojekt HyFab aktiv in Baden-Württemberg vorangetrieben. Aufgrund der Vielzahl an beteiligten Instituten und Unternehmen aus Forschung und Industrie sowie der angekündigten Investitionen wird die industrielle Produktion mit Hochdruck vorangetrieben.

Außerdem produziert das baden-württembergische Unternehmen EPH elektronik ein Brennstoffzellen-System, das als hybrides System im Systemverbund mit Batterien genutzt wird.

Die vorhandenen Kompetenzen und zukünftig geplanten Investitionen sowie das Projekt HyFab bieten Baden-Württemberg die Möglichkeit, zu einem der international führenden Standorte der Brennstoffzellenstack-Technologie und deren industrieller Fertigung aufzu-

Abbildung 36**Geplante Produkteinführungen von Brennstoffzellen-Pkw von OEMs weltweit (Auswahl)**¹ Indikativ; bislang keine offizielle Unternehmenskommunikation zum geplanten Zeitpunkt Start Serienproduktion.

Quelle: Roland Berger

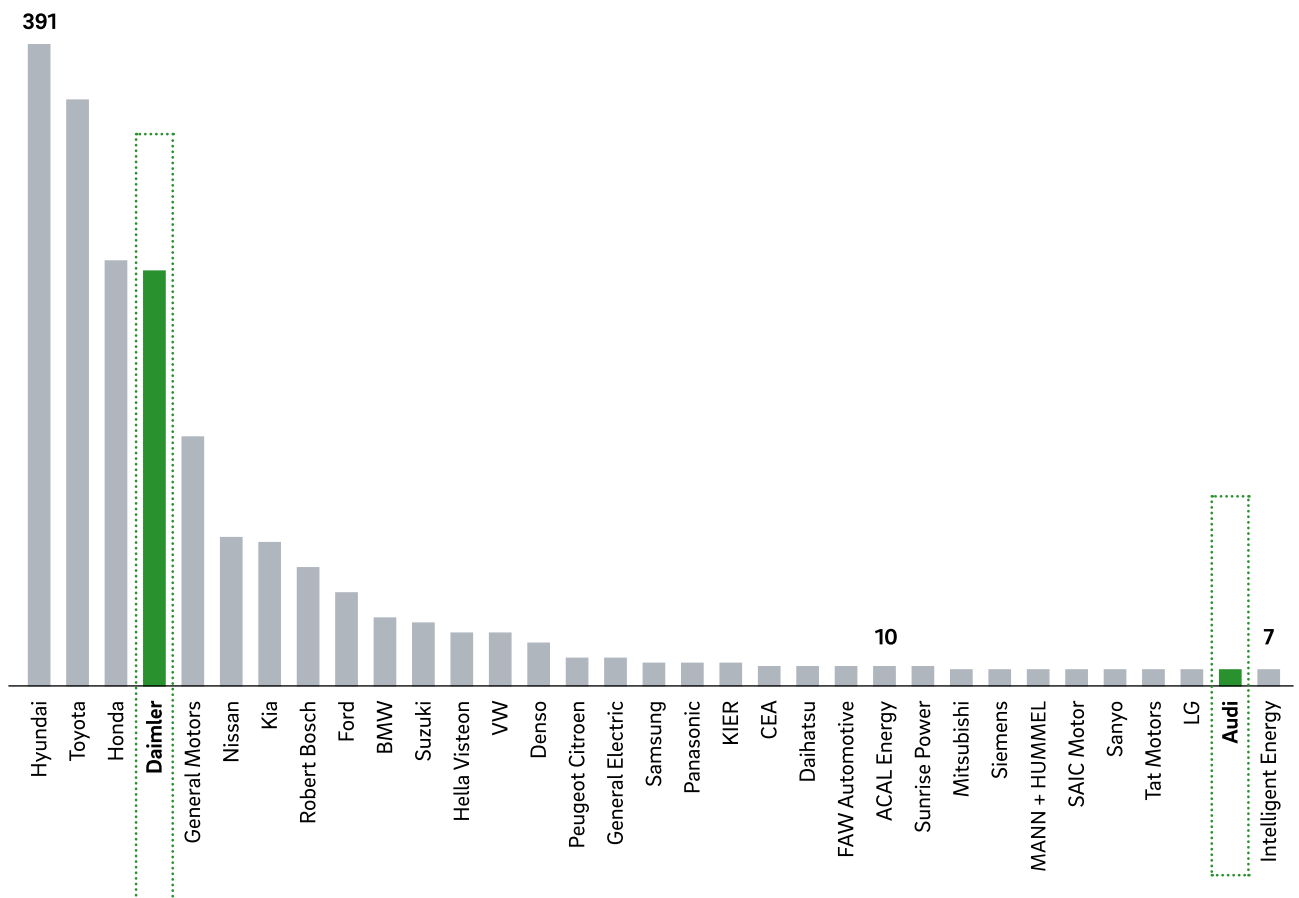
steigen. International verfügen heute zwar PowerCell aus Schweden und Ballard Power Systems aus Kanada über die größten Marktanteile in diesem Marktsegment, baden-württembergische Unternehmen haben aber das Potenzial, zukünftig größere Anteile in diesem Marktsegment einzunehmen.

WASSERSTOFF-ANWENDUNGEN – PKW

Im Segment der Brennstoffzellen-Pkw ist mit Daimler ein führender Hersteller in Baden-Württemberg angesiedelt, der als internationaler Brennstoffzellen-Pionier bereits 1994 das erste Brennstoffzellen-Auto präsentierte, während der heutige internationale Marktführer Toyota zur selben Zeit in die Brennstoffzellen-Forschung einstieg. Die asiatischen Hersteller Toyota und Hyundai haben im Laufe der Jahre jedoch stark aufgeholt und

Abbildung 37

Patentanmeldungen von Unternehmen der Automobilindustrie im Bereich Brennstoffzelle
[# Patente]



nehmen heute die internationale Marktführerschaft ein. Insbesondere hinsichtlich der Ausweitung von Produktionskapazitäten und der Erweiterung des verfügbaren Produktportfolios weisen die lokalen Hersteller Daimler und Audi Aufholbedarf vor allem im Vergleich zur asiatischen Konkurrenz auf (Abb. 34).

Während Hyundai und Toyota derzeit kommerziell verfügbare Produkte in größeren Stückzahlen auf dem Markt verfügbar haben (der 2014 eingeführte Toyota Mirai wurde beispielsweise bereits ca. 10.000-mal verkauft), stellt Daimler derzeit lediglich einige hundert Exemplare seines GLC F-Cell im Leasingmodell für ausgewählte Kunden zur Verfügung.

Eine Entscheidung über zukünftige Produkte und Stückzahlen im Pkw-Bereich ist bislang nicht gefallen. Audi plant den erstmaligen Produktlaunch einer Brennstoffzellen-Kleinserie im Jahr 2021 (Abb. 36). Hierfür investiert Audi in die Erforschung der Brennstoffzellen-Technologie am Standort Neckarsulm, der Entwicklungsstandort in diesem Bereich für den gesamten Volkswagen-Konzern ist; dieser legt momentan gemäß öffentlichen Verlautbarungen den Schwerpunkt seiner Entwicklungsarbeit und Produktpalette aber auf die Batterietechnologie. Weitere Serien von Brennstoffzellen-Fahrzeugen in größeren Stückzahlen sind bei Audi erst für den weiteren Verlauf der 2020er-Jahre geplant. Von Daimler sind derzeit keine konkreten Pläne im Pkw-Bereich bekannt.

Die technologische Vorreiterstellung der asiatischen Hersteller spiegelt sich zudem auch im Ranking der Brennstoffzellen-Patentanmeldungen von 2010 bis 2016 wider, welches von Hyundai, Toyota und Honda angeführt wird (Abb. 37). Daimler ist jedoch im Vergleich zu den deutschen und europäischen Wettbewerbern aufgrund seiner langjährigen Entwicklungsarbeit gut posi-

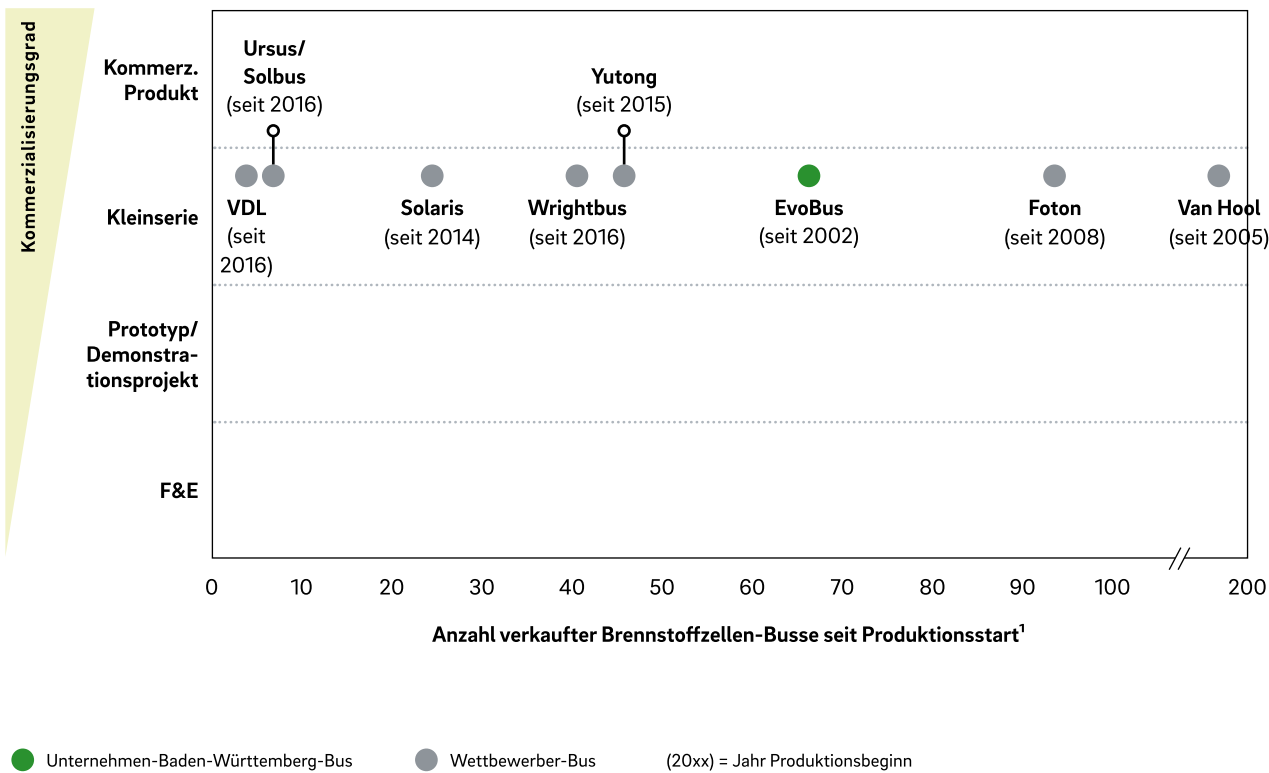
tioniert. Das Tochterunternehmen Mercedes-Benz Fuel Cell erforscht, entwickelt und vertreibt seit vielen Jahren Brennstoffzellen-Komponenten und -Systeme.

WASSERSTOFF-ANWENDUNGEN – BUSSE

Im Bereich der Brennstoffzellen-Busse verfügt Baden-Württemberg mit EvoBus über den größten europäischen Bushersteller. EvoBus beschäftigt sich bereits seit 1990 mit der Brennstoffzellen-Technologie für Stadtbusse im ÖPNV und produzierte schon bis 2003 30 Busse für einen Kleinflottenversuch im Rahmen des Demonstrationsprojektes HyFLEET:CUTE sowie seit 2009 23 Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid Busse, die im Rahmen des CHIC-Projekts ("Clean Hydrogen in European Cities") eingesetzt wurden. In Europa nahm EvoBus damit bis zum Jahr 2014 eine führende Position ein. Zwischen 2015 und 2018 hat EvoBus keine weiteren Brennstoffzellen-Busse produziert, der angekündigte Start eines Serienmodells wurde mehrfach verschoben. Im gleichen Zeitraum lieferte der belgische Hersteller Van Hool als aktueller europäischer und weltweiter Marktführer im Brennstoffzellen-Bereich 37 Brennstoffzellen-Busse aus.

Van Hool sicherte sich außerdem bereits mehrere Großaufträge von deutschen Gemeinden. Weitere europäische Hersteller haben ebenfalls Brennstoffzellen-Busse hergestellt bzw. bieten derzeit Produkte im Markt an, wenn auch nur in sehr geringen Stückzahlen. International hat bspw. Toyota angekündigt, 100 Brennstoffzellen-Busse für die Olympischen Spiele 2020 zu liefern und seine bestehende Produktion des Brennstoffzellen-Modells Hino weiter auszubauen, das in Europa aber bislang nicht verfügbar ist (Abb. 39). Auch von nordamerikanischen Herstellern wurden bereits Brennstoffzellen-Busse, allerdings ebenfalls rein für den dortigen Markt, hergestellt.

Abbildung 38
Anzahl verkaufter Brennstoffzellen-Busse seit Produktionsstart je OEM



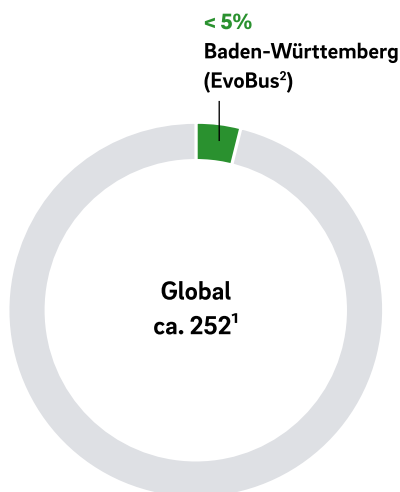
¹ Inkl. getätigter Vorbestellungen.

Abbildung 39

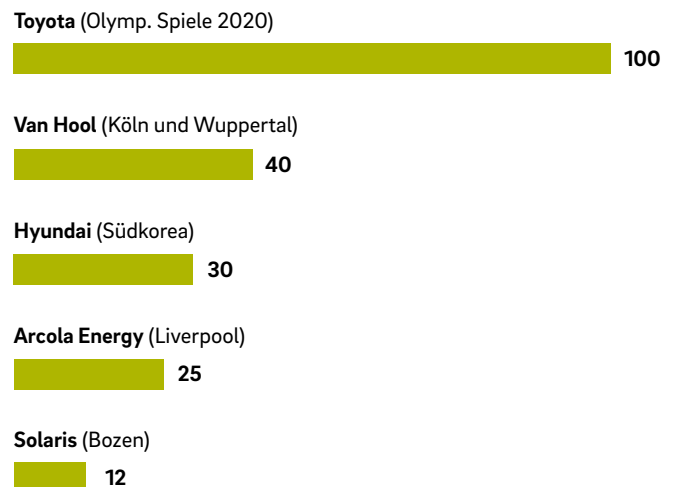
Schätzung Marktanteile Brennstoffzellenbusse-Hersteller

[# Brennstoffzellen-Busse, %]

Globale Anzahl an Brennstoffzellen-Bussen im Einsatz

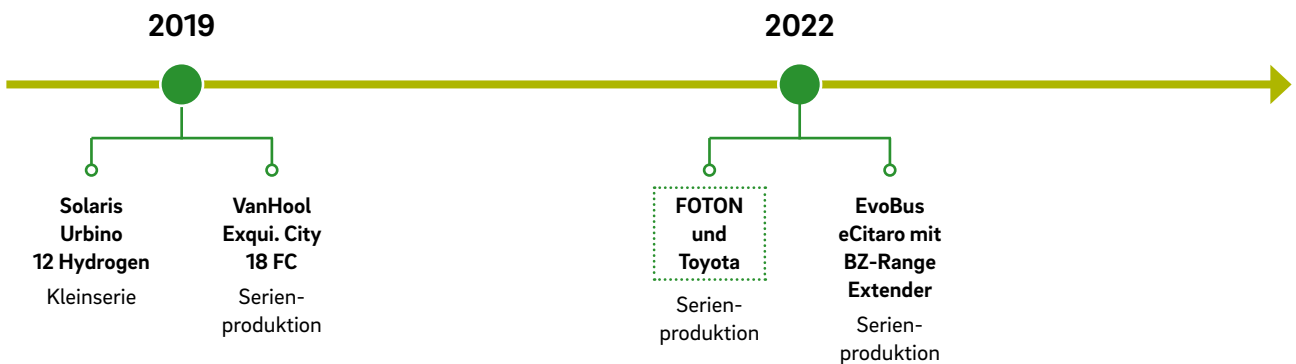


Beispielhafte Aufträge [# Busse]



¹ Roland Berger Hochrechnung, Stand 2019.

² Annahme: 50% der zwischen 2011 und 2014 ausgelieferten Busse in der EU noch in Betrieb.

Abbildung 40**Zukünftige Produkteinführungen von Brennstoffzellen-Bussen von OEMs weltweit**

 Gemeinsame Entwicklung

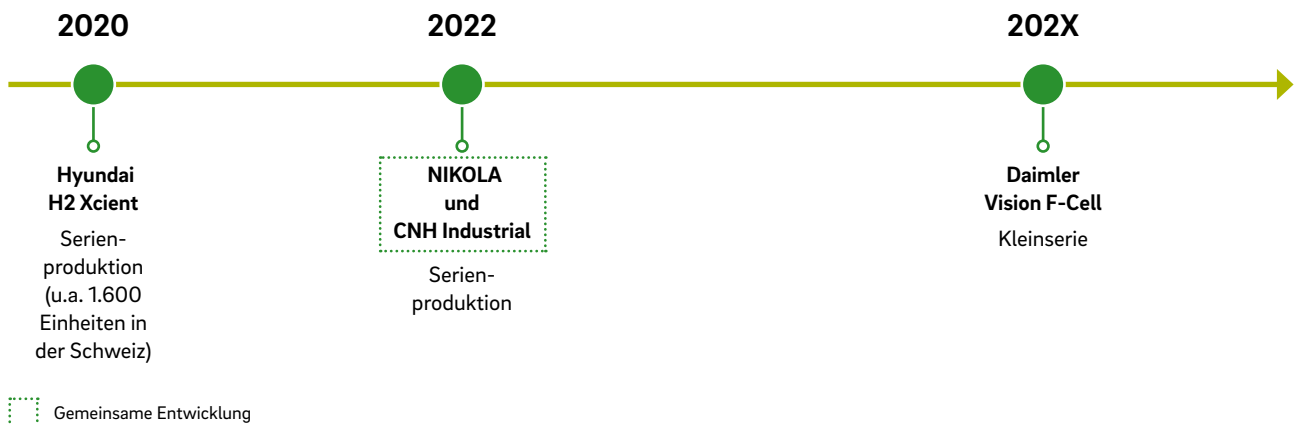
Quelle: Roland Berger

EvoBus plant derzeit den Start einer kommerziellen Serienfertigung des neuen eCitaro mit Brennstoffzellen-Range Extender ab 2022 (Abb. 40). Da EvoBus im Vergleich zu den Wettbewerbern eine mit Abstand führende Marktposition besitzt, ist davon auszugehen, dass EvoBus mit einem kommerziell verfügbaren Brennstoffzellen-Produkt zukünftig große Marktanteile im Brennstoffzellen-Segment erobern wird. Zudem kann EvoBus vor allem von der hohen Nachfrage in den Heimatmärkten Deutschland und Europa profitieren, wo das Unternehmen bereits heute stark positioniert ist. Eine entsprechend hohe Nachfrage in diesem Segment zeichnet sich bereits ab: Die 25 Busbetriebe des deutschen Brennstoffzellenbus-Clusters haben bereits eine Nachfrage von insgesamt 500 Brennstoffzellen-Bussen angemeldet. In Anbetracht der erwarteten hohen Nachfrage nach Brennstoffzellen-

Bussen entstehen hier beträchtliche Wertschöpfungspotenziale für die baden-württembergischen Unternehmen, auch in der Zulieferindustrie. In diesem für die weitere Marktentwicklung von Wasserstoff und Brennstoffzellen vor allem in den nächsten Jahren wichtigen Marktsegment könnte der Standort Baden-Württemberg daher vor allem in Europa eine führende Stellung einnehmen.

WASSERSTOFF-ANWENDUNGEN – LKW

Im zukünftig potenziell wachstumsstarken Lkw-Segment (vgl. Kap. 3) befinden sich die Aktivitäten der baden-württembergischen OEMs bisher noch auf der Forschungs- und Entwicklungsstufe. Auf nationaler Ebene ist auch hier Daimler führend und hat kürzlich angekündigt, bis Ende des nächsten Jahrzehnts einen Brennstoffzellen-Lkw in

Abbildung 41**Zukünftige Produkteinführungen von Brennstoffzellen-Lkw von OEMs weltweit**

Quelle: Roland Berger

Kleinserie auf den Markt zu bringen (Süddeutsche Zeitung, 2019). In den Jahren zuvor sollen Prototypen getestet werden. Die zukünftigen Wachstumspotenziale im Lkw-Segment, die in Europa vor allem durch eine sich in den nächsten Jahren massiv verschärfende Emissionsregulierung getrieben werden, haben international auch andere Unternehmen erkannt. Ein positives Zeichen für den Standort Baden-Württemberg kommt vom Nutzfahrzeug-Hersteller CNH Industrial/Iveco. Das Unternehmen hat den Standort Ulm als einen potenziellen Entwicklungs- und Produktionsstandort für die Herstellung von Brennstoffzellen-Lkw ausgewählt und plant in den nächsten Jahren signifikante Investitionen in diesem Bereich. Obwohl diesbezüglich noch keine finale Entscheidung getroffen wurde, zeugt dies von den Standortvorteilen Baden-Württembergs im Bereich Automobilbau.

