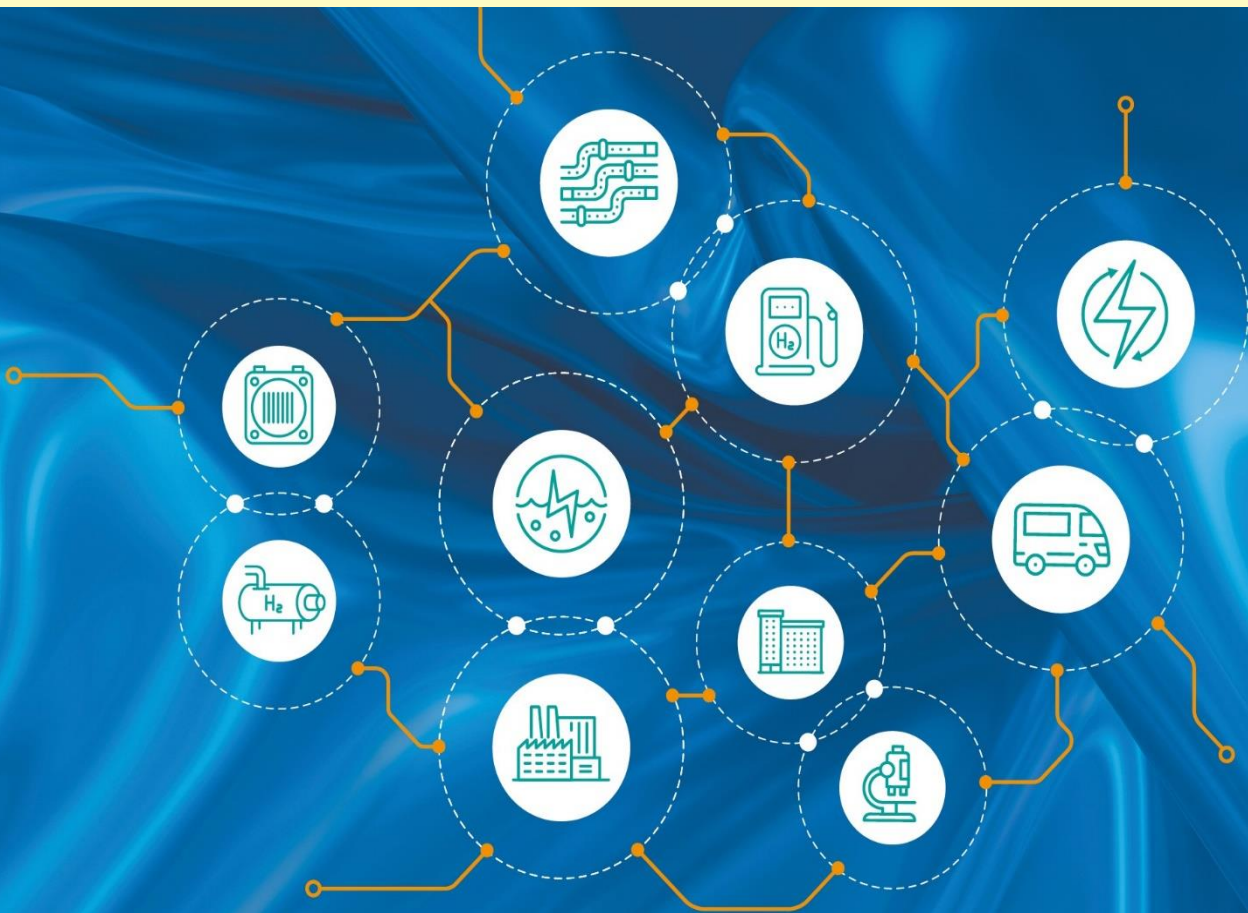


Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg

Klimaschutz und Wertschöpfung kombinieren



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Vorwort



Liebe Leserin, lieber Leser,

die fortschreitende Klimakrise einzudämmen ist eine gewaltige Herausforderung. Gleichzeitig bietet sie uns aber auch die Chance, unsere Wirtschaft ökologisch und nachhaltig zu gestalten. Dabei wird Wasserstoff eine zentrale Rolle spielen. Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien können insbesondere dazu beitragen, die Energieversorgung, die Mobilität und die industrielle Produktion der Zukunft klimafreundlicher zu machen. Natürlich geht das nur mit „grünem“ Wasserstoff, der aus erneuerbarem Strom erzeugt wird.

Gerade für den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg bietet Wasserstoff große wirtschaftliche Potenziale: Die Anlagen und Technologien für Wasserstoff können hier entwickelt und produziert werden. Wir gehen davon aus, dass in Baden-Württemberg so bis zu 16.000 neue Arbeitsplätze und neun Milliarden Euro Umsatz im Jahr 2030 entstehen können. Mit der Wasserstoff-Roadmap stellen wir nun einen strukturierten Fahrplan für den Auf- und Ausbau der Wasserstoffwirtschaft im Land vor.

In Baden-Württemberg sind viele hoch spezialisierte und international renommierte Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau sowie führende Forschungsinstitutionen im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie ansässig. Diese Struktur bietet hervorragende Voraussetzungen, um den erwarteten Markthochlauf der Technologien mitzugestalten und damit Arbeitsplätze im Land zu schaffen und zu sichern.

Wir haben den Ehrgeiz, das Land als führenden Standort in der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie zu etablieren. Baden-Württemberg soll national wie international Vorreiter auf diesem Gebiet werden. Dazu werden wir Infrastruktur ausbauen, Forschung fördern und Unternehmen unterstützen. Mit unserer Roadmap haben wir die Grundlage für unseren Weg zum Technologiestandort Nummer 1 gelegt. Nun gilt es, diesem Fahrplan zu folgen. Dies können wir nur gemeinsam schaffen – mit den erfahrenen Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verbänden, aber auch den jungen Start-ups, die mit mutigen und innovativen Ideen den Markt bereichern.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'F. Untersteller'.

Franz Untersteller MdL
Minister für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft
des Landes Baden-Württemberg

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Inhaltsverzeichnis	4
1 Einleitung	5
2 Handlungsfelder in Baden-Württemberg	8
3 Wasserstoffbedarf in Baden-Württemberg	12
3.1 WASSERSTOFFBEDARF IN DER INDUSTRIE	12
3.2 WASSERSTOFFBEDARF IM VERKEHR	13
4 Wasserstofferzeugung, Speicherung und Verteilung	14
4.1 WASSERSTOFFERZEUGUNG.....	14
4.2 SPEICHERUNG UND VERTEILUNG	15
4.3 FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG	17
4.4 MARKT	18
5 Technologiestandort Baden-Württemberg	19
5.1 TECHNOLOGIE	20
5.2 FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG	21
5.3 MARKT	22
6 Maßnahmen für Baden-Württemberg	24
6.1 SEKTOR- UND TECHNOLOGIEÜBERGREIFENDE MAßNAHMEN	24
6.2 MAßNAHMEN FÜR DEN SEKTOR ERZEUGUNG, SPEICHERUNG, VERTEILUNG	27
6.3 MAßNAHMEN FÜR DEN SEKTOR INDUSTRIE.....	29
6.4 MAßNAHMEN FÜR DEN SEKTOR MOBILITÄT	30
6.5 MAßNAHME FÜR DEN SEKTOR GEBÄUDE	31
6.6 MAßNAHME FÜR DEN SEKTOR STROMERZEUGUNG	31
7 Glossar	32
Impressum	34

1 Einleitung

Die Begrenzung des Klimawandels durch Reduzierung der weltweiten CO₂-Emissionen ist eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Hierfür ist ein tiefgreifender Umbau unserer Energiesysteme und eine weitreichende Umstellung auf innovative und emissionsfreie Technologien in allen Sektoren notwendig.

Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien können mittel- bis langfristig wesentlich dazu beitragen, die Klimaschutzziele zu erreichen. Wasserstoff als Energieträger ist dabei in den Sektoren Stromerzeugung, Industrie, Verkehr und Wärme direkt oder in Form von auf Wasserstoff basierenden synthetischen Kraftstoffen einsetzbar. Er ist zudem speicherbar. Somit eignet sich Wasserstoff zur Sektorenkopplung, die mittel- bis langfristig große Bedeutung für die Umsetzung der Energiewende erlangen wird. Hierfür müssen die technologischen und regulatorischen Grundlagen gelegt werden, mit dem Ziel, die Wasserstofftechnologien schrittweise weiter zu etablieren.

Wasserstoff und die dafür benötigten Technologien bieten große Potenziale für Industrie- und Technologiestandorte wie Baden-Württemberg. Weltweit sollen konventionelle Technologien durch neue, "grüne" Technologien ersetzt werden, was einen Strukturwandel bedeutet. Auch Baden-Württemberg ist von diesem Strukturwandel betroffen. Er ist eine Herausforderung, bietet aber auch große Chancen für das Land, die jetzige wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und internationale Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten und durch vorhandene Forschungs- und Technologiekompetenz sowie Innovationsfähigkeit weiter auszubauen. Wasserstoff und die dafür benötigten Technologien stehen daher auch im Fokus der von der Innovationsstrategie Baden-Württemberg identifizierten Zukunftsfelder.