Auch im Gesamtmarkt ist das Segment Lkw derzeit noch vor allem im Prototypen- und Demonstrationsstadium zu verorten, es existiert derzeit kein kommerzielles Produktangebot in diesem Segment; allerdings haben mehrere internationale Hersteller ambitionierte Pläne geäußert. Im Rahmen des Projekts H2Haul werden derzeit 16 Brennstoffzellen-Lkw an mehreren Orten in Europa in der Praxis getestet. Die Fahrzeuge werden von den Herstellern Iveco, FPT Industrial, die beide zu CNH Industrial gehören, und VDL ETS entwickelt und produziert. In den Schwerlastfahrzeugen kommt jedoch auch Technologie aus Baden-Württemberg zum Einsatz: Die Firma ElringKlinger liefert die Brennstoffzellen für die Fahrzeuge. Außerdem sind auch die Unternehmen Hydrogenics (Kanada/Deutschland) und PowerCell (Schweden) mit der Brennstoffzellenlieferung beauf-

trägt. Das Projekt wird vom FCH JU für einen Zeitraum von fünf Jahren mit 12 Mio. EUR gefördert.

Das 2014 in den USA gegründete Unternehmen Nikola Motors fokussiert sich auf die Entwicklung eines Brennstoffzellen-Lkw und kann laut eigenen Aussagen bereits mehrere tausend Vorbestellungen verzeichnen. Viele Unternehmen haben das Wertschöpfungspotenzial im Segment der Brennstoffzellen-Schwerlastfahrzeuge erkannt und investieren beträchtliche Summen in das Start-up. Hierzu gehört neben CNH Industrial auch Bosch.

Der französische Automobil-OEM Renault hat angekündigt, Ende 2019 und im Jahr 2020 zwei leichte Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugmodelle auf den Markt zu bringen (Renault, 2019). Die beiden Modelle sind mit einer Batterie und einer Brennstoffzelle als Range Extender ausgerüstet, die die Reichweite der Fahrzeuge erhöhen soll.

Insgesamt bestehen im Lkw-Segment für die Automobil-OEMs und die Zulieferer aus Baden-Württemberg große wirtschaftliche Potenziale: In diesem Bereich erwarten die befragten Unternehmen und Experten die größten Wachstumspotenziale hinsichtlich der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen in den nächsten Jahren. Im Schwerlastverkehr bietet die Brennstoffzellen-Technologie einen klaren Vorteil gegenüber der Batterietechnologie, da ein wasserstoffbasierter Antrieb bedeutend größere Reichweiten ermöglicht. Gegenwärtig sind die konkreten Pläne zum Ausbau der Produktionskapazitäten und der Entwicklung von Produkten in diesem Bereich aber noch verhalten und liegen hinter den Plänen wichtiger internationaler Wettbewerber zurück (z.B. plant Hyundai, in den nächsten Jahren 1.600 Lkw in der Schweiz auf die Straße zu bringen; auch Nikola Motors verfolgt international ambitionierte Pläne, die aktuell größten Stückzahlen an Brennstoffzellen-Lkw werden in China produziert). Daher sollten die lokalen Unterneh-

men entsprechende Kapazitäten und Kompetenzen auf- und ausbauen, um nicht den Anschluss an den europäischen und internationalen Wettbewerb in diesem lukrativen und zukunftssträchtigen Segment zu verlieren.

WASSERSTOFF-ANWENDUNGEN – STATIONÄRE ANLAGEN

Der Bereich der stationären Brennstoffzellen-Anlagen ist derzeit generell in Europa und damit auch für baden-württembergische Unternehmen noch ein Nischenmarkt. Hierbei ist jedoch das Segment der Mikro-KWK-Anlagen insbesondere für zwei lokale Firmen relevant. Der Mikro-KWK-Hersteller Hexis mit Standort in Konstanz entwickelt seit 1990 bereits Festoxidbrennstoffzellen-Systeme und bringt seine Expertise seit der Übernahme im Jahr 2015 in der Viessmann Gruppe ein. Viessmann gilt als europäischer Marktführer im Bereich Mikro-KWK und kooperiert zudem seit 2012 mit dem Weltmarktführer Panasonic aus Japan, welcher bereits 140.000 PEM-Brennstoffzellen-Systeme verkauft hat und damit mit deutlichem Abstand internationaler Marktführer ist. Daneben bietet Freudenberg Sealing Technologies infolge der Übernahme des Brennstoffzellen-Herstellers Elcore eine Brennstoffzellen-Heizung an. Im Vergleich zum Weltmarktführer Panasonic dürften die bisher abgesetzten Stückzahlen der beiden baden-württembergischen Hersteller jedoch weitaus geringer sein.

WASSERSTOFF-HERSTELLUNG

Im Bau von Power-to-Gas-Anlagen und Elektrolyseuren sind derzeit nur wenige Unternehmen als (Teil-)Systemintegratoren aus Baden-Württemberg aktiv. Jedoch können auch viele lokale Zulieferunternehmen vom Wachstum dieses Marktes profitieren. Der internationale Markt für Elektrolyseuranlagen wird derzeit von Markt-

führer Siemens sowie weiteren großen Herstellern wie NEL (Norwegen), Hydrogenics (Kanada) oder ITM Power (Großbritannien) dominiert. Zahlreiche weitere europäische und internationale Hersteller sind in diesem Bereich tätig. Aktuelle Großaufträge gehen vor allem an diese Hersteller, die einen Großteil des Marktes unter sich aufteilen; keiner dieser Hersteller verfügt über Standorte in Baden-Württemberg. Die Firma Wasserelektrolyse Hydrotechnik mit Sitz in Karlsruhe ist derzeit als einziges baden-württembergisches Unternehmen im Bereich der Elektrolyseur-Herstellung tätig. Das Unternehmen konzipiert und liefert schlüsselfertige und individuell erstellte Gesamtanlagen im kleineren Umfang; international geht der Trend derzeit hin zur Herstellung immer größerer Anlagen im Multi-MW-Bereich.

Aufgrund des signifikanten Anstiegs des Wasserstoffbedarfs in der Zukunft ergeben sich für baden-württembergische Unternehmen mit hoher technologischer Expertise interessante Perspektiven in diesem Marktsegment. Vor allem für die Komponentenhersteller bietet dieser Markt zusätzliche Wertschöpfungspotenziale. Viele Zulieferunternehmen verfügen bereits heute über Produkte, die für den Einsatz in Wasserstoff-Herstellungsanlagen benötigt werden.

WASSERSTOFF-INFRASTRUKTUR

Auch im Bereich der Produktion von Wasserstoff-Infrastrukturanlagen und den entsprechend benötigten Komponenten bestehen signifikante Entwicklungschancen für baden-württembergische Unternehmen durch den absehbaren Investitionsbedarf in solche Infrastrukturen. Da perspektivisch mehr Brennstoffzellen-Fahrzeuge verkehren, wird z.B. der Ausbau des Wasserstoff-Tankstellennetzes notwendig sein. Vor allem die Komponentenhersteller können von dem zu erwarten-

den Marktwachstum profitieren. Für eine Wasserstoff-Tankstelle werden z.B. Komponenten wie Druckbehälter, Kompressoren, Pumpe, Ventile und Dichtungen benötigt. In diesen Bereichen verfügt Baden-Württemberg über eine Vielzahl von etablierten Unternehmen mit hohem technischen Know-how und wettbewerbsfähigen Produkten.

Auf der Ebene der Wasserstoff-Infrastrukturanbieter bzw. -Produzenten gibt es keine in Baden-Württemberg ansässigen Unternehmen. Der Marktführer in diesem Segment, die Firma Linde, produziert seit 2014 Wasserstoff-Tankstellen inklusive eines eigens entwickelten ionischen Wasserstoff-Kompressors in Serienfertigung am Entwicklungs- und Produktionsstandort Wien.

MASCHINEN- UND ANLAGENBAUER

Neben den Unternehmen, die direkt an der Wertschöpfung im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich beteiligt sind, können zukünftig auch die starken und international gut positionierten baden-württembergischen Maschinen- und Anlagenbauer von der Entwicklung dieses Marktes profitieren. Die Aktivitäten dieser Unternehmen machen einen beträchtlichen Teil der Wertschöpfung der baden-württembergischen Industrie aus. Die Herstellung von Produktionsanlagen für Hersteller von Komponenten und Endanwendungen der Brennstoffzellenindustrie, vor allem für die zukünftige Serienfertigung mit entsprechend hohen Ansprüchen an Produktionsgeschwindigkeit und -präzision, kann zukünftig ein interessantes Marktsegment für die lokale Maschinenbauindustrie darstellen; mehrere Hersteller erwägen bereits einen Einstieg in diesen Bereich.

FORSCHUNGSEINRICHTUNGEN

In Baden-Württemberg ist eine Vielzahl von Forschungs-

einrichtungen ansässig, die zum Thema Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie forschen und entwickeln. Insbesondere die Institute der Fraunhofer-Gesellschaft und der Max-Planck-Gesellschaft, das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) gehören zu den in Europa und international führenden Institutionen in diesem Bereich. Auch die Entscheidung zur Etablierung des neuen Forschungszentrums "HyFab-Baden-Württemberg" in Ulm und Freiburg untermauert die Positionierung Baden-Württembergs als wichtiger Forschungs- und Entwicklungsstandort für die Technologie. Die Forschungseinrichtungen sind sowohl in der Grundlagenforschung als auch in der angewandten Forschung in Kooperation mit ansässigen Unternehmen tätig. Von dieser Nähe zur Industrie profitiert der Unternehmensstandort klar; die Kooperation mit der Forschung ermöglicht es den lokalen Unternehmen, die Wettbewerbsfähigkeit ihrer Wasserstoff- und Brennstoffzellenprodukte zu steigern. Die starke Forschungslandschaft Baden-Württembergs im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie kann daher als wichtiger Standortfaktor gelten, der günstige Rahmenbedingungen für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der lokalen Industrie schafft.

Die Entwicklung der Forschungsaktivitäten in den asiatischen Märkten verdeutlicht aber auch, dass zukünftig mit einem verstärkten Wettbewerb zu rechnen sein wird. Analog zum schnellen Aufbau von Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Expertise asiatischer Unternehmen fokussieren sich auch asiatische Forschungseinrichtungen zunehmend auf die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie. Das Korean Institute of Technology ist international mit mehr als 1.000 Patenten im Wasser-

stoff- und Brennstoffzellen-Bereich führend, während auch die Tsinghua University in Peking mit ca. 100 Patentanmeldungen im Jahr 2018 ihre Forschungskompetenz stark ausbaut. Die Fraunhofer-Gesellschaft besitzt im Vergleich derzeit ca. 700 Patente. Die Aufholjagd der chinesischen Forschungsinstitute ist teilweise politisch induziert, da staatliche Fördermittel für Forschung, Entwicklung, Demonstration (FED) seit 2015 signifikant gestiegen sind und 2018 bereits beinahe die Hälfte der europäischen Fördermittel ausmachten.

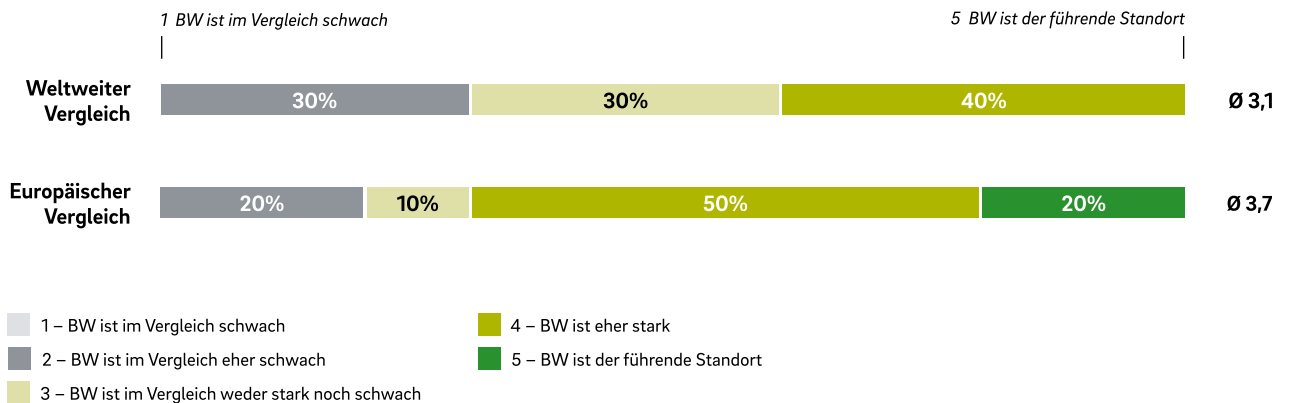
Als langjährig etablierter Forschungsstandort stehen im Land umfangreiche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Forschungsgelder zur Verfügung. Die Verfügbarkeit finanzieller Ressourcen für FED in Baden-Württemberg kann derzeit als international wettbewerbsfähig eingestuft werden. Die massiven Investitionen v.a. der asiatischen Länder stellen aber eine zunehmend starke Konkurrenz dar. Um international wettbewerbsfähig zu bleiben, sollten Investitionen in die Forschung sowie die Kooperation mit den Unternehmen weitergeführt und ausgebaut werden.

SELBSTEINSCHÄTZUNG ZUR WETTBEWERBSFÄHIGKEIT DER LOKALEN UNTERNEHMEN

Aus der Befragung der lokalen Unternehmen, die im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen tätig sind, ergibt sich bei der Einschätzung ihrer aktuellen Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Baden-Württemberg im internationalen Vergleich ein Bild, das den oben getroffenen Ausführungen entspricht (Abb. 42). Rund 40% der Unternehmen, die an der Umfrage teilgenommen haben, beurteilen den Standort Baden-Württemberg im internationalen Vergleich als stark positioniert, ohne ihn jedoch als klar weltweit führend anzusehen. Gleichzeitig schätzt ca. ein Drittel den Standort als vergleichsweise schwach

Abbildung 42**Einschätzung der Wettbewerbsfähigkeit der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie Baden-Württembergs im internationalen Vergleich [%]****Umfrage: Wettbewerbsfähigkeit im weltweiten und europäischen Vergleich**

FRAGE: "Wie schätzen Sie die Wettbewerbsfähigkeit der H₂/BZ-Industrie Baden-Württembergs im internationalen Vergleich ein?" (n = 10)



Quelle: Roland Berger

im internationalen Wettbewerb sowie ein weiteres Drittel der Befragten den Standort als weder besonders stark noch als schwach ein. Im europäischen Vergleich stellt sich das Bild tendenziell positiver dar: Hier beurteilen 20% der Befragten Baden-Württemberg als führenden Standort, weitere 50% sehen das Land als stark positionierten Standort an; insgesamt schreiben damit rund 70% der Befragten Baden-Württemberg eine herausgehobene Stellung im europäischen Wettbewerb zu.

Dieses Ergebnis spiegelt übergreifend gut die aktuelle Situation der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg wider: Diese profitiert weiterhin

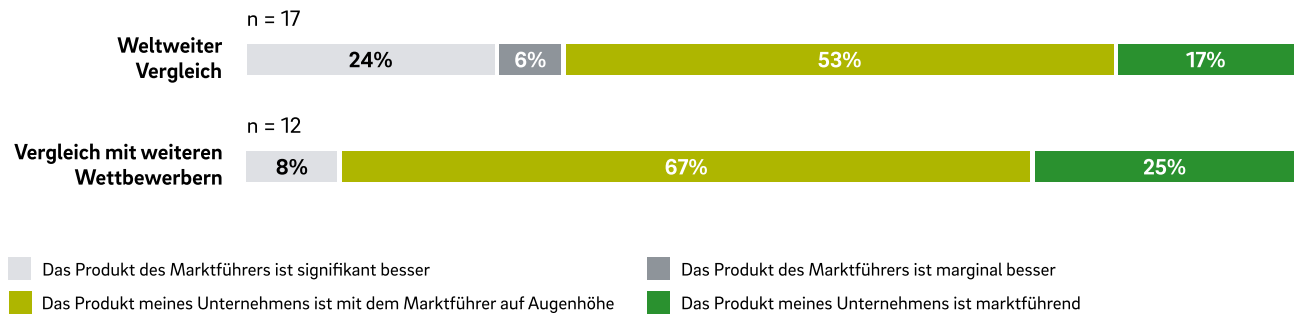
von langjähriger Expertise und Technologieführerschaft mit wichtigen im Bereich tätigen Unternehmen, vor allem in der Zulieferindustrie und bezogen auf den Mobilitätsbereich. Vor allem international wird aber zunehmend die Konkurrenz asiatischer Player spürbar, die derzeit mit hohen Investitionen und ambitionierten Plänen im Weltmarkt aufholen und in einigen Bereichen bereits führend sind. Viele der befragten Unternehmen haben daher Zweifel, ob der Standort Baden-Württemberg für die Zukunft wettbewerbsfähig aufgestellt ist, da vergleichbare Investitionsankündigungen und ambitionierte Pläne einheimischer Unternehmen bislang nur in eingeschränktem Maße formuliert wurden. Es wird da-

Abbildung 43

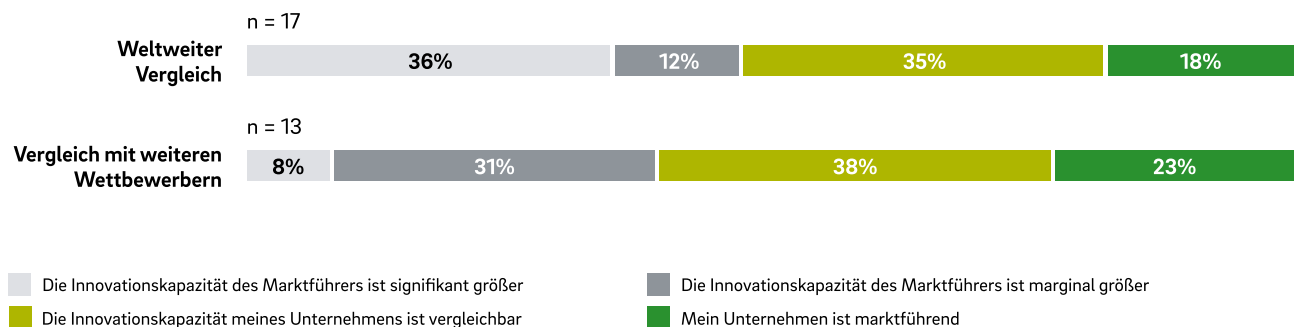
Einschätzung der Wettbewerbsfähigkeit der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Produkte und der Innovationskapazität der Unternehmen im Vergleich zu den Marktführern und weiteren Wettbewerbern [%]

Umfrage: Einschätzung Wettbewerbsfähigkeit

FRAGE: "Bitte vergleichen Sie die H₂/BZ-Produkte Ihres Unternehmens im Vergleich zum wichtigsten Wettbewerber je Region"¹

**Umfrage: Einschätzung Innovationsfähigkeit**

FRAGE: "Bitte bewerten Sie die Innovationskapazität Ihres Unternehmens/Ihrer Institution im Vergleich zum wichtigsten Wettbewerber je Region"²



¹ Antworten umfassen insgesamt 43 Vergleiche von 22 Unternehmen mit wichtigen Wettbewerbern.

² Antworten umfassen insgesamt 41 Vergleiche von 21 Unternehmen mit wichtigen Wettbewerbern.

Quelle: Roland Berger

her für die zukünftige Rolle der lokalen Unternehmen in diesem Markt entscheidend sein, in den nächsten zwei bis fünf Jahren den Anschluss an die internationale Konkurrenz nicht zu verlieren und weiterhin eine wichtige Rolle im Markt zu spielen. Hierzu sind klare Investitionsentscheidungen in den nächsten Jahren notwendig, die die Voraussetzungen für den Erhalt relevanter Marktanteile im sich beschleunigt entwickelnden Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Markt der Zukunft schaffen, vor allem hinsichtlich der Entwicklung eines attraktiven Produktportfolios, vor allem der OEMs, und des Aufbaus der benötigten Produktionskapazitäten.

Ein Blick auf die Beurteilung der Wettbewerbsfähigkeit der Produkte, die die Unternehmen Baden-Württemberg anbieten, unterstreicht dieses Bild: Hier zeichnet sich ein überwiegend positives Bild bezüglich der Wettbewerbsfähigkeit im internationalen Vergleich ab (Abb. 43). Über 70% der Unternehmen sagen aus, dass ihr Produkt marktführend oder auf Augenhöhe mit dem Produkt des Marktführers ist. Im Vergleich zu den weiteren Wettbewerbern im Markt sehen sich die Unternehmen sogar zu 92% mindestens auf Augenhöhe in Bezug auf ihre Produkte. Die Ergebnisse zeigen, dass die Unternehmen, die über ein Produkt für den Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Markt verfügen, sich im internationalen Wettbewerb hinsichtlich des technologischen Reifegrads ihrer Produkte gut aufgestellt sehen. Die sich darin widerspiegelnde hohe Technologiekompetenz auf Augenhöhe mit dem internationalen Wettbewerb ist dabei als gute Ausgangsbasis zur Positionierung der einheimischen Industrie im zukünftigen Markt zu werten – es wird in den nächsten Jahren darauf ankommen, die vorhandenen Kompetenzen zu nutzen und durch nachhaltige Investitionen in zukünftige signifikante Marktanteile zu verwandeln.