Der Erhalt und Ausbau von Arbeitsplätzen in Baden-Württemberg sollte durch eine Industrialisierung der mobilen und stationären Wasserstoff- und Brennstoffzellenanwendungen unterstützt werden. Durch die Vernetzung und Clusterbildung der Akteure können im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie bei der Entwicklung von Systemen für Erzeugung, Speicherung und Nutzung von Wasserstoff Wettbewerbsvorteile erarbeitet werden. Dafür müssen Forschungs- und Entwicklungs-Projekte zur Industrialisierung und Marktaktivierung der Technologien gefördert und der Wissenstransfer durch Studien, Kooperationen, Aus- und Weiterbildung und Veranstaltungen angereizt und unterstützt werden. Durch die Fortführung bestehender und die Umsetzung weiterer Leuchtturmprojekte sowie die Weiterführung und die Initiierung gezielter Förderprogramme können Anreize für einen Aufbau und eine schnelle Verbreitung von

Produktions-, Speicher- und Nutzkapazitäten geschaffen werden. Damit sollen die baden-württembergischen Unternehmen darin unterstützt werden, ihre führende technologische Position im internationalen Wettbewerb zu behaupten. Der Hochlauf von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien kann auch durch die Digitalisierung vorangebracht und realisiert werden.

Baden-Württemberg hat frühzeitig die Chancen der Wasserstoffwirtschaft erkannt und wichtige Ergebnisse in Forschung und Entwicklung wie auch im Anwendungsbereich erzielt. Das Land verfügt über eine ausnehmend große Vielfalt an hochqualifizierten Forschungseinrichtungen, Hochschulen und Universitäten wie auch hochinnovativen Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette (KMU wie Global Player), die in erprobten Netzwerken kooperieren. Wichtige Projekte wurden durchgeführt beziehungsweise gestartet. Auf dieser erfolgreichen Basis kann Baden-Württemberg heute aufsetzen.

Die Bundesregierung hat im Juni 2020 ihre Nationale Wasserstoffstrategie veröffentlicht. Für Baden-Württemberg gilt es, die dort formulierten Chancen der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien auf Landesebene umzusetzen und zu nutzen, um auf diesem Gebiet einer der global führenden Wirtschaftsstandorte zu werden. Die Rahmenbedingungen dafür sind gegeben, insbesondere auch wegen der vorhandenen baden-württembergischen Industriestruktur im Anlagen- und Maschinenbau. Die baden-württembergische Wasserstoff-Roadmap baut auf die nationale Wasserstoffstrategie sowie die Strategie der EU als wesentliche Grundlage der geplanten Maßnahmen auf. Mit der Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg nimmt die Landesregierung den Ball auf und legt die Maßnahmen angepasst für das Land Baden-Württemberg und dessen Unternehmen und Forschungseinrichtungen fest. Zusätzlich wurde eine eigene Roadmap für reFuels erstellt, die unter anderem auf die speziellen Erfordernisse, Marktbedingungen, Infrastrukturen und Wertschöpfungspotenziale synthetischer Kraftstoffe eingeht.

In der Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg sind die Handlungsschwerpunkte für das Land benannt, die Ziele definiert und mit Maßnahmen unterlegt. Für die Entwicklung der Roadmap wurde ein begleitender Beteiligungsprozess durchgeführt, um die Perspektiven von Stakeholdern und Fachleuten zu berücksichtigen. Dieser konstruktive Austausch mit Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Verbänden und weiteren Stakeholdern im Land wird im Rahmen der Umsetzung der entwickelten Ziele fortgesetzt. Die Landesregierung wird weitere Ansätze für den erfolgreichen Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft entwickeln und den Wandel in der Industrie aktiv unterstützen.

Für Baden-Württemberg ergibt sich für das Jahr 2030 laut der in 2020 veröffentlichten Studie „Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Baden-Württemberg“ ein Umsatzpotenzial durch diese Technologien von etwa 9 Milliarden Euro. Der Schwerpunkt der baden-württembergischen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie liegt auf der Herstellung von Komponenten und Teil-Systemen mit einem geschätzten Umsatzpotenzial von etwa 8,6 Milliarden Euro. Dieses enorme wirtschaftliche Potenzial müssen wir erschließen. Dazu benötigen wir Demonstrationsprojekte, einen erfolgreichen Technologietransfer und Innovationsförderung.

2 Handlungsfelder in Baden-Württemberg

Baden-Württemberg liegt im Herzen von Europa und entlang wesentlicher Verkehrsachsen. Die Energieversorgung des Landes ist durch einen hohen Austausch mit den Nachbarregionen gekennzeichnet. Daher ist die grenzüberschreitende Betrachtung zu anderen Bundesländern sowie den Nachbarländern Frankreich, Schweiz und Österreich von hoher Bedeutung. Die wirtschaftlichen Stärken Baden-Württembergs liegen in der Mobilitätsindustrie und dem Maschinen- und Anlagenbau. Auch im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie gibt es bereits umfangreiche Expertise. Neben bedeutenden, international agierenden Konzernen ist die Wirtschaft des Landes durch eine starke mittelständische Industrie mit zahlreichen sogenannten „hidden champions“ geprägt. Die bisherige starke Exportorientierung wird auch und insbesondere durch die neuen Technologien weiter wichtig für die baden-württembergische Wirtschaft sein. Darin liegt die Stärke unseres Landes. Auch die Forschungslandschaft ist national und global hervorragend aufgestellt.