Dies wird auch durch die Bewertung der eigenen Innovationskapazität der befragten Unternehmen deutlich: Diese wird zwar überwiegend ebenfalls als vergleichbar mit dem Wettbewerb oder als marktführend eingeschätzt, jedoch ist die Bewertung nicht so positiv wie in Bezug auf die Wettbewerbsfähigkeit aktueller Produkte. Auch hierin spiegeln sich Zweifel der Befragten dahingehend wider, ob ihre Unternehmen mit dem weltweiten Wettbewerb zukünftig Schritt halten können, da derzeit angekündigte Investitionen im Vergleich zu diesem eher verhalten ausfallen. Gleichzeitig sieht sich ein großer Anteil der lokalen Unternehmen in dieser Hinsicht wettbewerbsfähig aufgestellt; dies verdeutlicht einmal mehr, dass klare Potenziale für die einheimische Industrie für eine wichtige Rolle im zukünftigen Markt bestehen, wenn in den nächsten Jahren nachdrücklicher als bisher in die Industrie investiert wird.

Aus den bisherigen Ausführungen der Studie ist deutlich geworden, dass bedeutende Wertschöpfungspotenziale in der zu erwartenden Entwicklung des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktes für baden-württembergische Unternehmen entstehen werden. Die baden-württembergische Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie verfügt dabei grundsätzlich über eine gute Ausgangslage, um eine gewichtige Rolle in diesem sich entwickelnden Markt zu spielen, muss aber vor allem in den nächsten Jahren weiter in die Technologie investieren, um den Anschluss an den internationalen Wettbewerb nicht zu verlieren. Unternehmen in Baden-Württemberg zeigten zuletzt ein verstärktes Interesse an der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie. Viele Zulieferer haben die zukünftige Bedeutung der Technologie erkannt und investieren in Forschung, Entwicklung und Ausbau der Produktionskapazitäten. Die OEMs agieren derzeit jedoch noch eher zögerlich und deren Investitionen sind im Vergleich zu denen in die Batterietechnologie weitaus geringer. Das Engagement

vieler führender Unternehmen, vor allem auch der OEMs, ist jedoch ein wichtiges Signal für die Industrie insgesamt.

Auch wenn die Wertschöpfungspotenziale in den nächsten Jahren noch eher gering sein werden, ist mittelfristig mit einem signifikanten Marktwachstum zu rechnen. Um von dieser zukünftigen Entwicklung zu profitieren, müssen sich die lokalen Unternehmen bereits heute und verstärkt in den nächsten Jahren im Markt positionieren. Die Investitionsentscheidungen von Unternehmen, Landesregierung und Kunden der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in den nächsten Jahren werden wegweisend für die Positionierung der Industrie

im internationalen Wettbewerb sein. Der Markt für Wasserstoff und Brennstoffzellen wird sich in den nächsten Jahren signifikant weiterentwickeln – es liegt in der Hand der lokalen Akteure, darin eine wichtige Rolle für den Standort Baden-Württemberg zu entwickeln.

Das Beispiel der Entwicklung der Batterietechnologie in Europa verdeutlicht dabei, dass es essenziell ist, die gute Positionierung der baden-württembergischen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie zu nutzen und vorhandene Kompetenzen und Kapazitäten kontinuierlich auf- und auszubauen, um international wettbewerbsfähig zu bleiben und Wertschöpfungspotenziale nicht an die internationale Konkurrenz zu verlieren. Die Ent-

wicklung des Batteriezellenmarktes hat gezeigt, dass Investitionen vor allem von asiatischen Herstellern getätigt wurden, die heute eine führende Position in diesem Bereich einnehmen. Durch deren heutige technologische Vorreiterrolle und marktbeherrschende Stellung sind Abhängigkeiten europäischer Hersteller entstanden, die heute keine eigenen Kompetenzen in diesem Bereich mehr haben. Diese Kompetenzen sollen nun mit großem politischen und finanziellen Aufwand wiederaufgebaut werden, ohne dass derzeit der zukünftige Erfolg absehbar ist. Eine solche Entwicklung gilt es für die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie in Deutschland und insbesondere am Standort Baden-Württemberg zu vermeiden.

Prognose des Umsatz-, Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotenzials in Baden-Württemberg





Dem Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor wird in Deutschland zukünftig ein großes Umsatzpotenzial prognostiziert. Dies zeigen zahlreiche aktuelle Studien ebenso wie die Auswertung der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Experteninterviews sowie der Online-Umfrage. Auch für Unternehmen in Baden-Württemberg ergeben sich daraus neue und zunehmend relevante Umsatzpotenziale. Die Betrachtung der baden-württembergischen Akteurslandschaft in Kapitel 4 zeigte, dass bereits heute eine Vielzahl von Akteuren entlang der gesamten Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Wertschöpfungskette in Baden-Württemberg tätig ist. Dies stellt eine gute Ausgangsbasis dafür dar, am Standort vom prognostizierten weltweiten Marktwachstum zukünftig signifikant zu profitieren und Arbeitsplätze in der Region zu sichern. Das folgende Kapitel analysiert daher die in Kapitel 3 bezifferten Marktvolumina des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektors hinsichtlich ihrer Effekte für Umsatz, Wertschöpfung und Arbeitsplätze baden-württembergischer Unternehmen.

Zur Prognose der Umsatzpotenziale im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor werden weitgehend die Annahmen der durch das FCH JU publizierten Marktstudie von 2019 verwendet. Im ambitionierten Szenario werden Investitionen und Umsatzpotenziale nach verschiedenen Sektoren (Transport, Industrielle Rohstoffe etc.) aufgesplittet. Dies erlaubt somit eine Prognose für das Umsatzpotenzial für in Deutschland und Baden-Württemberg tätige Unternehmen. Das FCH JU gilt als ausgewiesenes Expertengremium für eine Einschätzung der Entwicklung des Sektors in Europa. Aufgrund ihrer breiten Expertise fußt das im Rahmen der Studie verwendete Modell auf ihren Annahmen bezüglich der Nachfrageentwicklung nach Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Komponenten.

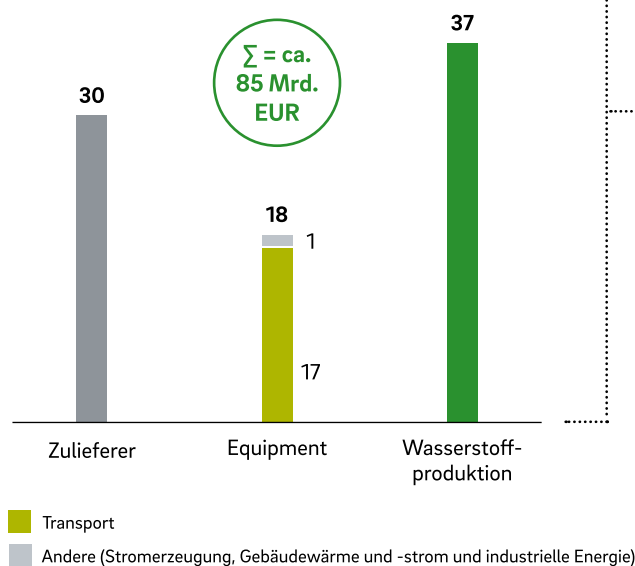
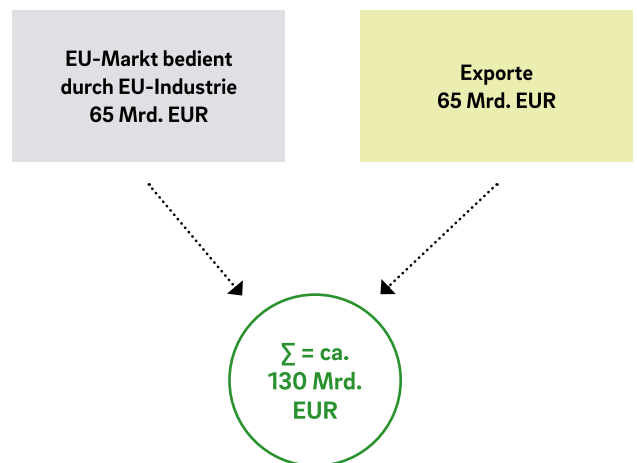
Das FCH JU prognostiziert im ambitionierten Szenario ein Umsatzpotenzial auf dem gesamten europäischen Markt (inklusive Importe) von 85 Mrd. EUR. Dieses wird sowohl verschiedenen Wertschöpfungsstufen als auch Sektoren zugeordnet. Abbildung 44 zeigt die aufgeteilten Umsätze. Etwa zwei Drittel entfallen auf Endanwendungen (ca. 55 Mrd. EUR). Das Umsatzpotenzial von Zulieferern wird auf ca. 30 Mrd. EUR geschätzt. Bei den Endanwendungen wird der Umsatz durch Wasserstoff auf 37 Mrd. EUR und durch Equipment auf ca. 18 Mrd. EUR geschätzt, wobei das größte Umsatzpotenzial dem Transportsektor (ca. 90% bzw. 17 Mrd. EUR) zugeschrieben wird.

Das Umsatzpotenzial für europäische Unternehmen prognostiziert die Studie auf insgesamt etwa 130 Mrd. EUR. Etwa 65 Mrd. EUR können durch Umsätze im europäischen Markt und etwa 65 Mrd. EUR durch Exporte erzielt werden.

Das Umsatzpotenzial für europäische Unternehmen kann mithilfe von durchschnittlichen Umsatzanteilen innerhalb von Wirtschaftszweigen auf Unternehmen in Deutschland und Baden-Württemberg aufgeschlüsselt werden. Dabei wird angenommen, dass der Exportanteil deutscher Firmen konstant bleibt, da sie sich sowohl hinsichtlich der Entwicklung entsprechender Komponenten als auch hinsichtlich deren Exporte bereits in einer guten Ausgangsposition befinden und daher gute Chancen haben, international wettbewerbsfähig zu bleiben. Es werden also die gleichen Umsatzanteile der deutschen Unternehmen für den europäischen Umsatz als auch für den Exportmarkt unterstellt. Für den neuen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor wird somit angenommen, dass Deutschland sich so erfolgreich wie bisher im europäischen Markt etabliert und die gleichen Marktanteile halten kann. Eine schematische Darstellung bietet Abbildung 45.

Abbildung 44**Umsätze entlang der Wertschöpfungskette und nach Sektoren in der Wasserstoff-Wirtschaft in Europa 2030**
[Mrd. EUR]**Gesamter EU-Markt**

(in Europa tätige Unternehmen + Importe)

**Umsatzpotenzial in Europa tätiger Unternehmen**

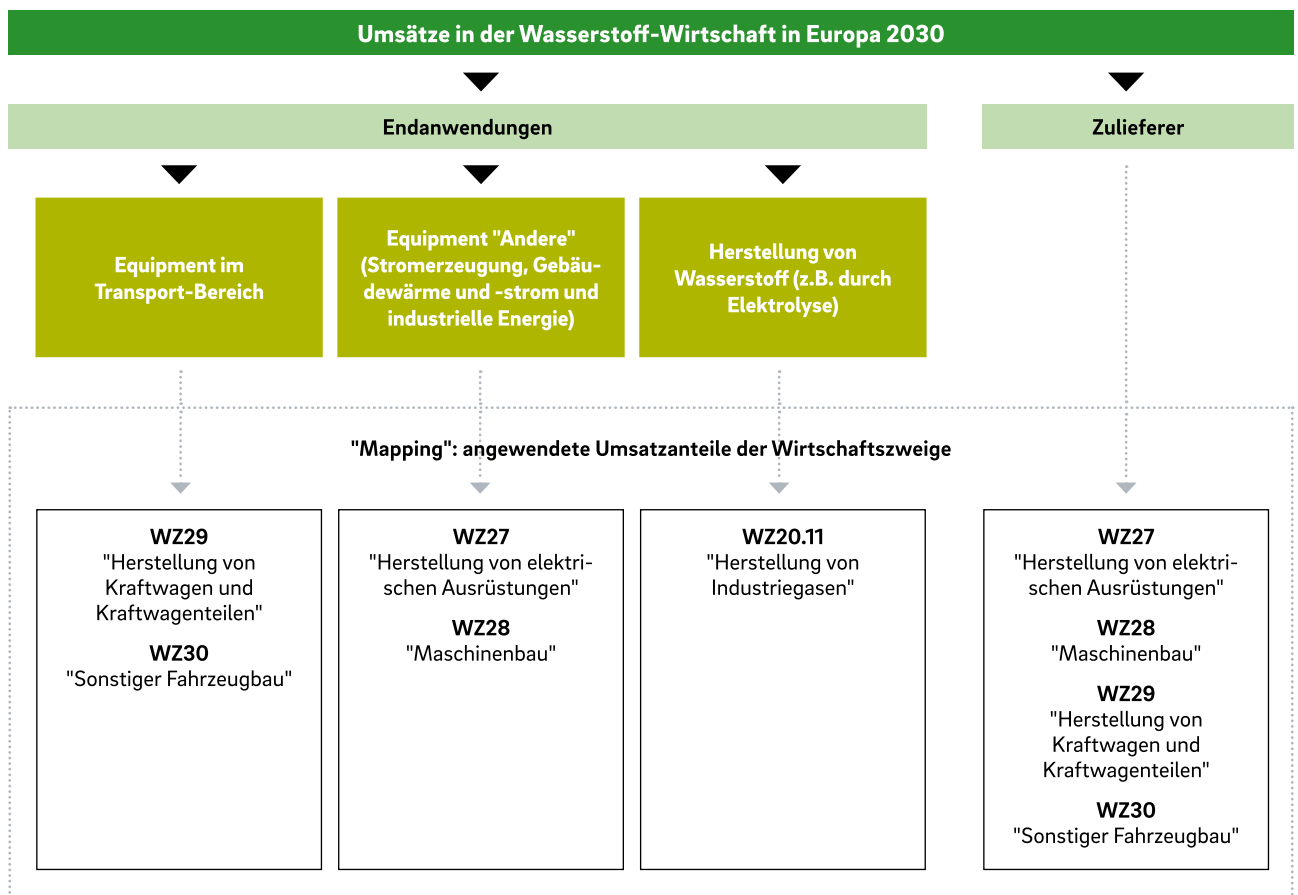
Quelle: FCH 2 JU, 2019

Die Umsätze in Deutschland tätiger Firmen durch den Verkauf von Wasserstoff werden aus dem Anteil Deutschlands am Umsatz in Europa (EU28) innerhalb des Wirtschaftszweigs 20.11 (WZ20.11 "Herstellung von Industriegasen") nach Daten von Eurostat abgeschätzt.¹⁹ Diese Umsatzzahlen erfassen sowohl die Umsätze in Europa als auch die Umsätze durch Exporte. Für die Umsätze im

Equipment-Bereich werden die durchschnittlichen Umsatzanteile folgender Wirtschaftszweige verwendet:

¹⁹ Eigene Berechnung für 2016 (letztes verfügbares Jahr) basierend auf Daten von Eurostat (2016).

Abbildung 45

Systematik der Zuordnung der Wirtschaftszweige²⁰

Quelle: Roland Berger

²⁰ Die Abgrenzung orientiert sich direkt an der Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ2008) des Statistischen Bundesamtes (2008). In dieser Systematik werden Betriebe dem Wirtschaftszweig zugeordnet, in welchem der Schwerpunkt ihrer wirtschaftlichen Tätigkeit liegt.

Für Equipment im Transport-Sektor

- Wirtschaftszweig 29 (WZ29 "Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen") und
- Wirtschaftszweig 30 (WZ30 "Sonstiger Fahrzeugbau").

Für Equipment in den Sektoren Stromerzeugung, Gebäudewärme und -strom und industrielle Energie

- Wirtschaftszweig 27 (WZ27 "Herstellung von elektrischen Ausrüstungen") und
- Wirtschaftszweig 28 (WZ28 "Maschinenbau").

Diese Wirtschaftszweige erfassen wesentliche Aktivitäten, wie etwa die Herstellung von Brennstoffzellen (WZ27.9 "Herstellung von sonstigen elektrischen Ausrüstungen und Geräten") und die Herstellung von Elektrolyseanlagen (Michalski et al., 2019).

Die Umsätze im Zulieferbereich (sowohl in Europa als auch durch Exporte) werden aus dem durchschnittlichen Anteil Deutschlands in Europa der WZ27, 28, 29 und 30 abgeschätzt. In der FCH-JU-Studie werden die Umsätze der Zulieferer nicht weiter nach Sektoren untergliedert. Dies ist für die Berechnungen insofern sinnvoll, da Zulieferunternehmen nur schwer einem Sektor zugeordnet werden können. Vielmehr muss damit gerechnet werden, dass Zulieferer Teile und Komponenten an eine Vielzahl von Unternehmen aus unterschiedlichen Sektoren liefern.

Für die weitere Zerlegung des deutschen Umsatzes auf in Baden-Württemberg tätige Unternehmen wird die gleiche Methodik angewendet. Damit wird für die industrielle Entwicklung von Wasserstoff (inkl. Equipment) die gleiche Marktposition Baden-Württembergs wie bisher in den jeweiligen Industrien unterstellt. Hierzu werden Daten des Statistischen Bundesamtes genutzt (Statistisches Bundesamt, 2017a).

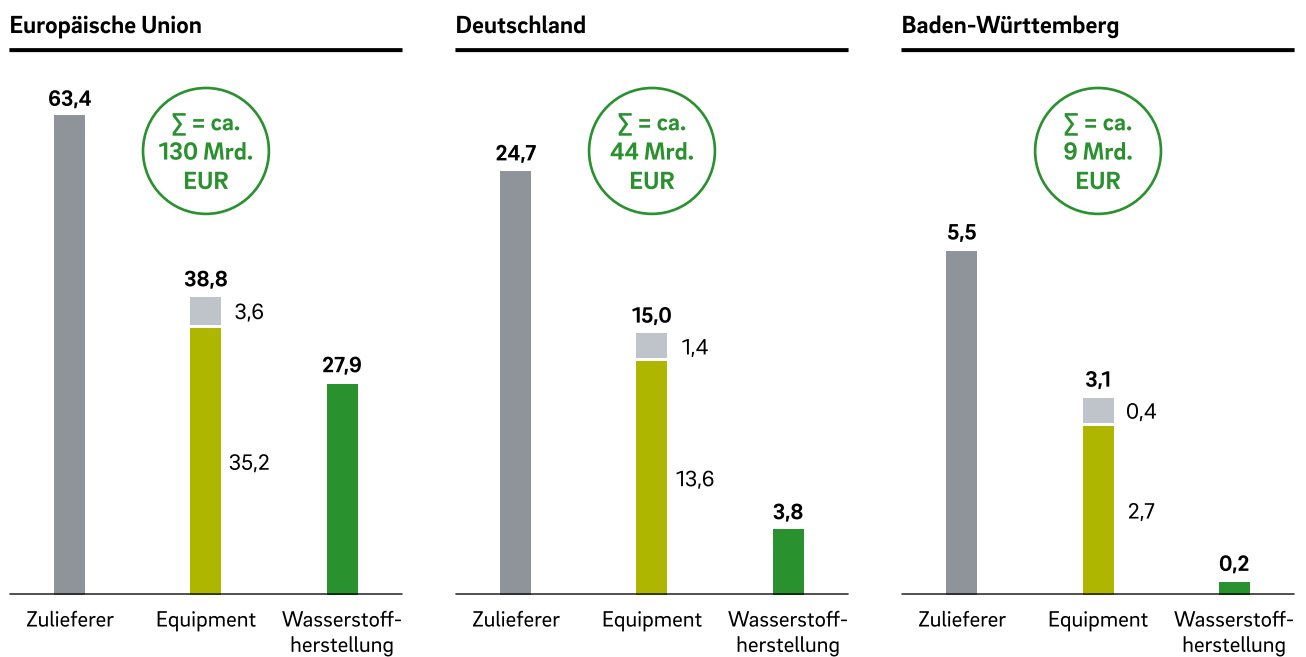
Im ambitionierten Szenario des FCH JU ergibt sich für in Deutschland tätige Unternehmen 2030 ein Umsatzpotenzial von ca. 44 Mrd. EUR. In Baden-Württemberg tätige Unternehmen sind daran mit einem Volumen von ca. 9 Mrd. EUR beteiligt. Abbildung 46 schlüsselt das Umsatzpotenzial entlang der Wertschöpfungskette auf. Die Zahlen verdeutlichen, dass der Schwerpunkt der baden-württembergischen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie auf der Herstellung von Komponenten und Teil-Systemen liegt. Über 97% des Umsatzpotenzials (ca. 8,6 Mrd. EUR) liegen in diesem Bereich. Hier kann Baden-Württemberg seine starke internationale Wettbewerbsfähigkeit nutzen. Baden-Württemberg nimmt in den betrachteten Industrien eine bedeutsame Rolle innerhalb Europas ein. So werden mehr als 8% des europäischen Umsatzes in diesen Industrien durch in Baden-Württemberg tätige Firmen erwirtschaftet. Der Herstellung von Wasserstoff per se kommt hingegen nur eine geringe Bedeutung für den Industriestandort Baden-Württemberg zu. Einhergehend mit den in Deutschland vergleichsweise hohen Stromgestehungskosten kann daher davon ausgegangen werden, dass Baden-Württemberg sowie Deutschland insgesamt langfristig Wasserstoff importieren werden.

In Baden-Württemberg gab es 2017 insgesamt 4,6 Mio. sozialversicherungspflichtig Beschäftigte, davon entfielen rund 630.000 auf Wirtschaftszweige, denen der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor zugeordnet werden kann.²¹ In diesen Wirtschaftszweigen werden bis 2030 durch den Hochlauf der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie zusätzliche Bruttowertschöpfung und somit neue Arbeitsplätze entstehen.