Die erneuerbaren Energien Wind, Sonne, Wasser und Biomasse werden auch perspektivisch den Energiebedarf Baden-Württembergs nicht decken können. Neben dem Ausbau der Energieinfrastrukturen ist der forcierte Ausbau der erneuerbaren Energien, insbesondere auch unter dem Blickwinkel der Sektorenkopplung und dem Aufbau lokaler Erzeugungskapazitäten für Wasserstoff, unerlässlich und wird die Entwicklung ortsansässiger Infrastrukturanbieter und Technologiezulieferer unterstützen. Darüber hinaus ist es entscheidend, dass sich Baden-Württemberg für die eigene Versorgungssicherheit in enger Abstimmung mit anderen Ländern, der Bundesregierung und auf europäischer Ebene für nationale, europäische und globale Energiepartnerschaften einsetzt. Neben der konsequenten Umsetzung des Prinzips „Efficiency first!“ zur Reduktion des Energiebedarfs ist es unerlässlich, auch zukünftig die internationalen Entwicklungen bei der Energieversorgung im Blick zu haben. Stoffliche Energieträger werden dabei – genauso wie heute schon – für die zukünftige Energieversorgung eine entscheidende Rolle übernehmen. Im Sinne einer klimaneutralen Energiewirtschaft werden diese aber nicht mehr fossile Energieträger sein, sondern beispielsweise nachhaltig erzeugter Wasserstoff oder darauf basierende Energieträger.

Demzufolge ist es für den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg wichtig, dass frühzeitig nationale und internationale Rahmenbedingungen und standardisierte Definitionen mit entsprechende Nachweisen (Zertifikate) für den globalen Handel, die Verteilung und die Nutzung von Wasserstoff etabliert werden, welche neue Geschäftsmodelle erlauben. Hierfür wird sich die Landesregierung bei der Bundes- und Europapolitik in geeigneter Weise einsetzen.

Eine zuverlässige Wasserstoffversorgung wird vorrangig über europäische Wasserstofftransportnetze auf Basis von Pipelines sowie dem gasförmigen und flüssigen Transport mittels Schifffahrt sowie über Schiene und Straße erfolgen. Zur Schaffung eines Heimatmarktes, zur kurzfristigen Unterstützung von Vorhaben zur Technologieeinführung und Markterprobung und als Demonstration für den Exportmarkt gilt es, die Potenziale zur Eigenerzeugung von Wasserstoff zu nutzen. Hierbei sollen auch Synergien mit der Chemieindustrie an den Landesgrenzen genutzt werden.

Die Technologiebedarfe der regionalen, nationalen und globalen Märkte sind einerseits sehr unterschiedlich und andererseits in Anbetracht der sehr dynamischen Entwicklungen für die kurz-, mittel- und langfristige Zukunft schwer einschätzbar. Insofern ist es für Baden-Württemberg von hoher Bedeutung, zunächst ergebnisoffen die nationalen, europäischen und globalen Trends zu bewerten.

Zunächst sollen großmaßstäbliche Modellregionen als regionale und initiale Technologiehubs installiert werden. Diese Modellregionen unterstützen die Markteinführung und Markterprobung der neuen Wasserstofftechnologien. Sie dienen des Weiteren als Keimzelle für die Technologieverbreitung und den Markthochlauf.

Kommunen können wichtige Plattformen zum verstärkten Einsatz von Wasserstoff werden. So kann beispielsweise der Einsatz eines Elektrolyseurs in Kombination mit Photovoltaik für die Stromversorgung eines Quartiers verwendet und die Abwärme aus der Elektrolyse für Nahwärme genutzt werden. Eine Kopplung der Sektoren Strom, Wärme, Kälte und Mobilität könnte so erfolgreich dargestellt werden.

Aufgrund des großen Beitrags des Verkehrssektors an den Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg steht dieser Bereich im besonderen Fokus der Klimapolitik. Aus heutiger Sicht müssen dabei technologieoffen unterschiedliche Ansätze zur Erreichung der Emissionsziele verfolgt werden, um diverse Entwicklungen und Anforderungen verschiedener Mobilitätsformen und -anwendungen (Straße, Schiene, Wasser, Luft) zu bedienen. Dabei können die Unternehmen der Automobilindustrie davon profitieren, dass viele Systemkomponenten, welche heute für den verbrennungsmotorischen Antrieb eingesetzt werden, modifiziert auch im Brennstoffzellen-Antrieb genutzt werden können. Die effiziente Direktnutzung von erneuerbarem Strom ist im Verkehrssektor – dort wo möglich und sinnvoll – jedoch weiterhin vorzuziehen.

Nach der Mobilität stellt der Industriesektor mit Raffinerien, der chemischen Industrie und anderen Industriezweigen einen weiteren Sektor einer Wasserstoffnachfrage in Baden-Württemberg dar. Perspektivisch kann der Einsatz von Wasserstoff zur Erzeugung von Prozesswärme in Industriebereichen wie beispielsweise der Zement-, Glas- und Papierherstellung eine Rolle spielen. In weiteren Industrien kann Wasserstoff als Reduktionsmittel beispielsweise bei der Stahlherstellung relevant werden.