²¹ Eigene Berechnung basierend auf Daten der Bundesagentur für Arbeit (2017). Betrachtet wurden die WZ20 und WZ27-30.

Abbildung 46

Prognose des Umsatzpotenzials für die EU, Deutschland und Baden-Württemberg im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor in 2030 [Mrd. EUR]



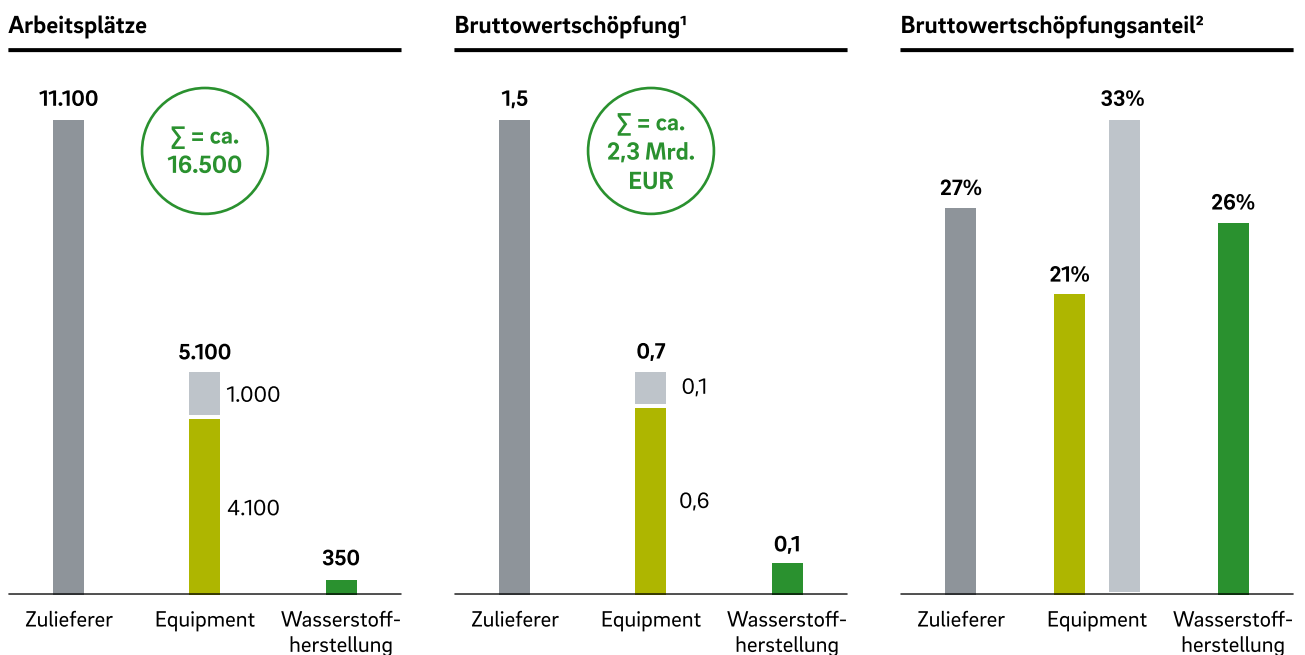
Umsatzpotenzial für Unternehmen in Baden-Württemberg konzentriert sich auf Equipment und Zulieferer

■ Transport ■ Andere (Stromerzeugung, Gebäudewärme und -strom und industrielle Energie)

Quelle: Roland Berger

Abbildung 47

Prognose der Bruttowertschöpfung und Arbeitsplätze in Baden-Württemberg im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor 2030 [# Arbeitsplätze, Mrd. EUR]



Auf Basis der aktuellen Industriestruktur ergibt sich ein Bruttowertschöpfungspotenzial von 2,3 Mrd. EUR in 2030

■ Transport ■ Andere (Stromerzeugung, Gebäudewärme und -strom und industrielle Energie)

¹ Wert der produzierten Waren minus Vorleistungen.

² Anteil der Bruttowertschöpfung am Umsatz, gewichtet nach Umsatz in BW in den beteiligten Wirtschaftszweigen. Daten zur Wertschöpfung für Gesamtdeutschland.

Quelle: Roland Berger

Die Berechnung des zusätzlichen Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotenzials erfolgt dabei mithilfe von Daten des Statistischen Bundesamtes zu Bruttowertschöpfungsanteilen sowie Daten der Bundesagentur für Arbeit zu sozialversicherungspflichtig Beschäftigten für die jeweiligen relevanten Wirtschaftszweige (Statistisches Bundesamt, 2017a, Statistisches Bundesamt, 2017b). Dabei ist das Umsatz- und Produktionspotenzial in Baden-Württemberg durch die installierten Produktionskapazitäten begrenzt. Die verfügbare Produktionskapazität wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. So wird es etwa aufgrund von technischem Fortschritt und Produktivitätssteigerungen – beispielsweise durch Investitionen in Industrie 4.0 – zukünftig möglich sein, bei geringeren Kosten die gleiche Menge zu produzieren. Mit der steigenden Produktivität kommt es ebenfalls zu einer stetig wachsenden Kapitalintensität. Das bedeutet, dass der Einsatz von Kapital im Verhältnis zum Einsatz von Personal ansteigt. Dies hat wiederum einen Anstieg der Arbeitsproduktivität zur Folge, was sich direkt auf die Beschäftigung in einer Industrie auswirkt. Für einen gegebenen Output der Industrie verringert sich daher die Arbeitsnachfrage und somit die Beschäftigung. Es wird im Folgenden eine Produktivitätssteigerung von 2% pro Jahr angenommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass im ambitionierten Szenario des FCH JU durch den Aufbau des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektors Bruttowertschöpfung in Höhe von 2,3 Mrd. EUR im Jahr 2030 in Baden-Württemberg entstehen könnte, zu großen Teilen in den Bereichen Zulieferer und Equipment (Abb. 47). Dies entspricht etwa 1,6% der aktuellen Bruttowertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes²² Baden-Württembergs. Dies deckt sich mit der Wertschöpfungsprognose des Fraunhofer ISI sowie des Fraunhofer ISE. Die Autoren geben einen Anstieg der globalen Wertschöpfung deutscher Hersteller bei Elektrolyse und Brennstoffzellen auf etwa 10 Mrd.

EUR für das Jahr 2030 an (Fraunhofer ISI und Fraunhofer ISE, 2019). Unterstellt man den gleichen Anteil Baden-Württembergs wie im kompletten verarbeitenden Gewerbe (22%) (Statistisches Bundesamt, 2017a), ergäbe dies einen Wertschöpfungsanteil von etwa 2 Mrd. EUR.

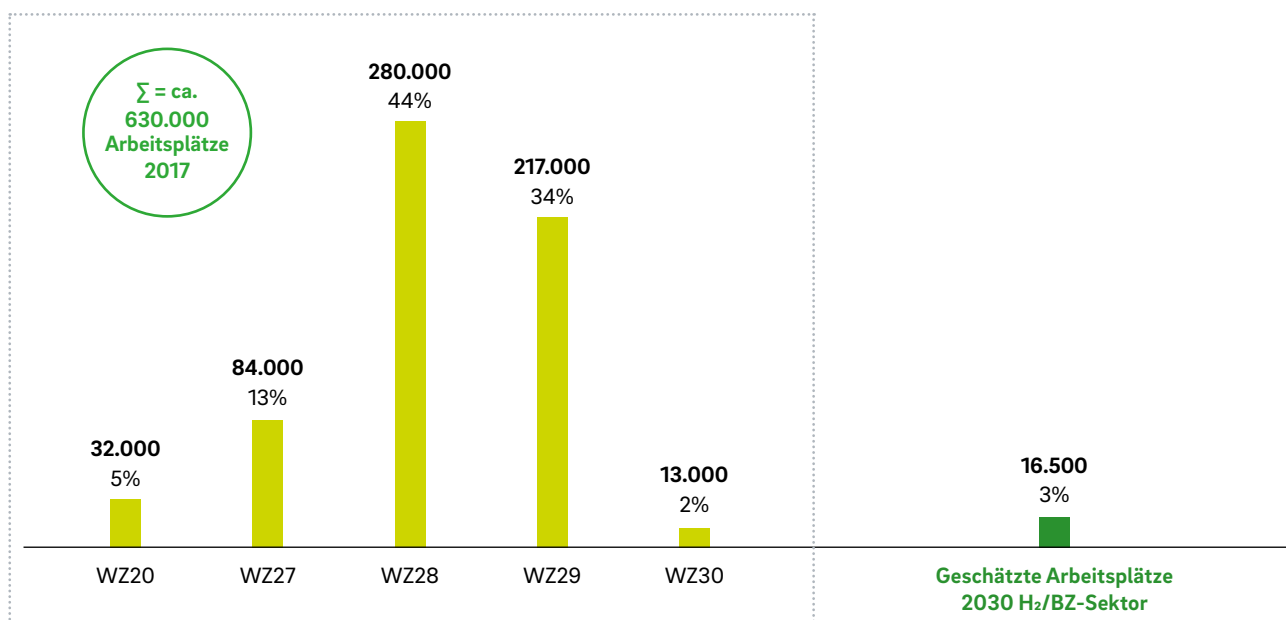
Aus dieser zusätzlichen Bruttowertschöpfung im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor ergeben sich rund 16.500 neue Arbeitsplätze in Baden-Württemberg. Davon entfallen rund 11.000 auf den Bereich Zulieferer, rund 5.000 auf den Bereich Equipment sowie weitere 350 Arbeitsplätze auf den Bereich der Wasserstoff-Herstellung (Abb. 47). Dies entspricht einem Zuwachs von knapp 3% in den betrachteten Wirtschaftszweigen. Die Anzahl der neu geschaffenen Arbeitsplätze liegt damit etwas höher als die Anzahl der aktuell im sonstigen Fahrzeugbau (WZ30) Baden-Württembergs sozialversicherungspflichtig Beschäftigten (Abb. 48).

Unsere Ergebnisse stehen im Einklang mit Befunden anderer Studien zu den Beschäftigungseffekten der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie. So schätzt der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV), dass in Deutschland bis 2030 bis zu 70.000 Arbeitsplätze in diesem Bereich neu entstehen können (DWV, 2018). Vor dem Hintergrund, dass Baden-Württemberg einen Anteil von knapp über 20% an den Beschäftigten Deutschlands in den betrachteten Industrien hat, würde dies rund 16.000 zusätzlichen Arbeitsplätzen entsprechen.

²² Zum verarbeitenden Gewerbe zählen laut Klassifikation der Wirtschaftszweige WZ05 bis WZ33. Dazu gehören unter anderem die Gewinnung von Erdöl und Erdgas, die Herstellung von Nahrungsmitteln, Textilien und pharmazeutischen Erzeugnissen sowie die Metallherzeugung und -bearbeitung. Die Bruttowertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes in Baden-Württemberg betrug 2017 (aktuell verfügbares Jahr) rund 144 Mrd. Euro.

Abbildung 48

Arbeitsplätze in Baden-Württemberg nach Wirtschaftszweigen und Prognose der Arbeitsplätze im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor 2030 [# Arbeitsplätze]



Quelle: Roland Berger

Auch decken sich die Ergebnisse mit denen aus der für diese Studie angefertigte Befragung baden-württembergischer Unternehmen. Die befragten Unternehmen schätzen, dass sie 2030 etwa 6.000 Mitarbeiter im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich beschäftigen. Eine Extrapolation auf alle Unternehmen, die in Baden-Württemberg im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich tätig sind, ergibt etwa 16.000 zukünftige Mitarbeiter in diesem Bereich.

Anzumerken ist, dass es sich bei diesen Ergebnissen um Bruttobeschäftigungseffekte handelt. Es wird somit lediglich betrachtet, wie viele Arbeitsplätze durch die Marktentwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie in Baden-Württemberg in den betrachteten Industrien neu entstehen. Nettoeffekte, welche den Abbau von Arbeitsplätzen in anderen Bereichen beschreiben, werden hingegen nicht betrachtet. Dabei könnte es sich etwa um Arbeitsplätze in der Rohölverar-

beitung oder in der Herstellung von Komponenten des Verbrennungsmotors handeln.

Festzuhalten ist insbesondere das wirtschaftliche Potenzial der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie für Baden-Württemberg im Verkehrssektor. Zum einen lässt sich dort ein hohes Umsatz- und Wertschöpfungspotenzial ermitteln, zum anderen kommt der Automobilindustrie als Arbeitgeber für Baden-Württemberg ohnehin eine große Bedeutung zu. Vor dem Hintergrund des bevorstehenden Strukturwandels in der Automobilindustrie und der damit verbundenen Abkehr vom klassischen Verbrennungsmotor hin zu klimaneutralen Alternativen könnten Brennstoffzellen-Fahrzeuge somit einen bedeutenden Anteil an Wertschöpfung in Baden-Württemberg halten. Denn während bei der Produktion von batterieelektrischen Fahrzeugen ein Teil der Wertschöpfung in Baden-Württemberg verloren gehen wird, könnte bei der Herstellung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ein großer Teil vor Ort gehalten werden. Das liegt daran, dass etwa die Fertigung von Batteriezellen, welche derzeit einen bedeutenden Anteil an der Wertschöpfung eines batterieelektrischen Fahrzeugs haben, voraussichtlich im Ausland bzw. in anderen Bundesländern stattfinden wird. Somit wird es langfristig durch den veränderten Antriebstrang zu einem Beschäftigungsrückgang in der Automobilindustrie kommen (Fraunhofer IAO, 2018; IAB, 2018). Brennstoffzellen-Fahrzeuge haben zwar ebenfalls eine Batterie, diese besitzt jedoch aufgrund ihrer geringeren Kapazität einen niedrigeren Anteil an der Wertschöpfung als bei batterieelektrischen Fahrzeugen (e-mobil BW, 2019). Dahingegen besteht bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen noch die Möglichkeit, die wesentlichen Teile der Wertschöpfungskette in Baden-Württemberg zu produzieren und somit eine höhere Wertschöpfung zu halten.

Insgesamt zeigen unsere Ergebnisse, dass die Entwicklung des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektors mittel- bis langfristig Arbeitsplätze in Baden-Württemberg sichern kann. Dabei liegen unsere Ergebnisse der szenariospezifischen Prognose sogar eher am unteren Ende der Einschätzung von Experten. Die baden-württembergischen Unternehmen könnten vom weltweiten Wachstum des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektors aufgrund ihrer ausgeprägten Auslandsverflechtung und starken Exportstellung sogar noch überproportional stärker als andere Regionen in Deutschland profitieren. Damit könnte der Umsatzanteil Baden-Württembergs im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor sogar noch höher als in den betrachteten Wirtschaftszweigen ausfallen. Zudem sind die betrachteten Wirtschaftszweige eng mit anderen Sektoren verbunden, wie z.B. der Herstellung von Metall- oder Gießereierzeugnissen (WZ25 und WZ24.5) (Statistisches Bundesamt, 2015). Es ist deshalb davon auszugehen, dass ein Hochlauf der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie durch Spillover-Effekte zusätzlich Arbeitsplätze in anderen Branchen schaffen wird. Es gilt, entsprechende Rahmenbedingungen zu schaffen, um Investitionen im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor zu fördern. So kann der Industriestandort Baden-Württemberg langfristig gestärkt werden.

Herausforderungen für die Marktentwicklung und Lösungsansätze





In den vorangegangenen Kapiteln wurde beschrieben, welche Rolle Wasserstoff und Brennstoffzellen im zukünftigen Energiesystem einnehmen können und welche Potenziale in der erwarteten weiteren Marktentwicklung dabei für die baden-württembergische Industrie entstehen können. Für diese weitere Marktentwicklung wurden auf europäischer und nationaler Ebene in Deutschland durch die Europäische Kommission und die Bundesregierung bereits wichtige Rahmenbedingungen durch die Verabschiedung von Klimaschutzzielen und -plänen sowie konkrete regulatorische Vorgaben zur Emissionsreduktion und Steigerung der Energieeffizienz gesetzt, die eine breite Marktdurchdringung von Wasserstoff und Brennstoffzellen und die Entwicklung eines signifikanten Marktes für die Technologie vor allem nach 2030 erwartbar machen.

Der 2016 von der Bundesregierung verabschiedete Klimaschutzplan 2050 sowie das im Oktober 2019 verabschiedete Klimaschutzprogramm 2030 beinhalten sektorspezifische Emissionsminderungsziele für das Jahr 2030, insbesondere für die Stromerzeugung, aber auch den Gebäude- und Verkehrssektor und den industriellen Bereich, zu deren Erreichung Wasserstoff und Brennstoffzellen einen wesentlichen Beitrag leisten können. Die Erreichung dieser Zielsetzungen erfordert nicht nur eine Energiewende in der Stromerzeugung, sondern auch eine Verkehrs- und Wärmewende. Folglich ist eine der drei Säulen der Klimastrategie der Bundesregierung neben der Steigerung der Energieeffizienz und der direkten Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung die Realisierung der Sektorkopplung im Energiesystem und damit die Nutzung erneuerbaren Stroms in allen wesentlichen Sektoren mit hohem Energiebedarf. Wasserstoff spielt für die Realisierung der Sektorkopplung eine wesentliche Rolle als flexibel speicherbarer und transportierbarer Energieträger, der eine Dekarbonisierung in allen Anwendungsbereichen er-

laubt – auch solchen, die anderweitig nur schwer oder gar nicht dekarbonisierbar wären. Aus heutiger Sicht ist die Realisierung solcher Ziele ohne eine Anwendung von Wasserstoff und Brennstoffzellen nicht denkbar.

Neben den Potenzialen zur Dekarbonisierung aller Energiesektoren durch die Nutzung von Wasserstoff und Brennstoffzellen und zum Erhalt der zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit des Technologie- und Industriestandorts Baden-Württemberg durch Investitionen in diese Technologie ist die Entwicklung eines bedeutsamen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktes mit wesentlichen Herausforderungen verbunden: Die Realisierung eines neuen Energiesystems allein auf Grundlage erneuerbar erzeugter Energie mit der Realisierung von Sektorkopplung durch Wasserstoff stellt eine große gesellschaftliche, ökonomische und technologische Herausforderung dar, die in den nächsten Jahren bewältigt werden muss. Gleichzeitig sind alle diese im Folgenden ausführlicher dargestellten Herausforderungen aus heutiger Sicht beherrschbar. Es existieren bereits vielfältige Lösungsansätze, mit denen heute noch bestehende Herausforderungen für die weitere Marktentwicklung ausgeräumt werden können. Hierzu bedarf es vor allem einer nachhaltigen und konsequenten Umsetzung und Akzeptanz solcher Ansätze durch Politik, Industrie und Unternehmen sowie Privatkunden in den nächsten Jahren, in denen wichtige Weichen für den Umbau unserer Energiesysteme und die Rolle von Wasserstoff und Brennstoffzellen dabei gestellt werden. In den nächsten Jahren werden wichtige Grundlagen für die mittel- bis langfristige Marktentwicklung von Wasserstoff und Brennstoffzellen gelegt und nur durch die konsequente Umsetzung entsprechender Maßnahmen und nachhaltige Investitionen in die Technologie kann bis 2030 und darüber hinaus ein signifikantes Marktwachstum erfolgen, von dem deutsche und baden-württembergische Unternehmen profitieren können.

WESENTLICHE HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE MARKTENTWICKLUNG AUS STAKEHOLDER-SICHT

Bestehende Herausforderungen bei der weiteren Marktentwicklung von Wasserstoff und Brennstoffzellen wurden im Rahmen dieser Studie in der durchgeführten Umfrage unter baden-württembergischen Stakeholdern der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie ebenso deutlich wie in den Hintergrundinterviews mit Forschungseinrichtungen und Unternehmen der Branche: Aus Sicht der befragten Stakeholder erreichten bei der Frage, welche Hemmnisse für die Marktentwicklung und Kommerzialisierung von Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen derzeit vor allem gesehen werden, fünf Hemmnisse einen Durchschnittswert von über drei Punkten, auf einer Skala von "1" (kein Hemmnis) bis "5" (signifikantes Hemmnis) (Abb. 48). An erster Stelle wurde die fehlende politische Unterstützung und Anreizsetzung mit einem Durchschnittswert von 3,7 Punkten genannt, gefolgt von der mangelnden Wirtschaftlichkeit des Geschäftsmodells (3,6 Punkte) und der Priorisierung anderer Technologien (3,3 Punkte). Regulatorische Schranken (3,2 Punkte) sowie die fehlende Weiterentwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie (3,1 Punkte) folgen auf Platz vier und fünf. Als weniger signifikant wurden fehlende Finanzierung (2,9 Punkte), die Komplexität von Genehmigungen (2,8 Punkte), fehlende Akzeptanz der Endkunden (2,7 Punkte) und mangelnde Versorgung mit "grünem" Wasserstoff (2,6 Punkte) bewertet. Mit einem Durchschnittswert von 2,2 Punkten wird mangelnde technologische Reife von den Umfrageteilnehmern mehrheitlich als geringes Hemmnis betrachtet.

Zusammenfassend lassen sich die wesentlichen aktuellen Herausforderungen für die weitere Marktentwicklung aus Sicht der Studie in die folgenden Kategorien einteilen:

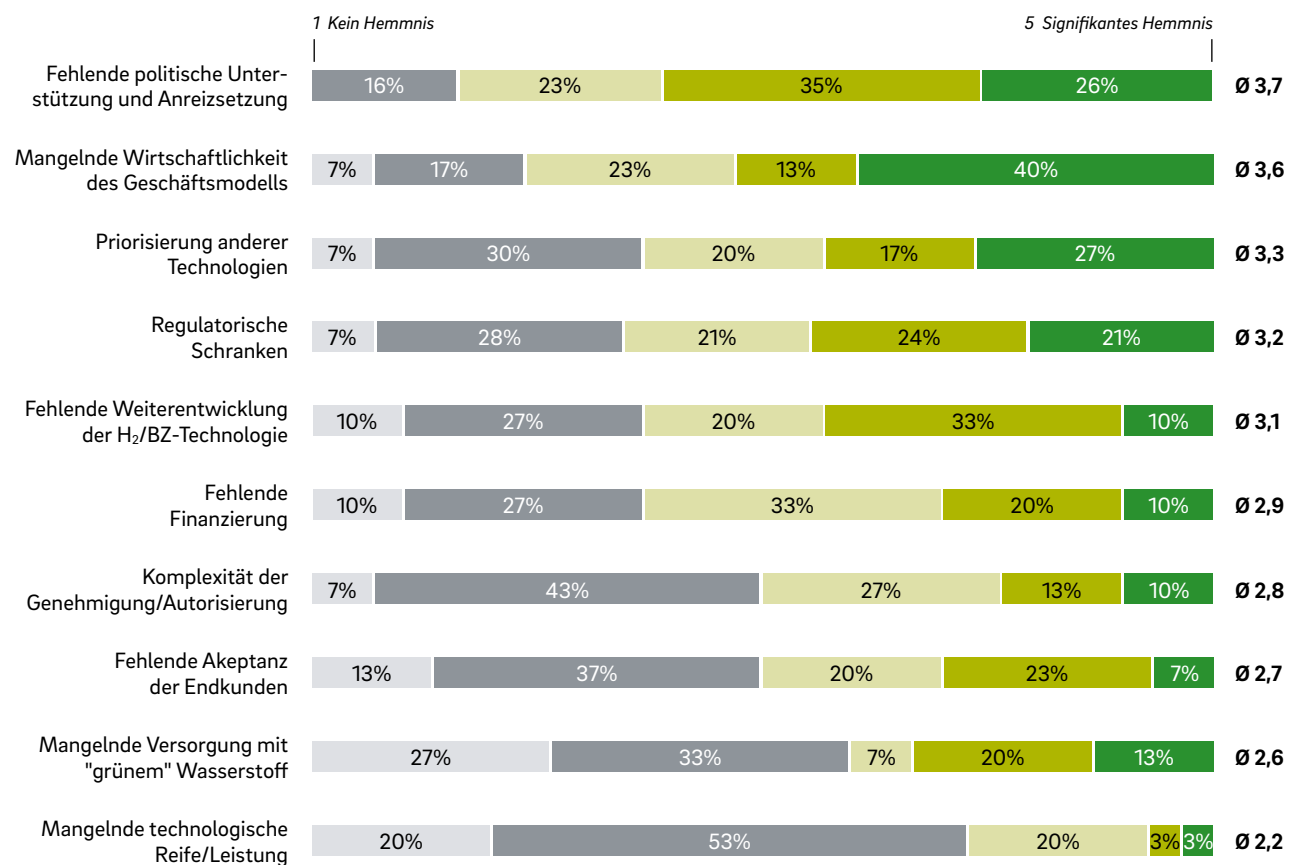
- Politische und regulatorische Herausforderungen
- Ökonomische und finanzielle Herausforderungen
- Technische Herausforderungen
- Gesellschaftliche Herausforderungen

POLITISCHE UND REGULATORISCHE HERAUSFORDERUNGEN UND LÖSUNGSANSÄTZE

Politische und regulatorische Rahmenbedingungen spielen eine entscheidende Rolle für die Etablierung und Marktentwicklung innovativer Technologien. Bundes- und Landesregierung haben dabei verschiedene Instrumente zur Hand, um Anreize für den Ausbau und die Implementierung solcher Technologien zu setzen und diese damit zu fördern. Dies kann einerseits durch strategische Vorgaben und politische Positionierung geschehen, wie z.B. beim Atomausstieg in Deutschland oder bei der Formulierung der Ausbauziele im Bereich der erneuerbaren Energien. Diese politischen Festlegungen erhöhen die Planungssicherheit der im Markt tätigen Unternehmen und verringern deren Investitionsrisiko. Für Wasserstoff-Anwendungen gab es bisher keine klare, öffentlichkeitswirksame Positionierung der Bundesregierung sowie der baden-württembergischen Landesregierung zum Ausbau der Technologie verbunden mit einem ganzheitlichen Maßnahmenkatalog, der speziell den Ausbau von Wasserstoff und Brennstoffzellen fördern soll (abgesehen von verschiedenen Aktivitäten zur Förderung von Forschungs- und Demonstrationsprojekten). Zunehmend wird daher auch in Deutschland gefordert, entschiedenere Maßnahmen speziell zur Unterstützung des Ausbaus der Nutzung von Wasserstoff und Brennstoffzellen zu unternehmen (vgl. die aktuellen Bundesratsbeschlüsse, Bundesrat 2019a und Bundesrat 2019b). So soll die angekündigte nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung verschiedene Zielsetzungen und Maßnahmen für die Weiterentwicklung des Sektors in Deutschland definie-

Abbildung 49**Herausforderungen hinsichtlich des Einsatzes und der Entwicklung von Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen [%]****Umfrage: Herausforderungen für die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie**

FRAGE: "Welche Hemmnisse sehen Sie derzeit für den Einsatz/die Entwicklung von H₂/BZ-Anwendungen für Ihr Unternehmen/Ihre Institution?" (n = 31)



1 Kein Hemmnis 2 3 4 5 Signifikantes Hemmnis

ren. Im Fokus sollen dabei die Förderung der einheimischen Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie sowie die Förderung der Nutzung von "grünem" Wasserstoff als erneuerbaren Energieträger durch Maßnahmen in verschiedenen Sektoren stehen. Vor allem die asiatischen Leitmärkte im Wasserstoff- und Brennstoffzellenbereich haben bislang klare Zielsetzungen und nationale Roadmaps zur Entwicklung der nationalen Wasserstoffmärkte definiert. Das Fehlen solcher Ziele und Strategien in Deutschland wurde auch in der im Rahmen der Studie durchgeführten Umfrage und den Interviews kritisiert. Mit einem Durchschnittswert von 3,7 bewerteten die Umfrageteilnehmer die fehlende politische Unterstützung und Anreizsetzung auf Platz eins sowie die Priorisierung anderer Technologien auf Platz drei der signifikantesten Hemmnisse für die weitere Marktentwicklung. Insbesondere wurde dabei eine technologiespezifische Priorisierung der batteriebetriebenen Elektromobilität kritisiert und fehlende Technologieoffenheit bemängelt.

Andererseits ist die Regulierung ein klassisches Lenkungsinstrument der Politik zur Förderung innovativer Technologien. Durch anreizsetzende Besteuerung oder Subventionierung kann die öffentliche Hand den Ausbau neuer Technologien initiieren und beschleunigen, wie z.B. beim Ausbau erneuerbarer Energien durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geschehen. Allerdings setzt die bestehende Förderung und Regulierung, die die Brennstoffzellenindustrie direkt oder indirekt betrifft, derzeit noch zu wenige Anreize, um einen Markthochlauf effektiv zu beschleunigen. Die Förderung für den Kauf von Brennstoffzellen-Pkw ist mit aktuell 4.000 EUR zu gering, um den derzeit um ein Vielfaches höheren Kaufpreis auszugleichen. Auch die geplante Erhöhung der Förderung auf 5.000 bzw. 6.000 EUR in Abhängigkeit vom Listenpreis wird den höheren Kaufpreis nicht vollständig kompensieren können. Auch das aktu-

elle Projektbudget des Bundesverkehrsministeriums von 5 Mio. EUR zur Förderung von Brennstoffzellen-Pkw in Fahrzeugflotten kann hierbei nur einen begrenzten Beitrag leisten. Dies ist auch dadurch bedingt, dass die Anschaffung von Brennstoffzellen-Pkw durch die geringe Abdeckung mit Wasserstoff-Tankstellen und die geringe kommerzielle Verfügbarkeit von Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland für viele Unternehmen und Kommunen gar nicht infrage kommt.

Zudem führen einige Regulierungen im Energiesektor für die Brennstoffzellenindustrie zu Fehlanreizen. So wird z.B. der von Elektrolyseuren bezogene Strom mit der EEG-Umlage belegt und der Elektrolyseur damit als Endverbraucher definiert, obwohl die elektrische Energie dort lediglich in Wasserstoff umgewandelt wird. Diese Regulierung ist einer der Gründe, die Elektrolyseure und Power-to-X-Anlagen insgesamt unrentabel macht, da die resultierenden Wasserstoff-Herstellungskosten deutlich zu hoch für eine breite Durchsetzung im Markt sind. Eine mögliche Lösung hierfür kann es sein, Elektrolyseuranlagen direkt an Wind- oder Solarparks anzuschließen und dadurch anfallende Stromnetzegebühren zu vermeiden; hierfür müssen aber im Einzelfall die Rahmenbedingungen für die Realisierbarkeit gegeben sein. Darüber hinaus könnte auch eine stärkere Besteuerung konventioneller Energieträger, z.B. durch eine CO₂-Steuer wie im Klimaschutzprogramm 2030 bereits vorgesehen, Anreize für die Herstellung von "grünem" Wasserstoff setzen. Auch die gesetzliche Fixierung der verbindlichen Einhaltung von Klimaschutzzielen in den verschiedenen Energiesektoren, weitere regulatorische Maßnahmen, wie z.B. die Festsetzung von Flottenemissionswerten für die Automobilhersteller, oder die Umsetzung von Maßnahmen auf kommunaler Ebene, wie Einfahrverbote für konventionell angetriebene Fahrzeuge in Städten, können den Weg zur Wirtschaftlichkeit der Technologie beschleunigen.

Des Weiteren könnten Beschaffungen öffentlicher Stellen als weiterer Hebel für die Marktentwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie dienen. Öffentliche Beschaffungen sind allein für ca. 10 bis 15% des jährlichen deutschen Bruttoinlandsprodukts verantwortlich und sind dadurch ein enormer Wirtschaftsfaktor. Dabei werden etwa 12% der Vergaben auf Bundesebene, 30% auf Länderebene und ca. 58% auf kommunaler Ebene organisiert. Dennoch beschränkt sich die Vergabe von öffentlichen Geldern im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzelle derzeit mehrheitlich auf Pilot- und Demonstrationsprojekte, deren Förderlinien derzeit meist noch für Einzelbeschaffungen mit begrenzter Betriebsdauer und direktem Forschungsbezug ausgelegt sind und mit zunehmender Reife der Technologie nicht mehr ausreichen. Um die Marktentwicklung weiter voranzubringen und den Kommerzialisierungsgrad der Technologie zu erhöhen, müssen Projekte zunehmend skaliert werden. Jedoch sind die Pläne Baden-Württembergs, eine größere Anzahl an Brennstoffzellen-Anwendungen im Mobilitätssegment zu beschaffen, bisher nicht realisiert worden, auch weil ein entsprechendes Produktangebot fehlt. Eine großflächigere und standardisierte Förderung der öffentlichen Beschaffung speziell von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen, z.B. im Bereich des öffentlichen Personennahverkehrs, könnte aber einen erheblichen Beitrag zum Markthochlauf leisten. Baden-Württemberg bietet hierfür bereits eine technologieoffene Förderung der Investitions- und Betriebskosten emissionsfreier Busse an.

ÖKONOMISCHE UND FINANZIELLE HERAUSFORDERUNGEN UND LÖSUNGSANSÄTZE

Die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie und deren Anwendungen sind unter den aktuellen ordnungspolitischen Rahmenbedingungen oft noch nicht ökonomisch wettbewerbsfähig, was sich auch in der im

Rahmen der Studie durchgeführten Umfrage bestätigt: 40% der Umfrageteilnehmer sehen die mangelnde Wirtschaftlichkeit des Geschäftsmodells als signifikantestes Hemmnis für die weitere Marktentwicklung an. Dies hat eine Vielzahl von Gründen: Zunächst werden die meisten Produkte noch in Kleinserien produziert oder befinden sich in noch früheren Entwicklungsstadien. Lediglich 8% der Umfrageteilnehmer gaben an, dass ihr Produkt in hohen Stückzahlen in Serienfertigung kommerziell verfügbar sei. Die fehlende Skalierung und Kommerzialisierung hemmt derzeit noch die Realisierung von Kostensenkungspotenzialen, die aber entlang der gesamten Wertschöpfungskette in signifikantem Maß vorhanden sind (vgl. Kap. 2.2). Mit zunehmendem Markthochlauf wird jedoch mit erheblichen Kostenreduktionen gerechnet. Des Weiteren wirken sich auch die im vorherigen Abschnitt genannten Hürden negativ auf die Wirtschaftlichkeit von Geschäftsmodellen im Bereich Power-to-X aus.

Darüber hinaus ist, trotz des hohen technologischen Reifegrads vieler Anwendungen, der Mangel an im Markt verfügbaren Produkten ein signifikantes Hemmnis für die weitere Marktentwicklung. Insbesondere im Markt für mobile Endanwendungen sorgt dies dafür, dass von staatlicher Seite zur Verfügung gestellte Förderungen, z.B. im Bereich der Beschaffung, von eingeschränkter Wirkung bleiben. Städte und Kommunen, die sich mit der Beschaffung von Bussen oder anderen Nutzfahrzeugen auf Wasserstoffbasis auseinandersetzen, stehen vor der Herausforderung, dass es derzeit kaum Fahrzeughersteller gibt, die serienmäßig bzw. in ausreichender Stückzahl Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge produzieren und auf dem europäischen Markt zur Verfügung stellen. Auch für private Nutzer sind keine Brennstoffzellen-Pkw aus baden-württembergischer oder deutscher Herstellung und nur in sehr begrenzter Anzahl von asiatischen Herstellern verfügbar. Der von

Daimler produzierte Mercedes GLC F-Cell, der einzige derzeit verfügbare Brennstoffzellen-Pkw eines deutschen Herstellers, wird nur in Kleinserie produziert und für ausgewählte Kunden in einem Mietmodell angeboten. Die zunehmende Fokussierung auf die Batterietechnologie im Pkw- und in weiteren Fahrzeugsegmenten, insbesondere der deutschen Fahrzeughersteller, erschwert daher einen Markthochlauf für Brennstoffzellen-Fahrzeuge aus europäischer Produktion mit entsprechenden Rückwirkungen auf die heimische Zulieferindustrie. Jedoch ist der Aufbau eines europäischen Marktes essenziell, um lokal möglichst hohe Wertschöpfung generieren zu können und bei zunehmender Kommerzialisierung von Skaleneffekten zu profitieren. Werden Skaleneffekte nur in anderen Regionen der Welt realisiert, mindert dies zusätzlich die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der baden-württembergischen bzw. deutschen Brennstoffzellenindustrie. Daher müssen sowohl das Produktportfolio als auch die Produktverfügbarkeit weiter erhöht werden.

Des Weiteren wird vielfach die mangelnde Tankstelleninfrastruktur als Hemmnis für einen Markthochlauf im Transportbereich genannt. Bisher gibt es in Deutschland 75 Wasserstoff-Tankstellen, Baden-Württemberg liegt hierbei auf Platz drei mit zwölf Tankstellen, hinter Nordrhein-Westfalen und Bayern. Bis 2020 ist die Inbetriebnahme von 100 Tankstellen geplant. Im Vergleich mit den rund 14.500 Benzin- und Dieseltankstellen und den rund 16.600 Ladestationen für Elektroautos ist die Wasserstoff-Infrastruktur noch am geringsten ausgebaut und weit von einem flächendeckenden Angebot entfernt. Trotz der staatlichen Zuschüsse lassen sich Wasserstoff-Tankstellen aufgrund der geringen Zahl an Brennstoffzellen-Fahrzeugen derzeit noch nicht wirtschaftlich betreiben. Die fehlenden Tankstellen behindern im Gegenzug auch eine positive Nachfrageentwicklung im Fahrzeugmarkt. Gleichzeitig verhindert die

schwache Nachfrageentwicklung einen schnelleren bzw. umfangreicheren Ausbau des Tankstellennetzes. Dieser Kreislauf ist bisher noch nicht vollständig durchbrochen worden.

Darüber hinaus ist Wasserstoff als Treibstoff in Deutschland für mobile Anwendungen wie Pkw oder Busse oder Lkw im Schwerlastbereich preislich noch nicht wettbewerbsfähig. Wird Wasserstoff als Nebenprodukt gewonnen oder konventionell erzeugt, ist er nicht CO₂-frei, wird er mittels Elektrolyse aus regenerativem Strom gewonnen, führen die hohen Stromkosten zu hohen Herstellungskosten. Dies führt zu einem deutlich höheren Treibstoffpreis pro gefahrenem Kilometer für den Endanwender für Wasserstoff als für ein konventionelles Diesel- oder Benzinerahrzeug oder auch ein Batteriefahrzeug. Verbunden mit den signifikant höheren Anschaffungskosten für ein Brennstoffzellen-Fahrzeug fällt die Kaufentscheidung derzeit oft negativ für die Brennstoffzelle aus. Allerdings sollten zukünftig die ganzheitlichen Systemkosten hierbei berücksichtigt werden.

Zudem wurden auch fehlende Finanzierungsmöglichkeiten für Investitionen unter den Umfrageteilnehmern aus der Brennstoffzellen-Industrie als Entwicklungshemmnis genannt. Obwohl fehlende Finanzierung mit einer durchschnittlichen Bewertung von 2,9 nur auf Platz sechs der größten Herausforderungen liegt, muss für eine ganzheitliche Bewertung auch die Nachfrageseite in Betracht gezogen werden. In einer Umfrage des FCH JU unter Städten und Kommunen zu den größten Herausforderungen für den Einsatz von Wasserstoff-Anwendungen wurde fehlende Finanzierung mit einem Durchschnitt von 4,2 als signifikantestes Hemmnis bewertet, noch vor der mangelnden Wirtschaftlichkeit der Geschäftsmodelle (FCH 2 JU, 2018b). Dies zeigt, dass eine Förderung der Nachfrageseite, insbesondere im Be-

reich der Einsatzfinanzierung und Projektumsetzung, und ein zuträglicher ordnungspolitischer Rahmen auf allen Ebenen von vorrangiger Bedeutung für die weitere Marktentwicklung ist. Darüber hinaus stärken dezidierte Anreize oder Regulierungen für Industrieinvestitionen im Brennstoffzellenbereich die Angebotsseite. Angrenzende Sektoren, wie z.B. die Produktion von erneuerbaren Energien, profitieren bereits seit Jahren von Finanzierungsinstrumenten, die in der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie derzeit noch fehlen oder hier nur sehr eingeschränkt verfügbar sind, wie z.B. öffentliche Aufträge, Public-Private-Partnerships oder Einspeisevergütungen. Die Schließung dieser Lücke und die Implementierung langfristiger, risiko-reduzierender und speziell für den Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor bestimmten Finanzierungsinstrumente könnte zu ähnlichen Erfolgen wie in den angrenzenden Sektoren führen. Bessere Koordination zwischen verschiedenen Förderprogrammen und vereinfachte Verfahren zur Bewilligung der Förderung können die Finanzierung kommunaler Projekte weiter vereinfachen. Darüber hinaus ist die Beteiligung privater Finanzierung für einen Markthochlauf unerlässlich, da die öffentliche Hand das benötigte Fördervolumen für einen großflächigen Rollout der Technologie nicht alleine stemmen kann.

TECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN UND LÖSUNGSANSÄTZE

Die technologische Reife von Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen wird unter den Umfrageteilnehmern mehrheitlich nicht als signifikantes Hemmnis wahrgenommen. Viele Endanwendungen sind heute schon technologisch ausgereift, weitreichend getestet und bereits über Jahre hinweg im Regelbetrieb im Einsatz. Insbesondere Pkw, Gabelstapler und Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) für Wohnhäuser ge-

hören zu den weit ausgereiften Anwendungen, die bereits (in Kleinserien) kommerziell verfügbar sind, gefolgt von Bussen, Notstromaggregaten, industriellen KWK-Anlagen, verschiedenen Netzdienstleistungen und Elektrolyseuren. Dennoch gibt es viele mögliche Anwendungsbereiche für Wasserstoff und Brennstoffzellen, in denen bislang keine vergleichbare Erfahrung vorliegt und die sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden. Hierzu zählen beispielsweise Züge, Abfallentsorgungsfahrzeuge und Lieferfahrzeuge, aber auch Schwerlast-Lkw sowie im sehr frühen Stadium Flugzeuge und Schiffe. Insbesondere in mobilen Anwendungen sind Brennstoffzellen extremer Belastung ausgesetzt, die bei der Entwicklung neuer Brennstoffzellen-Fahrzeuge intensiv geprüft und getestet werden muss, um in Zukunft eine ähnliche Robustheit zu erzielen wie die eines herkömmlichen Dieselmotors.