Wasserstoff bietet die Möglichkeit, als saisonaler Stromspeicher und Sektorenkopplungstechnologie die Integration von erneuerbarem Strom ins Energiesystem zu fördern. Dennoch sind geringe Mengen lokal erneuerbar erzeugten Stroms und begrenzte Zeiten mit niedrigen Strompreisen sowie fehlende geeignete geologische Speicher hemmende Faktoren, die mittelfristig einem wirtschaftlichen Betrieb im Stromsektor in Baden-Württemberg entgegenstehen.

Perspektivisch können sich durch einen Wechsel der Energieträger (Fuel-Switch) im Kraftwerksbereich und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen interessante Einsatzbereiche entwickeln. Hier sollte deshalb mit einer Wasserstoff-Readiness-Strategie bei der Errichtung und Erneuerung der Anlagen agiert werden.

Die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff zur direkten Erzeugung von Wärme in Gebäuden werden derzeit als eher gering eingestuft, denn es gibt mit Wärmepumpen, solarthermischen Systemen, der Geothermie sowie der Biomasse zahlreiche erneuerbare Alternativen. Die erdgasbetriebene Brennstoffzelle kann jedoch bereits heute eine Effizienzsteigerung und Treibhausgasminde- rung ermöglichen und mittel- bis langfristig auch mit Wasserstoff betrieben werden.

Mit einer gezielten Förderung der Wasserstoff-, Brennstoffzellen-, Elektrolyse- und Synthesetechnologien kann aufgrund der vorhandenen Expertise zahlreicher Unternehmen, wirtschaftsnahe Forschungsinstitute und Hochschulen in Baden-Württemberg auf diesem Gebiet ein wesentlicher Beitrag zum Erhalt und der Schaffung von Arbeitsplätzen im Land geleistet werden. Des Weiteren kann die Erzeugung und Nutzung von synthetischen Energieträgern und Kraftstoffen mit hoher Energiedichte basierend auf erneuerbaren Energien eine wichtige Rolle spielen. Diese werden bedeutend für den interkontinentalen Transport von Energie sowie für die internationale Schiff- und Luftfahrt sein. Auch die Wasserstoff-Nutzung in Verbrennungsmotoren muss betrachtet werden. Die weitere Entwicklung dieser Technologie wird zeigen, ob dies eine Option für die Zukunft sein wird.

Eine weitere Basis der Wirtschaft in Baden-Württemberg ist der stark mittelständisch geprägte Maschinen- und Anlagenbau sowie die Zuliefererindustrie. Hier gilt es, die Transformation zu den neuen Wasserstofftechnologien zu unterstützen und den heutigen globalen Führungsanspruch weiter zu stärken. Dieses Ziel soll unter anderem durch den weiteren Ausbau der Produktionsforschung zur Skalierung und zum Technologietransfer für die neuen Technologien sowie durch Aufbau von unabhängigen Test- und Kompetenz-Zentren für die Technologiekomponenten erreicht werden. Dadurch werden Kompetenzen gebündelt, die Aus- und Weiterbildung hinsichtlich der neuen Technologien in der Branche professionalisiert und Synergieeffekte erzielt. Gerade in der jetzigen Situation, die stark durch Technologieentwicklung und Marktunsicherheiten geprägt ist, bieten Kompetenzzentren die Möglichkeit, Investitionen zu bündeln und den Aufbau von Know-how zu beschleunigen.

Baden-Württemberg will die Kompetenzen und Akteure in der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie mit Hilfe einer neuen Plattform H2BW weiter bündeln und in Abstimmung mit bestehenden Netzwerken unterstützen.

Zur Unterstützung des Transformationsprozesses in der Wirtschaft müssen die Anstrengungen im Kompetenzaufbau insbesondere durch Aus- und Weiterbildung, aber auch durch Wissens- und Technologietransfer und gegebenenfalls durch die Gewinnung internationaler Fachkräfte verstärkt werden. Dies umfasst unter anderem die Hochschul- und die berufliche Bildung, die überbetriebliche Weiterbildung zum Beispiel der Kammern ebenso wie Maßnahmen der betrieblichen Personalentwicklung. Ein frühzeitiger Ausbau der Forschungs- und Lehrkapazität für Wasserstofftechnologien an Hochschulen und Universitäten erweitert die personelle Basis für die noch nötige Technologieentwicklung und stärkt damit den Standort im Streben nach Technologieführerschaft.

Um eine hohe Akzeptanz für den grundsätzlichen Wandel in der Wirtschaft und der Technologie zu erhalten, werden weitere Stakeholder- und Bürgerdialoge zur Unterstützung der Transformation, auch regionalspezifisch, durchgeführt. Außerdem werden Netzwerke der Technologie- und Wirtschaftsakteure, wo sinnvoll und erforderlich, neben den bestehenden (beispielsweise e-mobil BW, dem Cluster Brennstoffzelle BW sowie dem Strategiedialog Automobilwirtschaft) etabliert und weiter ausgebaut, die sich stärker spezialisieren können. Es soll ein Überblick über die Aktivitäten einzelner Organisationen erarbeitet, der Austausch entlang der Wertschöpfungsketten sowie Innovationskooperationen gestärkt werden. Dies erhöht gleichzeitig die Sichtbarkeit und stärkt die Kompetenzentwicklung für den technologischen und gesellschaftlichen Wandel.

3 Wasserstoffbedarf in Baden-Württemberg

Bereits heute hat die baden-württembergische Industrie einen erheblichen Wasserstoffbedarf. Dieser wird im transformierten Energiesystem voraussichtlich nicht nur in der Industrie, sondern in allen Sektoren weiter stark zunehmen. Kurzfristig kann damit begonnen werden, den in der Industrie eingesetzten fossilen Wasserstoff sukzessive durch grünen Wasserstoff zu ersetzen. Im Mobilitätssektor wird zudem ein zunehmend steigender Wasserstoffbedarf für den Langstrecken- und Schwerlastverkehr sowie im öffentlichen Nahverkehr erwartet. Die Abschätzung, wie sich der Wasserstoffbedarf in Baden-Württemberg entwickelt, ist daher eine wichtige Kenngröße, um die Ausgestaltung der Roadmap und die Umsetzung von Maßnahmen zielführend durchführen zu können.

3.1 WASSERSTOFFBEDARF IN DER INDUSTRIE

Der Einsatz von Wasserstoff in Prozessen der energieintensiven Industriebranchen muss grundsätzlich differenziert betrachtet werden. Zum einen spielt Wasserstoff als Rohstoff bereits heute in Raffinerien und der Chemieindustrie eine bedeutende Rolle. Zum anderen ist der Einsatz zur Erzeugung von Prozesswärme in verschiedenen Industrieenanwendungen für eine Umstellung auf eine CO₂-neutrale Produktion eine Zukunftsoption.

In Baden-Württemberg wird Wasserstoff als Rohstoff in erster Linie in Raffinerien eingesetzt. Gut ein Fünftel des in deutschen Raffinerien benötigten Wasserstoffs wird durch Erdgas-Dampfreformierung hergestellt. Der Bedarf an grünem Wasserstoff wird für Baden-Württemberg aktuell jährlich mit etwa 1,8 TWh beziffert. Es liegt die Annahme zugrunde, dass auch weiterhin die flüssigen, dann aber "grünen" Rohprodukte nach Baden-Württemberg geliefert werden und die Weiterverarbeitung zum Endprodukt hier erfolgt. Würde jedoch auch die Synthese des Rohprodukts aus Kohlendioxid und Wasserstoff in Baden-Württemberg erfolgen, wäre der Wasserstoffbedarf wesentlich höher. Durch die Umstellung der Olefinproduktion (zum Beispiel für die Kunststoffherstellung) auf einen klimaneutralen Prozess könnte sich eine deutlich erhöhte Nachfrage nach, mit Hilfe von Wasserstoff erzeugtem, synthetischen Methanol ergeben.

Die Erzeugung CO₂-neutraler Prozesswärme (zum Beispiel in der Zement-, Glas-, Papier-, Kupferindustrie) kann neben der direkten Nutzung von Strom durch die Verbrennung von Wasserstoff erfolgen. Bei entsprechender Weiterentwicklung und breiter Diffusion von Wasserstofftechnologien in die Prozesswärme ist langfristig mit heutigem Stand der ansässigen Unternehmen und Produktionsmengen eine optimistische, maximale Wasserstoffnachfrage von etwa 7 TWh in Baden-Württemberg anzusetzen.

3.2 WASSERSTOFFBEDARF IM VERKEHR

Die angestrebten Ziele für die CO₂-Minderung erfordern für die verschiedenen Mobilitätsanwendungen unterschiedliche Kraftstoff- und Antriebsoptionen. Entscheidend für die Auswahl dieser Optionen sind die Nutzungsintensität, die Leistungs- und Reichweitenanforderung aber auch der Zeitraum der Flottenerneuerung und die größtmögliche Effizienz der eingesetzten Antriebstechnologie. Nicht alle Verkehrsträger können antriebsseitig rein batterieelektrisch betrieben werden. Dies gilt insbesondere für Binnen- und Seeschiffe sowie Flugzeuge, für die synthetische Kraftstoffe derzeit die sinnvollste Option darstellen. Die Brennstoffzelle eignet sich eher für den schweren Straßengüterverkehr und für Züge. Bei Bussen, PKW und leichten Nutzfahrzeugen ist der Einsatz der Brennstoffzelle insbesondere bei großen Fahrzeugmassen und hohen Laufleistungen sinnvoll.