Infrastrukturell bleibt die Herausforderung bestehen, dass Wasserstoff je nach Nutzung in Pkw, Lkw oder Bussen in unterschiedlichen Drücken an Tankstellen vorgehalten werden muss. Für etwaige Anwendungen im Fernlastverkehr muss zusätzlich noch das Tanken flüssigen Wasserstoffs in Betracht gezogen werden, da flüssiger Wasserstoff mit einem geringeren Volumen größere Reichweiten bei gleichem Tankvolumen ermöglicht. Hierzu müssen teilweise noch technische Konzepte und Voraussetzungen geschaffen werden (z.B. entsprechende Tankprotokolle). Zudem muss der weitere Ausbau der Infrastruktur vorangetrieben werden. Auch bei Anwendungen im Power-to-Gas Bereich gibt es noch Herausforderungen, die vor einem Markthochlauf gemeistert werden müssen, wie beispielsweise die Regelung des Transports von größeren Mengen Wasserstoff in bestehenden Erdgasleitungen. Wasserstoff kann derzeit nur begrenzt in das Erdgasnetz eingespeist werden, da es sich in der chemischen Zusammensetzung von Erdgas unterscheidet und dadurch Auswirkungen auf

angeschlossene Erdgasanwendungen haben könnte. Grundsätzlich muss auch die Frage beantwortet werden, ob eigenständige Wasserstoffnetze sinnvoll wären, um diese schwankenden Zusammensetzungen der Gase zu vermeiden.

Neben der Weiterentwicklung der Anwendungen, die noch keinen kommerziellen Reifegrad erreicht haben, sowie der damit verbundenen Infrastruktur ist auch die Weiterentwicklung der Produktionsanlagen eine technische Herausforderung, die insbesondere bei einem Übergang zur Serienproduktion zunehmende Relevanz hat. Derzeitige Fertigungstechniken sind noch auf die Produktion von niedrigen Stückzahlen ausgelegt und nur wenige Unternehmen haben sich schon mit einer zunehmenden Skalierung ihrer Produktion beschäftigt. Zum Beispiel stellen sich auf dem Weg zur Industrialisierung von Prozessen zur Produktion von Brennstoffzellen-Stacks noch Herausforderungen im Bereich des Ablegens und Stapelns der einzelnen Zellen bei hoher Taktfrequenz sowie geeigneter Qualitätssicherungsverfahren. Komponenten und Prozesse müssen für eine Serienproduktion angepasst werden, was weiterer Investitionen und Entwicklungsanstrengungen aufseiten der Zulieferer bedarf.

Demgegenüber ist herauszustellen, dass auch bei der flächendeckenden Etablierung von Anwendungen der Batterietechnologie noch wesentliche Herausforderungen zu adressieren sind, die in einigen Bereichen noch einer grundsätzlichen Lösung bedürfen. Der weitaus höhere Bedarf von kritischen Rohstoffen für die Batterieproduktion im Vergleich zu Brennstoffzellen-Systemen stellt hierbei ebenso einen Aspekt dar wie die laufenden Forschungen zu neuen Batterietypen und einigen technischen Herausforderungen bei Batteriesystemen. Wie bereits dargestellt, existieren daneben signifikante Herausforderungen hinsichtlich der infrastrukturellen Vor-

aussetzungen einer Elektrifizierung aller Energieverbrauchssektoren allein durch Strom und Batterien: Die Anforderungen an den Ausbau von Stromerzeugungskapazitäten, Stromnetzen und Ladeinfrastruktur wären enorm und mit hohen Kosten verbunden.

GESELLSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN UND LÖSUNGSANSÄTZE

Eine weitere Herausforderung, die sowohl in der Umfrage als auch unter den interviewten Expertinnen und Experten genannt wurde, ist die mangelnde Präsenz der Technologie in der Öffentlichkeit. Immerhin 30% der Umfrageteilnehmer bewerteten die mangelnde Akzeptanz der Endkunden mit einer 4 oder 5 auf der Skala als signifikantes Hemmnis. Als Gründe für eine mangelnde Akzeptanz wurden in den Interviews sowohl fehlendes Wissen über die Technologie und deren sichere und langfristig erprobte Anwendung genannt als auch die fehlende Berichterstattung über die Technologie in überregionalen Medien. Wasserstoff wird oftmals noch als gefährliches und explosives Gas gesehen, obwohl z.B. von Fahrzeugen mit Wasserstofftank keine höhere Gefahr ausgeht als von Benzin- oder Erdgasfahrzeugen. Weitere Aufklärungsarbeit vonseiten der Politik und der Industrie ist notwendig, um die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie als sichere, zuverlässige und umweltschonende Alternative am Markt zu etablieren.

Daneben benötigen beispielsweise Städte und Kommunen sowie Verkehrsbetriebe im ÖPNV oder andere Anwender zusätzliches und spezifisches Know-how, um die Umstellung des Betriebsablaufs von konventionellen auf alternative Anwendungen mit Wasserstoff meistern zu können. In der für das FCH JU durchgeführten Umfrage unter europäischen Städten und Kommunen gaben 64% der Umfrageteilnehmer an, bisher noch keine Erfahrung mit der Implementierung von Wasser-

stoff-Anwendungen zu haben (FCH 2 JU, 2018b). Daher ist der Know-how-Transfer bis auf die Ebene der Endanwender essenziell für den Markthochlauf, um bestehende Vorbehalte und Wissenslücken abzubauen. Lokale Projekte mit Brennstoffzellen-Anwendungen erhöhen dabei die Sichtbarkeit der Technologie und können daher auch zu einer größeren Akzeptanz beitragen.

Handlungsempfehlungen





Für die Realisierung der im Rahmen dieser Studie dargestellten wirtschaftlichen und weiteren Potenziale der Technologie sind unmittelbar und in den nächsten Jahren zielgerichtete Maßnahmen aller relevanten Stakeholder notwendig. Hierbei müssen die Angebots- wie die Nachfrageseite im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen so entwickelt werden, dass mittelfristig ein signifikanter Markt für die Technologie entstehen und deren Kommerzialisierung erreicht werden kann. Diese Ziele und die im Folgenden beschriebenen Handlungsempfehlungen sollten auch Berücksichtigung in der angekündigten nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung finden, um die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Deutschland auf Bundes- und Länderebene optimal zu fördern.

Um diese Ziele zu erreichen und wirtschaftliche Potenziale für Baden-Württemberg zu realisieren, darf mit der Umsetzung entsprechender Maßnahmen und weiteren Investitionen in die Technologie nicht gewartet werden – vielmehr werden die nächsten zwei bis fünf Jahre entscheidend dafür sein, welche Rolle der Standort Baden-Württemberg im zukünftig entstehenden Weltmarkt für Wasserstoff und Brennstoffzellen spielen wird. Bereits heute besteht eine wachsende Nachfrage nach Produkten der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie, die in Europa nicht vollständig durch auf dem Markt verfügbare Produkte gedeckt werden kann (vgl. auch die Ergebnisse der Regionen-Initiative der FCH JU: FCH 2 JU, 2018b). Wie in Kap. 3 beschrieben, wird darüber hinaus in den nächsten Jahren bis 2030 ein kontinuierliches Wachstum des Marktes für Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen erwartet, der für Unternehmen zunehmend kommerziell relevant wird. Regierungen, Unternehmen und relevante Kunden in den weltweiten Leitmärkten sind sich einig, dass diese globale Marktentwicklung in den nächsten Jahren stattfinden wird – offen ist dabei aus heutiger Perspektive, welche

Rolle der Standort Baden-Württemberg zukünftig dabei spielen wird.

Nur wenn bereits heute weiter in Forschung und Entwicklung, Ausbau des Produktportfolios der lokalen Unternehmen sowie den Ausbau von Produktionskapazitäten investiert wird, kann die weltweit steigende Nachfrage nach Wasserstoff und Brennstoffzellen auch aus Baden-Württemberg bedient werden. Gleichzeitig werden dadurch die Voraussetzungen dafür geschaffen, dass baden-württembergische Unternehmen über die Kompetenzen und Kapazitäten verfügen, um am zukünftigen globalen Markt zu partizipieren und mit der internationalen Konkurrenz, die weiter in die Technologie investiert, auf Augenhöhe zu agieren. Der Ausbau der Förderung bestehender Aktivitäten und der weitere Ausbau der lokalen Kompetenzen im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen sind dabei aus Sicht der Studie wichtig für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit des Technologie- und Industriestandorts Baden-Württemberg.

Das Beispiel der Batteriefertigung zeigt dabei eindrücklich, welche Folgen es hat, wenn Investitionen in innovative Technologien ausbleiben und europäische Unternehmen die eigenen vorhandenen Kompetenzen nicht weiterentwickeln – internationale Konkurrenten übernehmen den Markt, erreichen einen deutlichen Entwicklungsvorsprung und bauen Produktionskapazitäten so auf, dass sie den Weltmarkt dominieren. Heute wird als Reaktion auf diese Entwicklung versucht, den Vorsprung der internationalen Konkurrenz durch massive Investitionen und politische Interventionen einzuholen – ob diese Bemühungen zum Erfolg führen werden, ist derzeit noch völlig offen. Vor diesem Hintergrund empfiehlt sich aus unserer Sicht eine aktive Positionierung der Landesregierung und der regionalen Stakeholder zum Thema Wasserstoff und Brennstoffzellen, um Baden-Württemberg als führenden Industrie-

standort in diesem Bereich und wichtigen Motor der weiteren Marktentwicklung in Europa und darüber hinaus zu positionieren.

Vergleichende Studien zu Regulierungs- und Incentivierungsrahmen für die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie im internationalen Vergleich (Roland Berger, 2018) haben dabei gezeigt, dass es eines ganzheitlichen Ansatzes mit gezielten Fördermaßnahmen für die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie bedarf, um spezifisch deren Entwicklung voranzutreiben. Ganzheitliche Entwicklungsstrategien für den Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich sind bislang jedoch erst in Ansätzen vorhanden²³ und insbesondere im Mobilitätsbereich konzentrieren sich die heutigen Diskussionen und auch Fördermaßnahmen relativ einseitig auf batterieelektrische Fahrzeuge. Die in dieser Studie vorgestellten Ergebnisse und die im Rahmen der Studie erfolgten Hintergrundinterviews zeigen jedoch, dass beide Technologien nicht als in Konkurrenz zueinanderstehend betrachtet werden sollten, sondern komplementär in verschiedenen Anwendungsfällen Vorteile bieten und entsprechend gefördert und eingesetzt werden sollten. Weiterhin sollte auch aus Gründen der Risikodiversifizierung eine zu einseitige Förderung der Batterietechnologie vermieden werden. Gleichzeitig können heute am Standort bestehende Kompetenzen genutzt und wirtschaftliche Potenziale für die baden-württembergische Industrie durch weitere Investitionen in die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie realisiert werden. Daher sollte es industriepolitisches Ziel sein, die baden-württembergische Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie so zu positionieren und zu fördern, dass sie an einem zukünftigen globalen Markthochlauf gewinnbringend partizipieren kann.

Wir sehen dabei für die Landesregierung und die regionalen Stakeholder aus Industrie, Forschung und Nutzerseite vor allem die folgenden Handlungsbedarfe:

1. ENTWICKLUNG EINER H₂-ROADMAP FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG

Um sich als führender Standort im Bereich von Wasserstoff und Brennstoffzellen zu etablieren, benötigt Baden-Württemberg einen klaren Fahrplan für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft im eigenen Land. Hiermit kann Baden-Württemberg nicht nur einen wichtigen Beitrag zur weiteren Marktentwicklung leisten, sondern sich international als wichtiger Standort der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie präsentieren und seine in diesem Bereich tätigen Unternehmen entsprechend positionieren. Daneben bietet die Entwicklung einer Roadmap mit konkreten Zielen und Maßnahmen Planungssicherheit für Unternehmen und weitere Stakeholder, unterstreicht nach außen das Commitment der baden-württembergischen Entscheider und erhöht zudem die Sichtbarkeit der Technologie.

Wichtig bei der Entwicklung der Roadmap ist aus Sicht der Studie, dass sich diese klar auf konkrete Zielsetzungen (zeitlich und inhaltlich), die Festlegung von Maßnahmen (inkl. Finanzierung) zu deren Erreichung und konkrete Beiträge aller beteiligten Stakeholder festlegt; grundsätzliche strategische Überlegungen oder politische Absichtserklärungen sollten nicht im Fokus stehen. Daneben sollten alle relevanten Dimensionen des Aufbaus einer lokalen Wasserstoffwirtschaft berücksichtigt werden (Produktion, Infrastruktur, Anwendungen). Für die Definition der Ziele und Schwerpunktsetzungen der Roadmap ist auch eine Bezugnahme auf wichtige andere Bundesländer sowie auf die angekündigte nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung sinnvoll.

²³ Vgl. die Bestrebungen verschiedener deutscher Bundesländer sowie der Bundesregierung, verschiedene Wasserstoffstrategien zu etablieren.

Abbildung 50**Handlungsempfehlungen im Überblick**

- 1** Entwicklung einer H₂-Roadmap für Baden-Württemberg
- 2** Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit lokaler "H₂-Champions"
- 3** Förderung von lokalen "H₂-Projekten als Schaufenster für die Welt"

Beteiligung und Eigeninitiative aller Stakeholder essenziell für Erfolg:

- Politik/Landesregierung
- Unternehmen
- Städte und Kommunen
- ÖPNV Betreiber
- Projektentwickler
- Privatkunden
- Forschung

Quelle: Roland Berger

Die Roadmap sollte die folgenden Elemente enthalten:

- Klar definierte und mit konkreten Zahlen hinterlegte Ziele für Entwicklung des Sektors auf Angebots- und Nachfrageseite (z.B. xx MW installierte Elektrolyseur-Kapazität bis 20xx, yy Tankstellen im Betrieb bis 20xx, zz Brennstoffzellen-Fahrzeuge im Einsatz bis 20xx)
- Identifikation wesentlicher umzusetzender Schritte und konkreter Maßnahmen, um die formulierten Ziele zu erreichen (z.B. Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen, Förderungs- und Finanzierungsmaßnahmen, konkrete Projektentwicklungen)

- Festlegung der hierzu zu leistenden Beiträge aller wesentlichen Stakeholder-Gruppen (Landesregierung, Unternehmen, Forschung, Städte und Kommunen, Verbände, Projektentwickler, Energieversorger etc.)
- Eine gemeinsame Erklärung aller beteiligten Stakeholder als gemeinsame Verpflichtung auf die Umsetzung der gemeinsam gesetzten Ziele und festgelegten Maßnahmen

Die Roadmap sollte dabei auch in den Blick nehmen, wie der Wasserstoffbedarf in Baden-Württemberg vor allem mittel- bis langfristig gedeckt werden kann. Aus

Sicht aller lokalen Experten ist das lokale Produktionspotenzial begrenzt und es wird absehbar Wasserstoff in signifikanten Mengen importiert werden müssen. Hierfür sind zum einen infrastrukturelle Voraussetzungen zu schaffen, zum anderen sind möglicherweise "Energiepartnerschaften" o.Ä. mit Regionen zu entwickeln, in denen "grüner" Wasserstoff in großen Mengen und kostengünstig hergestellt und von dort importiert werden kann.

Die Erarbeitung der lokalen Roadmap sollte in einem intensiven Dialogprozess unter aktiver Beteiligung aller relevanten lokalen Stakeholder in mehreren übergreifenden Konferenzen und durch Arbeitsgruppen zu verschiedenen Themenbereichen erfolgen. Die gemeinsam erarbeiteten Ziele, Maßnahmen und Beiträge der einzelnen Stakeholder sollten in einem gemeinsamen "Memorandum of Understanding" bzw. "Letter of Intent" festgehalten und von allen beteiligten Stakeholdern unterschrieben werden, um ihnen Verbindlichkeit zu verleihen. An der Entwicklung der Roadmap sollten alle wesentlichen Stakeholder (Landesregierung, Unternehmen, Verbände, Energieversorger, Kommunen und weitere relevante öffentliche Stellen, wie z.B. ÖPNV-Betreiber) beteiligt werden. Der Erfolg des Dialogprozesses hängt dabei wesentlich von der aktiven Beteiligung der wesentlichen Stakeholder, vor allem auf Unternehmensseite, und vom gemeinsamen Willen aller Beteiligten zur Festlegung einer gemeinsamen Roadmap für Baden-Württemberg ab.

Der Dialogprozess sollte zentral mit klarer Verantwortlichkeit koordiniert und vorangetrieben werden. Zudem sollte von Beginn an ein klarer Arbeitsplan mit konkreten terminlichen Zielen definiert werden, um den Dialogprozess stringent durchführen und innerhalb von ca. sechs Monaten zu einem konkreten Ergebnis bringen zu können. Das Cluster Brennstoffzelle bei e-mobil Baden-Württemberg und der Strategiedialog

Automobilwirtschaft können hierfür als Grundlage dienen. Ein weiteres Beispiel ist die im Jahr 2013 aufgesetzte Smart-Grids-Plattform Baden-Württemberg, auf deren Basis im Anschluss an den Dialogprozess ein eigenständiger Verein entstand.

Zur grundsätzlichen Strukturierung der Roadmap könnte beispielsweise ein vergleichbarer Ansatz gewählt werden, wie ihn e-mobil BW in Bezug auf den Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur in Baden-Württemberg 2013 skizziert hat, unter Erweiterung der Roadmap um die weiteren relevanten Bereiche sowie eine angepasste Zeitplanung:

Phase 1 – Demonstrationsphase (parallel zu den anderen Phasen nur dort, wo in ausgewählten Bereichen noch notwendig, z.B. Fahren oder Spezialfahrzeuge)

Phase 2 – Marktvorbereitungsphase (ab 2020)

Phase 3 – Markthochlauf (ab 2025)

Alle Phasen sollten mit konkreten Zielen und Projekten zur Realisierung, dafür notwendigen Maßnahmen und Stakeholder-Beiträgen hinterlegt sein, die einerseits ambitioniert, andererseits aber auch erreichbar sind. Dabei ist unter anderem zu prüfen, ob das in der Vergangenheit formulierte Ziel einer Anzahl von 100.000 bis 175.000 Pkw und leichten Nutzfahrzeugen im Betrieb in Baden-Württemberg bis 2030 im Licht der aktuellen Marktentwicklung noch aufrechterhalten werden kann; dies scheint aus aktueller Perspektive nicht mehr realistisch.

2. STÄRKUNG DER WETTBEWERBSFÄHIGKEIT LOKALER "H₂-CHAMPIONS"

Ergänzend zur Formulierung einer H₂-Roadmap für das Land zur Unterstützung der lokalen Marktentwicklung sollten Maßnahmen ergriffen werden, um die heute bereits stark positionierte baden-württembergische Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie wettbewerbsfähig für die Zukunft aufzustellen und bestmöglich bei der Realisierung zukünftiger globaler Marktpotenziale zu unterstützen. Insbesondere sollten dabei die Erschließung und der Ausbau internationaler Märkte gefördert werden, was zudem bestehende Abhängigkeiten der baden-württembergischen Zulieferindustrie von lokalen OEMs reduzieren wird. Die Maßnahmen sollten sich dabei darauf konzentrieren, bestehende Stärken weiter auszubauen und gezielt zu fördern und Schwächen bzw. Bereiche, in denen die lokale Industrie bislang nicht so stark positioniert ist, durch gezielte Kooperationen (bspw. mit anderen Bundesländern wie Bayern) auszugleichen und dieses gebündelte Know-how auf dem Weltmarkt als integrierte Wertschöpfungskette zu vermarkten.

Aufgrund der bestehenden Wirtschaftsstruktur und der vorhandenen Schwerpunktaktivitäten der Unternehmen empfiehlt sich für Baden-Württemberg eine Konzentration auf Mobilitätsanwendungen über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg sowie die Nutzung vorhandener Kompetenzen im Mobilitätssegment für die Ausweitung des Angebotsportfolios für weitere H₂-Anwendungsbereiche, vor allem im Bereich der Komponenten- und Teilsystemherstellung. Die Förderung des Aufbaus von Kompetenzen in bislang nicht repräsentierten Marktsegmenten mit Mitteln der Landesregierung (wie dies bspw. derzeit auf nationaler Ebene im Bereich der Batteriefertigung geplant ist; hier vor allem bzgl. des Baus von H₂-Produktionsanlagen)

erscheint vor dem Hintergrund bereits etablierter Unternehmen aus anderen Bundesländern in diesen Segmenten nicht zielführend.

Im Einzelnen ergeben sich aus Sicht der Studie die folgenden Maßnahmen zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit baden-württembergischer Unternehmen:

- Förderung anwendungsbezogener Kooperationsforschung zwischen regionalen Forschungsinstitutionen und Industrie bzw. mehreren Unternehmen zur Erreichung kommerzieller Produktreife und Schaffung von Voraussetzungen für die zukünftige Serienproduktion, wie aktuell bspw. im Projekt HyFab geplant
- Förderung des Ausbaus von Prüfstand- und Testkapazitäten an Forschungsinstitutionen zur Nutzung durch lokale Unternehmen, um erwarteten Engpässen in diesem Bereich in der kritischen Phase der Marktvorbereitung entgegenzuwirken, z.B. im Rahmen des Projekts HyFab
- Förderung des Wissens- und Technologie-Know-how-Transfers aus bestehenden Projekten, von Forschungseinrichtungen und im Sektor bereits erfahrenen Unternehmen hin zu weiteren, bislang noch nicht im Sektor aktiven Unternehmen, für die hier aber erhebliche zukünftige Potenziale bestehen (z.B. im Maschinenbau, in weiteren Unternehmen der automobilen Zulieferindustrie etc.). Insbesondere die im Rahmen des Projekts HyFab zukünftig gesammelten Erfahrungen zur Serienfertigung von Brennstoffzellen-Systemen sollten interessierten Unternehmen zugänglich und diese damit für die Zukunft wettbewerbsfähig aufgestellt werden.
- Förderung oder vorteilhafte Finanzierungsunterstützung für Unternehmensinvestitionen in den Auf- und Ausbau von Kompetenzen und Kapazitäten im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen.