Bei einer ambitionierten Marktentwicklung für Brennstoffzellen-PKW, -LKW, -Züge und -Busse wird für den Mobilitätssektor in Baden-Württemberg ein Wasserstoffbedarf im Umfang von 1,7 TWh in 2030 und 12,9 TWh in 2050 abgeleitet.

4 Wasserstoffherzeugung, Speicherung und Verteilung

Das heimische Potenzial zum Ausbau der erneuerbaren Energien Wind, Sonne, Wasser und Biomasse kann auch perspektivisch den Strombedarf Baden-Württembergs, der künftig wohl weiter steigen wird, nicht decken. Baden-Württemberg ist bereits heute ein Stromimportland und wird auch zukünftig auf Stromimporte angewiesen sein. Aus dieser Perspektive betrachtet wird das Land in erster Linie auch ein Importland für grünen Wasserstoff werden.

4.1 WASSERSTOFFERZEUGUNG

Aus regenerativem Strom erzeugter grüner Wasserstoff ist die Grundlage für eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft. Ein ambitionierter und beschleunigter Ausbau der Stromerzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energien ist deshalb von besonderer Bedeutung. Alternative Verfahren zu einer CO₂-armen Wasserstoffherzeugung sind heute noch nicht marktfähig entwickelt. Dazu gehören Verfahren wie beispielsweise die Erdgas-Pyrolyse mit einer Festkörper-Kohlenstoffabscheidung (türkiser Wasserstoff) oder die Erdgas-Reformierung (grauer Wasserstoff) mit einer Kohlendioxid-Sequestrierung (CCS – Carbon Capture and Storage) und/oder -Nutzung (CCU – Carbon Capture and Utilisation) (blauer Wasserstoff). Dabei ist zumindest CCS gesellschaftlich umstritten. Diese Verfahren werden in der Nationalen Wasserstoffstrategie jedoch im Hinblick auf einen wachsenden globalen und europäischen Wasserstoffmarkt als Übergangstechnologien diskutiert, vor allem um einen kurzfristig ansteigenden Bedarf zu bedienen. Dabei ist aus Sicht der Bundesregierung nur der Wasserstoff auf Dauer nachhaltig, der aus erneuerbaren Energien hergestellt wurde. Auch Baden-Württemberg setzt seinen Fokus auf grünen Wasserstoff. Das Ziel sollte sein, die Wasserstoffwirtschaft im Einklang mit den Klimaschutzziele möglichst bis zum Jahr 2030 vollständig auf grünen Wasserstoff auszurichten. Zusätzlich zur Elektrolyse kann grüner Wasserstoff – allerdings nur in begrenzten Mengen – aus Biomasse hergestellt werden.

Grüner Wasserstoff, in global handelbaren Mengen, wird aus Kostengründen dort erzeugt werden, wo es ein hohes Angebot von regenerativen Energien aus Sonne und Wind mit maximaler Volllaststundenzahl gibt. Weiterhin muss ein Zugang zu Wasser, Verteil- und Transportinfrastrukturen möglich sein. Geopolitische Stabilität, entsprechende internationale Handelsvereinbarungen, die Einhaltung von Nachhaltigkeitsstandards, Schaffung von Wertschöpfungspotenzialen vor Ort sowie die Vereinbarkeit mit der eigenen Energie- und Klimapolitik sind weitere wichtige Voraussetzungen für potenzielle Produktionsländer. Besonders gute klimatische Voraussetzungen bieten aus heutiger Sicht die Regionen des MENA-Gebiets (Middle East and North Africa), Australien, Brasilien und Chile. In Europa bieten die Küsten der südlichen Länder

gute Potenziale, aber auch die windreichen Küsten der Nordsee und osteuropäische Länder wie Bulgarien, Rumänien oder die Ukraine. Entscheidend für Baden-Württemberg wird es sein, frühzeitig in Abstimmung mit der Bundesregierung sowie den weiteren Bundesländern und auf europäischer Ebene Energiepartnerschaften für die Wasserstoffversorgung aufzubauen. Darüber hinaus müssen weiterhin Technologieoptionen für die heimische Wasserstoffproduktion geprüft und unterstützt werden.

Insofern muss eine Transport- und Verteillogistik für globale Lieferketten etabliert werden. Darüber hinaus muss geprüft werden, inwieweit die Eigenerzeugung an dezentralen Knotenpunkten (zum Beispiel entlang der Rheintalschiene und dem Rhein-Neckar-Gebiet) und bei Großverbrauchern (zum Beispiel Raffinerien, Zementwerken, Zugstrecken) sinnvoll ist. Bei derartigen Anlagen muss ferner die Einrichtung saisonaler Energiespeicher geprüft werden. Die dezentrale Wasserstoffherzeugung über Elektrolyse bietet zudem die Möglichkeit der Abwärmenutzung über Nah- oder Fernwärmenetze.