Dafür Schaffung eines engen Austauschs zwischen Unternehmen, möglichen Finanzierern (wie Haus- oder Landesbanken) und dem Land Baden-Württemberg zur Unterstützung und Informationsweitergabe

- Etablierung eines gemeinsamen Vermarktungsansatzes und Außenauftritts der baden-württembergischen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie mit Fokus auf den Bereich Mobilitätsanwendungen im Sinne der Präsentation und Vermarktung einer integrierten Wertschöpfungskette (vergleichbar mit den Aktivitäten der Landesagentur Umwelttechnik BW und des Portals für Umwelttechnik und Ressourcenffizienz Baden-Württemberg)
- Schaffung von weiteren Unterstützungsangeboten für Unternehmen, z.B. Beratungsangebote für den generellen Markteintritt bzw. den Eintritt in spezifische Einzelmärkte weltweit, Beratungsangebote für die Projektrealisierung zum Einsatz von Wasserstoff-Anwendungen (z.B. in Fahrzeugflotten) sowie Weiterbildungs- und Qualifizierungsangeboten für Mitarbeiter

Die Umsetzung der hier genannten Maßnahmen sollte koordiniert durch eine zentrale Stelle erfolgen, etwa durch die Schaffung eines "Kompetenzzentrums H₂ Baden-Württemberg", das als Anlaufstelle für Unternehmen dienen und Förder- und Unterstützungsangebote konzipieren und anbieten sollte.

3. FÖRDERUNG VON LOKALEN "H₂-PROJEKTEN ALS SCHAUFENSTER FÜR DIE WELT"

Für die Erreichung der Ziele einer zu definierenden H₂-Roadmap sollte die Umsetzung entsprechender konkreter Implementierungsprojekte gefördert werden. Hierbei sollten bereits heute marktreife Wasserstoff-Anwendungen in größeren Volumina im Dauerbetrieb (als wirklicher Ersatz bisher genutzter konventioneller Technologien) zum Einsatz gebracht werden, z.B. Pkws, Busse, Züge oder Anlagen zur stationären Energieerzeugung. Hierzu sind nicht nur Finanzierungsmittel in entsprechendem Umfang, sondern teilweise auch eine Anpassung von Förderrichtlinien hin zur Unterstützung der Marktaktivierung und Kommerzialisierung notwendig.

Auf europäischer (durch den FCH JU Call zu "Hydrogen Valleys") sowie nationaler Ebene (durch die NOW-Förderung "HyLand – Wasserstoffregionen in Deutschland") kommen derzeit verstärkt Ansätze zum Einsatz, die den Aufbau lokaler Wasserstoff-Ökosysteme als Nukleus einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft etablieren wollen. Innerhalb solcher Ansätze soll die gesamte H₂-Wertschöpfungskette abgebildet und verschiedene Wasserstoff-Anwendungen in größerem Umfang zum Einsatz gebracht werden. Auch verschiedene baden-württembergische Akteure und Regionen beschäftigen sich derzeit mit der Entwicklung und Umsetzung solcher Konzepte.

Diese Ansätze sollten durch die Landesregierung gezielt gefördert werden. Die Realisierung von "H₂-Regionen" in Baden-Württemberg sollte die wichtige Rolle illustrieren, die Wasserstoff zukünftig im Energiesystem durch Sektorenkopplung und für die lokale Energiewende spielen kann. Daneben sollten lokale Projekte in Zusammenarbeit mit der heimischen Industrie als

Schaufenster für lokale Produkte und technologisches Know-how dienen und damit einen Beitrag zur Positionierung baden-württembergischer Unternehmen auf dem Weltmarkt leisten.

Dabei empfiehlt sich ein Ansatz, bei dem in einer H₂-Region große Ankerprojekte (bei denen per se große Mengen Wasserstoff umgesetzt werden, z.B. eine Kombination aus Nutzung von Wasserstoff als Industrierohstoff sowie Einsatz von Wasserstoff für den Betrieb von Zügen oder Busflotten) als Ausgangspunkt dienen, um dann weitere Anwendungsprojekte vor Ort zu realisieren. Durch ein solches lokales Wasserstoff-Ökosystem können Synergieeffekte genutzt und z.B. Business Cases für Produktions- und Tankstellenanlagen verbessert werden. Insbesondere werden dabei auch der Reifegrad und die Anwendbarkeit der Technologie demonstriert, was für eine steigende Sichtbarkeit und Akzeptanz in der Bevölkerung von enormer Bedeutung ist. Durch den aktuellen Fokus der baden-württembergischen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie empfehlen sich vor allem Projekte im Mobilitätsbereich für die Realisierung von "H₂-Regionen" (z.B. Züge, Busse, leichte und schwere Nutzfahrzeuge, Pkw sowie die hierzu benötigte Infrastruktur). Daneben kann die Nutzung von "grünem" Wasserstoff in der Industrie oder die dezentrale Energieerzeugung mit Brennstoffzellen in Baden-Württemberg zur Anwendung kommen. Beispiele solcher ambitionierten Projektideen, die für eine signifikante Ausweitung der Förderung der Marktentwicklung stehen und als Orientierung dienen können, wurden beispielsweise im Rahmen der europäischen Initiative "Hydrogen4Climate" formuliert bzw. werden bereits im Rahmen der nationalen Initiative HyLand gefördert.

Gleichzeitig stellen der ÖPNV (auf Straße und Schiene) sowie die Umstellung des Landesfuhrparks auf alternative Antriebe wichtige Bereiche dar, in denen durch ge-

zielte Investitionen der öffentlichen Hand in den nächsten Jahren das Marktwachstum unterstützt werden kann.

ROLLE DER LOKALEN STAKEHOLDER

Wie bereits dargestellt, sind für die Umsetzung der genannten Maßnahmen in allen erwähnten Handlungsfeldern die Beiträge aller relevanten Stakeholder in Baden-Württemberg notwendig. Nur wenn alle Beteiligten bereit sind, langfristig in die Entwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg zu investieren, können wirtschaftliche Potenziale gehoben und ein Beitrag zur zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit des Standorts geleistet werden. Für die zentralen Stakeholder-Gruppen ergeben sich dabei vor allem die folgenden Handlungsbedarfe:

- **Politik und Landesregierung:** Erklärtes Ziel der Landesregierung muss es sein, die notwendigen Rahmenbedingungen zu schaffen, um Baden-Württemberg zukünftig als einen der führenden Standorte der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie zu erhalten. Hierfür ist der Einsatz der Landesregierung vor allem für einen förderlichen regulatorischen Rahmen, insbesondere über eine angemessene CO₂-Bepreisung für fossile Energieträger, Förderprogramme und Finanzierungsmaßnahmen, die Koordinierung des vorgeschlagenen Dialogprozesses sowie für die Unterstützung bei der Umsetzung der vorgeschlagenen Maßnahmen zur Unterstützung der lokalen Unternehmen erforderlich.
- **Unternehmen:** Die baden-württembergischen Unternehmen müssen weiter und in verstärktem Maße in ihre Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen investieren, ihr Produktportfolio weiterentwickeln und ausbauen, ausreichende Produktionskapazitäten aufbauen und damit ihren Beitrag zur Kommerzialisierung der Techno-

logie leisten. Für den Industriestandort insgesamt wird dabei vor allem die zukünftige Positionierung der ansässigen OEMs entscheidend sein, die eng mit der lokalen Zulieferindustrie verbunden sind – eine klare Positionierung der OEMs für die Technologie und Forcierung ihrer Aktivitäten in dem Bereich würde die Positionierung des Standorts Baden-Württemberg im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen entscheidend stärken.

→ **Städte und Kommunen/ÖPNV-Betreiber/Projektentwickler/Privatkunden:** Die Investitionsbereitschaft der lokalen Unternehmen kann nur dann gestärkt werden, wenn eine nachhaltige Nachfrage am Markt besteht. Potenzielle Kunden der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie müssen daher ebenfalls ihrerseits bereit sein, schon heute in die Technologie zu investieren und Produkte zu kaufen, auch wenn aktuell die Technologiekosten noch hoch sind und der Einsatz der Technologie bzw. die Entwicklung entsprechender Projekte noch komplex zu sein scheint. Insbesondere für die Realisierung lokaler H₂-Regionen ist das Engagement lokaler Abnehmer und Projektentwickler notwendig, um solche komplexen Projekte inkl. der hierfür notwendigen Finanzierung realisieren zu können.

→ **Forschung:** Die im Land ansässigen Forschungsinstitutionen müssen weiter zielgerichtet zur Entwicklung des Sektors beitragen. Sie sollten dabei ihre Aktivitäten auf die Erreichung der Serien- und Marktreife von Wasserstoff- und Brennstoffzellenkomponenten und -anwendungen legen und Gemeinschaftsforschungsprojekte mit der Industrie forcieren. Eine enge Abstimmung und Koordinierung von Forschungsaktivitäten im Bereich sollte angestrebt werden.

Aufbauend auf seiner breit aufgestellten Forschungs- und Unternehmenslandschaft, den über Jahre hinweg aufgebauten Technologiekompetenzen sowie seiner Innovationsfähigkeit, ist der Standort Baden-Württemberg heute gut positioniert, um vom zukünftig entstehenden globalen Markt für Wasserstoff und Brennstoffzellen nachhaltig zu profitieren – seine zukünftige Rolle in diesem Markt und die Erschließung vorhandener Potenziale hängt nun von der Bereitschaft der lokalen Stakeholder ab, weiter in die Technologie zu investieren und Baden-Württemberg auch zukünftig im globalen Wettbewerb als einen führenden Standort der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie zu etablieren.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: CO ₂ -Ausstoß und Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren	16	Abbildung 17: Prognostizierter jährlicher Absatz Brennstoffzellen-Fahrzeuge, 2030 und 2050	52
Abbildung 2: Die Rolle von Wasserstoff im Energiesystem der Zukunft	17	Abbildung 18: Ambitionen in Bezug auf den Brennstoffzellen-Fahrzeugbestand in Japan, China und Kalifornien bis 2030	53
Abbildung 3: Prognose Strommix 2050 für Deutschland und resultierender Speicherbedarf für Überkapazität	18	Abbildung 19: Einschätzung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktentwicklung bis 2050 im Rahmen der Online-Umfrage	54
Abbildung 4: Wasserstoff-Herstellungskosten im Vergleich	27	Abbildung 20: Erwartete Marktentwicklung verschiedener Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktsegmente im Rahmen der Online-Umfrage	55
Abbildung 5: Zusammensetzung der Wasserstoffkosten für aus Elektrolyse hergestellten Wasserstoff in Abhängigkeit vom Strompreis	28	Abbildung 21: Ranking verschiedener Regionen nach erwartetem Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktwachstum bis 2030 durch Teilnehmer der Online-Umfrage ...	56
Abbildung 6: Produktionskosten für "grünen" Wasserstoff aus Elektrolyse	29	Abbildung 22: Prognostizierter Wasserstoffbedarf in Europa in 2030 und 2050 nach Sektoren	59
Abbildung 7: Prognostizierte Entwicklung der Investitionskosten für Wasserstoff-Tankstellen bis 2030	31	Abbildung 23: Prognostizierte Umsätze und Arbeitsplätze in der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Europa 2030	60
Abbildung 8: Vergleich der kumulierten Investitionen für den notwendigen Infrastrukturaufbau	33	Abbildung 24: Benötigte Investitionen bis 2030 zum Aufbau der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Europa	61
Abbildung 9: Kostenprojektion von Brennstoffzellen-Systemen in Abhängigkeit der jährlichen Produktion am Beispiel eines 80-kW-Pkw mit technischer Performance, die 2020 voraussichtlich erreicht wird	34	Abbildung 25: Bewertung verschiedener Marktentwicklungsszenarien für 2030 im Mobilitäts- und Verkehrssektor durch Umfrageteilnehmer	62
Abbildung 10: TCO für verschiedene Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Mobilitätsanwendungen	35	Abbildung 26: Prognostizierte Entwicklung der Wasserstoffnachfrage in Deutschland bis 2030 und 2050 auf Basis des ambitionierten Szenarios des FCH JU	67
Abbildung 11: Vergleich der Gesamtbetriebskosten (TCO) für Diesel- und Brennstoffzellen-Lkw mit 18 t zGG 2015 und 2030	37	Abbildung 27: Überblick über aktuelle Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen in Baden-Württemberg	70
Abbildung 12: Vergleich der Gesamtbetriebskosten (TCO) für Diesel- und Brennstoffzellen-Abfallentsorgungsfahrzeuge 2015 und 2030	38	Abbildung 28: Auswahl international führender Unternehmen mit Sitz oder Standort in Baden-Württemberg, die im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen tätig sind	75
Abbildung 13: Kostenvergleich für verschiedene KWK-Anwendungen	39	Abbildung 29: Übersicht über die im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen tätigen Unternehmen mit Standorten in Baden-Württemberg.....	76
Abbildung 14: Politisches Engagement zur Unterstützung des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Marktes nach Anwendungen	46		
Abbildung 15: Prognostizierte Entwicklung der globalen Wasserstoffnachfrage	49		
Abbildung 16: Prognostizierte globale Wasserstoffmarktentwicklung in den Bereichen Umsatz und Investitionen	50		

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 30: Abdeckung verschiedener Stufen der Wertschöpfungskette für Wasserstoff und Brennstoffzellen durch Unternehmen in Baden-Württemberg	78	Abbildung 44: Umsätze entlang der Wertschöpfungskette und nach Sektoren in der Wasserstoff-Wirtschaft in Europa 2030	110
Abbildung 31: Entwicklungsstadium der Produkte und Aktivitäten der Unternehmen im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich	83	Abbildung 45: Systematik der Zuordnung der Wirtschaftszweige	111
Abbildung 32: Überblick über universitäre und außeruniversitäre Forschungsinstitutionen, die in Baden-Württemberg im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen aktiv sind	85	Abbildung 46: Prognose des Umsatzpotenzials für die EU, Deutschland und Baden-Württemberg im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor in 2030	113
Abbildung 33: Überblick über Gesamtumsatz der Unternehmen sowie im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich	86	Abbildung 47: Prognose der Bruttowertschöpfung und Arbeitsplätze in Baden-Württemberg im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor 2030	114
Abbildung 34: Anzahl verkaufter Brennstoffzellen-Pkw seit Produktionsstart je OEM	91	Abbildung 48: Arbeitsplätze in Baden-Württemberg nach Wirtschaftszweigen und Prognose der Arbeitsplätze im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Sektor 2030	116
Abbildung 35: Schätzung Marktanteile der bis heute verkauften Brennstoffzellen-Pkw	92	Abbildung 49: Herausforderungen hinsichtlich des Einsatzes und der Entwicklung von Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen	121
Abbildung 36: Zukünftige Produkteinführungen von Brennstoffzellen-Pkw von OEMs weltweit	93	Abbildung 50: Handlungsempfehlungen im Überblick	131
Abbildung 37: Patentanmeldungen von Unternehmen der Automobilindustrie im Bereich Brennstoffzelle	94	Abbildung 51: Überblick über Anzahl und organisatorische Zuordnung der Teilnehmer der Online-Umfrage sowie die Relevanz des baden-württembergischen Marktes für die teilnehmenden Unternehmen	142
Abbildung 38: Anzahl verkaufter Brennstoffzellen-Busse seit Produktionsstart je OEM	96	Abbildung 52: Überblick über Aktivitäten der Unternehmen, die an der Online-Umfrage teilgenommen haben, im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen	143
Abbildung 39: Schätzung Marktanteile Brennstoffzellenbusse-Hersteller	97	Abbildung 53: Überblick über die Aktivitäten und Forschungsziele der Forschungsinstitutionen, die an der Online-Umfrage teilgenommen haben	144
Abbildung 40: Zukünftige Produkteinführungen von Brennstoffzellen-Bussen von OEMs weltweit	98		
Abbildung 41: Zukünftige Produkteinführungen von Brennstoffzellen-Lkw von OEMs weltweit	99		
Abbildung 42: Einschätzung der Wettbewerbsfähigkeit der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie Baden-Württembergs im internationalen Vergleich	103		
Abbildung 43: Einschätzung der Wettbewerbsfähigkeit der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Produkte und der Innovationskapazität der Unternehmen im Vergleich zu den Marktführern und weiteren Wettbewerbern	104		

Abkürzungsverzeichnis

ABKÜRZUNG	BEDEUTUNG
BAU	Business as usual
BEV	Battery Electric Vehicle
BW	Baden-Württemberg
BZ	Brennstoffzelle
Capex	Capital Expenditures
CCS	Carbon Capture and Storage
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EE	Elektrische Energie
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EU-EHS	EU-Emissionshandelssystem
EV	Electric Vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellen-Fahrzeug)
FCH JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
FED	Forschung, Entwicklung und Demonstration
F&E	Forschung und Entwicklung

ABKÜRZUNG	BEDEUTUNG
H ₂	Wasserstoff
HyFab	Forschungsfabrik für Brennstoffzellen und Wasserstoff
IEA	International Energy Agency/Internationale Energieagentur
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LNG	Liquefied natural gas (Flüssigerdgas)
NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
OEM	Original Equipment Manufacturer
Opex	Operational Expenditures
PEM	Proton Exchange Membrane
PtG	Power-to-Gas
SMR	Steam Methane Reforming (Dampfreformierung)
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

Glossar

BEGRIFF	ERLÄUTERUNG
"Blauer" Wasserstoff	Aus fossilen Brennstoffen gewonnener Wasserstoff, bei dem bei der Herstellung entstehendes Kohlenstoffdioxid mittels Carbon Capture and Storage (CSS) abgeschieden und unterirdisch gespeichert wird, sodass es nicht in die Atmosphäre gelangt
"Brauner" Wasserstoff	Aus Braunkohle gewonnener Wasserstoff, bei dessen Herstellung Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird
Brennstoffzellen-Stack	Stapel aus hintereinander angeordneten Brennstoffzellen
Capital Expenditures (Capex)	Investitionsausgaben für längerfristige Anlagegüter (z.B. für Maschinen und Gebäude)
Carbon Capture and Storage (CSS)	Verfahren zur Abscheidung von Kohlenstoffdioxid aus Verbrennungsprozessen in Kraftwerken bzw. Industrieanlagen sowie zur nachfolgenden unterirdischen Speicherung des Kohlenstoffdioxids in geologischen Formationen
Dampfreformierung	Großindustrielles Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff aus kohlenstoffhaltigen Energieträgern (insb. Erdgas); derzeit wird Wasserstoff überwiegend durch Dampfreformierung gewonnen
Elektrolyse	Aufspaltung einer chemischen Verbindung mithilfe von Strom. Die Wasserelektrolyse, bei der Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird, dient zur Gewinnung von Wasserstoff. Zur Herstellung von Wasserstoff existieren derzeit drei Varianten des Elektrolyseverfahrens, deren Unterschied in der Wahl des Elektrolyten liegt: die alkalische Elektrolyse, die Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEM) und die Hochtemperaturelektrolyse
"Grauer" Wasserstoff	Aus Erdgas gewonnener Wasserstoff, bei dessen Herstellung Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird
"Grüner" Wasserstoff	Aus erneuerbaren, grünen Energieträgern (mittels Elektrolyse aus grünem Strom oder Biomasse) gewonnener Wasserstoff, bei dessen Herstellung kein Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird
Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)	Gleichzeitige Umwandlung von Energie in Strom und nutzbare Wärme in einem thermodynamischen Prozess. Bei der Erzeugung des Stroms entsteht Wärme, die für Heizzwecke oder Produktionsprozesse genutzt werden kann
Operational Expenditures (Opex)	Betriebsausgaben, d.h. laufende Ausgaben, die für einen funktionierenden operativen Geschäftsbetrieb notwendig sind (z.B. Ausgaben für Rohstoffe und Personal)
Power-to-Gas	Nutzung von Strom (hauptsächlich aus erneuerbaren Energien) zur Herstellung von Gasen, insbesondere von Wasserstoff durch Wasserelektrolyse. Der so produzierte Wasserstoff kann anschließend methanisiert, d.h. zu synthetischem Methan weiterverarbeitet werden, das z.B. als Ersatz für natürliches Methan genutzt werden kann
Power-to-X	Umwandlung von Stromüberschüssen bei der Stromerzeugung durch regenerative Quellen in andere, speicherbare Energieformen. Power-to-X-Technologien tragen dazu bei, dass Strom aus erneuerbaren Energien sektorübergreifend nutzbar gemacht werden kann

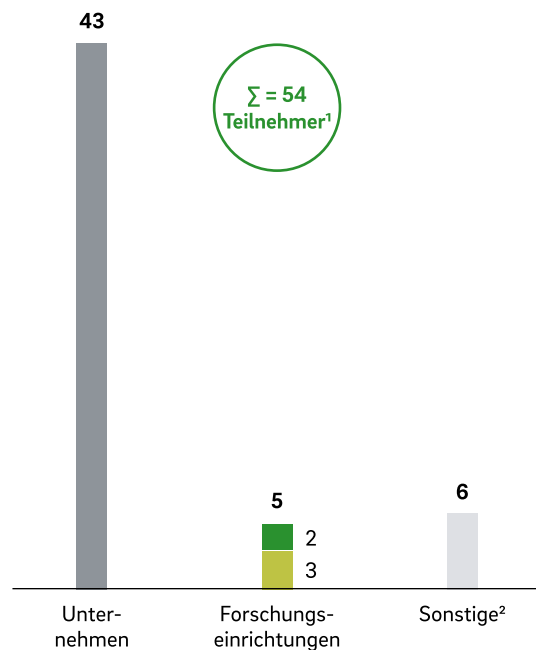
BEGRIFF	ERLÄUTERUNG
"Schwarzer" Wasserstoff	Aus Kohle gewonnener Wasserstoff, bei dessen Herstellung Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird
Sektorkopplung	Verknüpfung verschiedener Sektoren (Stromerzeugung, Industrie, Mobilität und Verkehr sowie Gebäudewärme und -strom) mit dem Ziel, den Energieverbrauch zu senken und durch eine sektorübergreifende Nutzbarmachung von erneuerbaren Energien die Dekarbonisierung des Energiesystems voranzutreiben. Eine wichtige Rolle für die Sektorkopplung spielen Power-to-X-Technologien, mit deren Hilfe Strom aus erneuerbaren Energien gespeichert und somit in anderen Sektoren nutzbar gemacht werden kann
Systemintegrator	Unternehmen, das mehrere Komponenten und technische Subsysteme zu einem Gesamtprodukt verarbeitet
Teil-Systemintegrator	Unternehmen, das mehrere Komponenten zu einem technischen Subsystem verarbeitet, das in Endanwendungen integriert bzw. weiterverarbeitet wird
"Türkiser" Wasserstoff	Unter Nutzung von Biomasse bzw. Biogas mittels Pyrolyse hergestellter Wasserstoff, bei dessen Herstellung kein bzw. nur sehr wenig Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird

Überblick über Teilnehmer Online-Umfrage

Abbildung 51

Überblick über Anzahl und organisatorische Zuordnung der Teilnehmer der Online-Umfrage sowie die Relevanz des baden-württembergischen Marktes für die teilnehmenden Unternehmen [# Teilnehmer, % der Unternehmen]

Überblick über Umfrageteilnehmer



FRAGE: "Welche Relevanz hat der baden-württembergische Markt für Ihr Unternehmen?" (n = 35)

66% der Unternehmen haben ihren **Sitz** in Baden-Württemberg (BW)

46% der Unternehmen **kooperieren** mit anderen **Unternehmen aus BW**

31% der Unternehmen sehen in BW einen **wichtigen Absatzmarkt**

34% der Unternehmen haben einen **Produktionsstandort** in BW

26% der Unternehmen betreiben **H₂/BZ-Anlagen** und Anwendungen in BW

Für **17%** hat der BW-Markt eine sonstige **Relevanz** (z.B. als Entwicklungsstandort)

¹ 25 Teilnehmer beantworteten die Umfrage vollständig, 29 teilweise.

² Darunter ein Verein, zwei Wirtschaftsförderungsunternehmen, eine Stadtverwaltung, ein Messeveranstalter sowie eine Landesagentur.

Quelle: Roland Berger

Abbildung 52

Überblick über Aktivitäten der Unternehmen, die an der Online-Umfrage teilgenommen haben, im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen [% der Unternehmen, # Unternehmen]

Aktivitäten im Bereich H₂/BZ

FRAGE: "Welche Aktivitäten verfolgt Ihr Unternehmen im Bereich H₂/BZ?" (n = 41)

54%	Hersteller/Entwickler von Anlagen und Komponenten
32%	Forschung und Entwicklung
22%	Betreiber von H ₂ /BZ-Anwendungen
22%	Beratung/Engineering-Dienstleistungen
12%	Herstellung von Wasserstoff
7%	Transport/Speicherung von Wasserstoff
7%	Interessenvertretung/Lobbying
10%	Sonstige ¹

Aktivität entlang der Wertschöpfungskette

FRAGE: "Für welche Stufen der Wertschöpfungskette und mit welchem Integrationsgrad stellt Ihr Unternehmen Produkte her?" (n = 19)

	H ₂ -Herstellung	H ₂ -Infrastruktur	Endanwendungen	Gesamt
Anlagenbauer/Integrator	1	-	6	37%
(Teil-)Systemintegrator	1	1	10	63%
Komponentenhersteller ²	4	5	10	79%
Gesamt	26%	26%	68%	

¹ 25 Teilnehmer beantworteten die Umfrage vollständig, 29 teilweise.

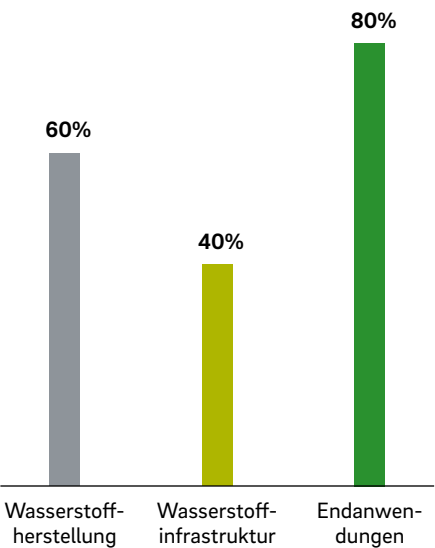
² Darunter ein Verein, zwei Wirtschaftsförderungsunternehmen, eine Stadtverwaltung, ein Messeveranstalter sowie eine Landesagentur.

Quelle: Roland Berger

Abbildung 53
Überblick über die Aktivitäten und Forschungsziele der Forschungsinstitutionen,
die an der Online-Umfrage teilgenommen haben [% der Forschungsinstitutionen]

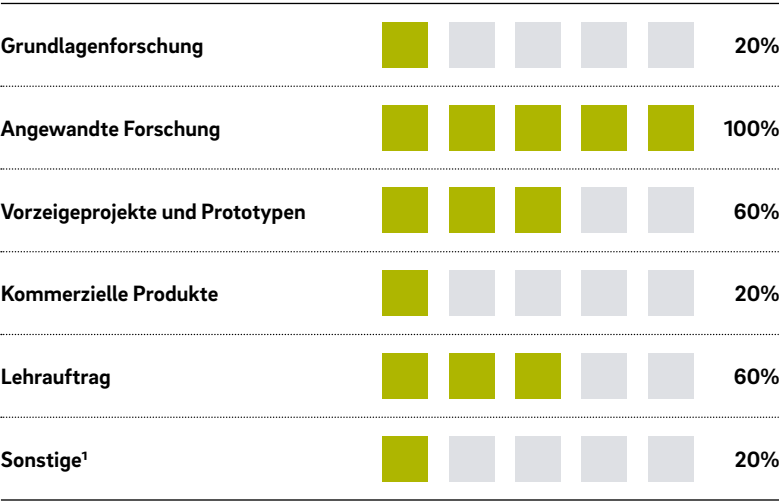
Forschungsaktivitäten

FRAGE: "An welchen Stufen der Wertschöpfungskette forscht Ihre Institution?"
(n = 5)



Forschungsziele

FRAGE: "Welche Ziele verfolgen Sie mit Ihrer Forschung?" (n = 5)



¹ Als sonstige Forschungsziele wurden Simulationen und Analytik genannt.
Quelle: Roland Berger

Überblick Experteninterviews

UNTERNEHMEN	FORSCHUNGSEINRICHTUNGEN	VERBÄNDE UND SONSTIGE ORGANISATIONEN
Air Liquide S.A.	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	IG Metall
CNH Industrial/Iveco	Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE	
Daimler AG	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – wbk Institut für Produktionstechnik	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW-GmbH)
ElringKlinger AG	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA)
Energie Baden-Württemberg (EnBW)		
EvoBus GmbH		
Fichtner GmbH und Co. KG		
Freudenberg Performance Materials SE und Co. KG		
Freudenberg Sealing Technologies GmbH und Co. KG		
MAHLE GmbH		
MANN+HUMMEL GmbH		
Mehrer Compression GmbH		
terraneis Baden-Württemberg GmbH		

Literaturverzeichnis

- Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programme (AFC TCP) (2019): Survey on the Number of Fuel Cell Vehicles, Hydrogen Refueling Stations and Targets, https://www.ieafuelcell.com/fileadmin/publications/2019-04_AFC_TCP_survey_status_FCEV_2018.pdf (abgerufen am 29.11.2019)
- Agora Energiewende (2020): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2020, https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung_2019/171_A-EW_Jahresauswertung_2019_WEB.pdf (abgerufen am 27.01.2020)
- Bosch (2019): "Bosch steigt in die Serienfertigung von Brennstoffzellen für Lkw und Pkw ein", Pressemeldung (29.04.2019), <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/bosch-steigt-in-die-serienfertigung-von-brennstoffzellen-fuer-lkw-und-pkw-ein-188480.html> (abgerufen am 29.11.2019)
- Bönnighausen, Daniel (2018): "Frankreich fördert Wasserstoff-Technik in allen Sektoren, in: Branchendienst für Elektromobilität, <https://www.electrive.net/2018/06/04/frankreich-foerdert-wasserstoff-technik-in-allen-sektoren/> (abgerufen am 29.11.2019)
- Bundesagentur für Arbeit (2017): Beschäftigte nach Wirtschaftszweigen (WZ 2008). Stichtag 31. März
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf (abgerufen am 29.11.2019)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2019a): Klimaschutz in Zahlen. Emissionsentwicklungen, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutz_zahlen_2019_fs_emissionsentwicklung_de_bf.pdf (abgerufen am 29.11.2019)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2019b): Treibhausgasemissionen in Deutschland 2018 nach Gas und Kategorie, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/pi-thg_abbildungen_bf.pdf (abgerufen am 29.11.2019)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2019c): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1> (abgerufen am 29.11.2019)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019): Dialogprozess Gas 2030. Erste Bilanz, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/C-D/dialogprozess-gas-2030-erste-bilanz.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (abgerufen am 29.11.2019)
- Bundesrat (2019a): Beschlussdrucksache 346/19. Entschließung des Bundesrates für eine auf einen ambitionierten Aufbau einer erneuerbaren Wasserstoffwirtschaft in Deutschland ausgerichtete Umsetzung der Erneuerbaren Energien Richtlinie (Renewable Energy Directive, Red II) in nationales Recht (11.10.2019), [https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2019/0301-0400/346-19\(B\).pdf?__blob=publicationFile&v=1](https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2019/0301-0400/346-19(B).pdf?__blob=publicationFile&v=1) (abgerufen am 29.11.2019)
- Bundesrat (2019b): Beschlussdrucksache 450/19. Entschließung des Bundesrates für den umfassenden Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft auf Basis erneuerbarer Energien (08.11.2019), [https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2019/0401-0500/450-19\(B\).pdf?__blob=publicationFile&v=1](https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2019/0401-0500/450-19(B).pdf?__blob=publicationFile&v=1) (abgerufen am 29.11.2019)
- California Air Resources Board (2018): Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment & Hydrogen Fuel Station Network Development, https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2019-11/AB8_report_2018_print_ac.pdf (abgerufen am 29.11.2019)
- Clean Energy Partnership (CEP) (2019): Mobil mit Wasserstoff. Clean Energy Partnership, https://cleanenergypartnership.de/fileadmin/Assets/06_h2-mediathek/312x185_img/01_publikationen-broschueren/CEP_Flyer_UeberUns_de.pdf (abgerufen am 29.11.2019)
- Clusterportal Baden-Württemberg (Clusterportal BW) (2019): Automotive in Baden-Württemberg, <https://www.clusterportal-bw.de/clusterdaten/technologiefelder/technologiefelder-detailseite/automotive/clusterd/Innovationsfeld/show/> (abgerufen am 29.11.2019)
- Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband (DWV) (2018). Grüne Wasserstoff-Industrie – Lösung für den Strukturwandel?
- Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV) (2019a): Wasserstoff-Spiegel 2/19, <https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2019/02/wss1902.pdf> (abgerufen am 29.11.2019)
- Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV) (2019b): "Aufgaben und Ziele", <https://www.dwv-info.de/ueber-uns/> (abgerufen am 29.11.2019)
- EEG (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien, https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html (abgerufen am 29.11.2019)
- e-mobil BW (2016): Kommerzialisierung der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg
- e-mobil BW (2017): Nullemissions-Nutzfahrzeuge – Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative
- e-mobil BW (2019): Strukturstudie BWe mobil 2019. Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung
- Energiforsk (2017): Technology Review – Solid Oxide Fuel Cell
- European Union (EU) (2018a): Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast), https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC (abgerufen am 29.11.2019)
- European Union (EU) (2018b): A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0773> (abgerufen am 29.11.2019)

European Union (EU) (2018c): Directive (EU) 2018/410 of the European Parliament and of the Council of 14 March 2018 amending Directive 2003/87/EC to enhance cost-effective emission reductions and low-carbon investments, and Decision (EU) 2015/1814, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0410&from=EN> (abgerufen am 29.11.2019)

European Union (EU) (2019a): Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO₂ emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 442/2009 and (EU) No 510/2011, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0631> (abgerufen am 29.11.2019)

European Union (EU) (2019b): Regulation (EU) 2019/1242 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 setting CO₂ emission performance standards for new heavy-duty vehicles and amending Regulations (EC) No 595/2009 and (EU) 2019/856 of the European Parliament and of the Council and Council Directive 96/53/EC, <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1242/oj> (abgerufen am 29.11.2019)

Eurostat (2016): Detaillierte jährliche Unternehmensstatistiken für die Industrie (NACE Rev. 2, B-E)

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH 2 JU) (2018a): Study on early business cases for H₂ in energy storage and more broadly power to H₂ applications

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH 2 JU) (2018b): Fuel Cells and Hydrogen for Green Energy in European Cities and Regions

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH 2 JU) (2018c): Strategies for joint procurement of fuel cell buses – A study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH 2 JU) (2018d): Mobility Business Case Tool, <https://www.fch.europa.eu/page/exploitation-results#mbct> (abgerufen am 29.11.2019)

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH 2 JU) (2019): Hydrogen roadmap Europe. A sustainable pathway for the European energy transition

Fraunhofer IAO (2018): ELAB 2.0

Fraunhofer ISI und Fraunhofer ISE (2019): Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland

Global CCS Institute (2019): Global Status of CCS 2019. Targeting Climate Change

Hydrogen Council (2017): Hydrogen scaling up. A sustainable pathway for the global energy transition

Hydrogen Initiative (2019): The Hydrogen Initiative, <https://hydrogeneurope.eu/sites/default/files/2018-09/The%20Hydrogen%20Initiative.pdf> (abgerufen am 29.11.2019)

H2 Mobility Deutschland (2018): Wasserstoff. Treibstoff der Zukunft, https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20180226-fachkonf-bundesfoerderung-bringt-elektromobilitaet-entscheidend-voran/tag-1_1-13_jung-h2m.pdf (abgerufen am 29.11.2019)

IEAGHG (2017): Technical Report 2017-02 "Techno-economic evaluation of SMR based standalone (merchant) hydrogen plant with CCS"

Institut der deutschen Wirtschaft (iwd) (2019): "Energie aus Wasserstoff – eine Chance für das Klima", <https://www.iwd.de/artikel/energie-aus-wasserstoff-eine-chance-fuer-das-klima-446387/> (abgerufen am 29.11.2019)

Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) (2018): Elektromobilität 2035. IAB-Forschungsbericht 08/2018

International Energy Agency (IEA) (2019): The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities

International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE) (2019): "Initiatives, Programs, and Policies", <https://www.iphe.net/norway> (abgerufen am 29.11.2019)

Kölling, Martin (2019): "Japan will die Wasserstoffmacht der Welt werden", in: Neue Zürcher Zeitung (27.09.2019), <https://www.nzz.ch/wirtschaft/klimapionier-japan-will-die-wasserstoffmacht-der-welt-werden-ld.1510612> (abgerufen am 29.11.2019)

Landtag von Baden-Württemberg (2019): Klimaschutz: CO₂-Reduktion in Deutschland und in Baden-Württemberg, Stellungnahme des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP16/Drucksachen/6000/16_6083_D.pdf (abgerufen am 29.11.2019)

Li, Fusheng (2019): "2020 marks end of support for fuel cell cars", in: China Daily (14.10.2019), <https://www.chinadaily.com.cn/a/201910/14/WS5da406a7a310cf3e355705d5.html> (abgerufen am 29.11.2019)

Michalski, Jan, Altmann, Matthias, Bünger, Ulrich & Weindorf, Werner (2019): Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Eine Expertise für das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen

Ministerial Council on Renewable Energy, Hydrogen and Related Issues (METI) (2017): Basic Hydrogen Strategy, https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf (abgerufen am 29.11.2019)

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM BW) (2014): Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg (IEKK), https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Klima/140715_IEKK.pdf (abgerufen am 29.11.2019)

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM BW) (2018): Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2018. Erste Abschätzung, Stand April 2019, https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Studien/Systemanalyse/Erneuerbare-Energien-2018_erste_Abschaetzung.pdf (abgerufen am 29.11.2019)

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM BW) (2019a): IEKK Monitoring-Kurzbericht, https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Klima/190917_IEKK-Monitoring-Kurzbericht_2018.pdf, (abgerufen am 29.11.2019)

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM BW) (2019b): Pressemitteilung zum Klimaschutz-Monitoringbericht für 2018, <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/umweltministerium-legt-klimaschutz-monitoringbericht-fuer-2018-vor/>, (abgerufen am 29.11.2019)

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (2019): Exportland Baden-Württemberg, <https://wm.baden-wuerttemberg.de/de/wirtschaft/wirtschaftsstandort/aussenwirtschaft/exportland-bw/> (abgerufen am 29.11.2019)

Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) (2015): Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Projektsteckbrief "H2 Mobility – Mission Infrastruktur", https://www.now-gmbh.de/content/2-bundesfoerderung-wasserstoff-und-brennstoffzelle/3-projektfinder/20191007-verkehr/20170630-h2mobility/03bv252_h2-mobility_nip-projekt-steckbrief.pdf (abgerufen am 29.11.2019)

Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) (2019): Factsheet: Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in der Volksrepublik China, https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20191022-now-factsheet-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie-in-china/now-gmbh_factsheet_china.pdf (abgerufen am 29.11.2019)

Ng, Eric (2019): "China sets sight on leapfrogging US and Japan in fuel-cell vehicles with subsidies for buyers and incentives for charging stations", in South China Morning Post (04.10.2019), <https://www.scmp.com/business/companies/article/3025495/china-sets-sight-leapfrogging-us-and-japan-fuel-cell-vehicles> (abgerufen am 29.11.2019)

Renault (2019): Groupe Renault introduces hydrogen into its light commercial vehicles range, Pressemeldung (22.10.2019), <https://media.group.renault.com/global/en-gb/groupe-renault/media/pressreleases/21234877/le-groupe-renault-introduit-lhydrogene-dans-sa-gamme-de-vehicules-utilitaires> (abgerufen am 29.11.2019)

Robinius, Martin; Linsen, Jochen; Grube, Thomas; Reuß, Markus; Stenzel, Peter; Syranidis, Konstantinos; Kuckertz, Patrick & Stolten, Detlef (2018): Comparative Analysis of Infrastructures. Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles

Roland Berger (2018): Benchmark of H₂ policies (study on behalf of Hydrogen Council)

Shell (2017): Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂

Shift2Rail & Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH 2 JU) (2019): Study on the use of fuel cells and hydrogen in the railway environment

Staatsministerium Baden-Württemberg (2019): Geplante Forschungsfabrik für Brennstoffzellen und Wasserstoff, <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/geplante-forschungsfabrik-fuer-brennstoffzellen-und-wasserstoff-1/> (abgerufen am 29.11.2019)

Statistisches Bundesamt (2008): Klassifikation der Wirtschaftszweige, https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Gueter-Wirtschaftsklassifikationen/Downloads/klassifikation-wz-2008-3100100089004.pdf?__blob=publicationFile (abgerufen am 29.11.2019)

Statistisches Bundesamt (2015): Input-Output-Rechnung. Fachserie 18.2

Statistisches Bundesamt (2017a): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung des Bundes. Tabellen 42251-003 und 42271-0011

Statistisches Bundesamt (2017b): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Länder

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2018): Baden-Württemberg und die Europäische Union, <https://www.statistik-bw.de/Service/Veroeff/Faltblatt/803818002.pdf> (abgerufen am 29.11.2019)

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2019a): Exportquote im Bundesländervergleich, https://www.statistik-bw.de/HandelDienst/Aussenhandel/AH-XP_exportquote.jsp (abgerufen am 29.11.2019)

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2019b): Pressemitteilung 35/2019 (21.02.2019), <https://www.statistik-bw.de/Presse/Pressemitteilungen/2019035> (abgerufen am 29.11.2019)

Stolten, Detlev (2018): Seminar on Electrochemical Energy Technologies for the Energy Transition, Frankfurt

Strategiedialog Automobilwirtschaft BW (SDA) (2019): Zweiter Fortschrittsbericht Strategie-dialog Automobilwirtschaft BW, https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Downloads/Gemischtes/SDA_2_Fortschrittsbericht_2019.pdf (abgerufen am 29.11.2019)

Süddeutsche Zeitung (2019): Daimler zählt den Diesel an (25.10.2019), <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/daimler-mercedes-diesel-lkw-1.4655631> (abgerufen am 29.11.2019)

The Korea Herald (Hg.) (2019): "S Korea to build 3 hydrogen-powered cities by 2022" (10.10.2019), <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20191010000806> (abgerufen am 29.11.2019)

United Nations (2015): Paris Agreement, https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (abgerufen am 29.11.2019)

U.S. Department of Energy (US DOE) (2018): 2018 Cost Projections of PEM Fuel Cell Systems for Automobiles and Medium-Duty Vehicles

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) (2019): VDMA Fuel Cells Survey 2019. Industry in Transition, https://bz.vdma.org/documents/266669/30751173/VDMA%20AG%20BZ_Fuel%20Cells-Survey%20PM%202019-04-03%20final%20EN_1554202818610.pdf/daa009f4-9f0f-d7e5-d176-1026ecc69d07 (abgerufen am 29.11.2019)

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu), Öko-Institut e.V., Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer ISI), HIR Hamburg Institut Research, Dr. Joachim Nitsch (2017): Energie- und Klimaschutzziele 2030