4.2 SPEICHERUNG UND VERTEILUNG

Derzeit wird Wasserstoff in größeren Mengen überhaupt nicht transportiert, sondern meist vor Ort erzeugt und verbraucht. Die kleinskalige Verteilung von Wasserstoff erfolgt heute noch in Form von Druckgas per LKW. Allerdings können Druckgas-Trailer nur sehr begrenzt Wasserstoff aufnehmen. Daher gibt es Überlegungen, zum Beispiel für die Belieferung von großen Tankstellen, flüssigen Wasserstoff (LH₂) einzusetzen. Ein Flüssiggastrailer kann über vier Tonnen Wasserstoff transportieren und die Technik der Tankstellen könnte vereinfacht und die Betriebskosten gesenkt werden. Darüber hinaus kann flüssiger Wasserstoff aufgrund der höheren Speicherdichte Vorteile für die Nutzung in Brennstoffzellen-LKW bieten. Insgesamt gilt es aber, den Transport über die Straße grundsätzlich zu minimieren.

Für große Mengen an Wasserstoff, der über Strecken von einigen 100 Kilometern transportiert werden muss (zum Beispiel vom Hafen Rotterdam nach Baden-Württemberg), könnten Pipelines aus Kosten- und logistischen Gründen eine wirtschaftliche Lösung sein. Neben dem Bau neuer Wasserstoffleitungen bestehen auch Überlegungen, bereits bestehende Erdgasleitungen zu Wasserstoffleitungen umzuwidmen. Für Baden-Württemberg muss dies aufgrund der nach wie vor hohen Nachfrage nach Erdgas näher betrachtet werden. Es wird auch die Beimischung von Wasserstoff in Erdgas-Netze diskutiert. Dies erscheint jedoch unsicher, weil für eine Vielzahl von Anwendungen sehr reiner Wasserstoff benötigt wird und eine Abtrennung von Wasserstoff aus Erdgas nach heutigem Stand technologisch aufwändig ist und zu hohen Kosten führt. Weitere Entwicklungen zur Abtrennung von reinem Wasserstoff aus dem Erdgas werden mit großem Interesse beobachtet und können bei Erfolg eine wichtige Option für den Wasserstofftransport

über längere Strecken darstellen. Insgesamt muss sich Baden-Württemberg an europäische und nationale Initiativen zum Aufbau eines europäischen Wasserstoffnetzes und von Umschlagplätzen/-technologien (Wasserstoff-Logistiken) anschließen und sich somit eine kostengünstige Versorgung mit global gehandeltem Wasserstoff erschließen. Dies bedingt auch die Abstimmung (inter-) nationaler Regelwerke und einer Standardisierung. Ebenso muss die Errichtung regionaler Wasserstoffverteilnetze geprüft werden, insbesondere dort, wo eine hohe lokale Nachfrage entsteht. Ergänzend wird ähnlich wie für verflüssigtes Erdgas (LNG) oder Flüssiggas (LPG) der Transport über Schiffe und Güterzüge notwendig sein.

Technologisch wird heute unter anderem zusätzlich zum Transport von reinem Wasserstoff der Einsatz von flüssigen und dadurch logistisch vorteilhaften Thermoölen (Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC) diskutiert. Diese sind vergleichsweise unschädlich für die Umwelt und sicher. Nachteilig sind die derzeit hohen Kosten für diese Thermoöle, die Notwendigkeit für verfahrenstechnische Anlagen zur Hydrierung und Dehydrierung mit entsprechendem Heizbedarf bei höheren Temperaturen und Drücken und die trotz hoher Zyklenbeständigkeit auftretende Zersetzung mit möglicher Schädigung auf nachgelagerte Systeme wie Brennstoffzellen. Daher stehen unter anderem auch wasserstoffbasierte Energieträger wie synthetische Kraftstoffe und Ammoniak für den interkontinentalen Transport im Vordergrund. All diese auf Wasserstoff basierenden Energieträger bieten den Vorteil der einfachen Transportlogistik, weil die Tank- und Umfülltechnologien bereits über die gesamte globale und regionale Lieferkette verfügbar und etabliert sind. Sie haben jedoch den Nachteil einer geringeren Effizienz bei Herstellung und Nutzung (in Verbrennungsmotoren beispielsweise im Vergleich zu Brennstoffzellen) gegenüber dem reinen Wasserstoff.

4.3 FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

Aus heutiger Einschätzung liegt der weitere Forschungs-, Entwicklungs- und Industrialisierungsbedarf bei der Weiterentwicklung der jeweiligen Elektrolyse-Technologien. In Summe hat Baden-Württemberg durch seine Forschungseinrichtungen dafür eine sehr gute Ausgangsbasis. Zur Beschleunigung der Entwicklungszyklen von Elektrolyse sowie Elektrolyse-Systemkomponenten bietet sich eine enge Kooperation zwischen Industrie und Forschung an, zum Beispiel durch die Errichtung unabhängiger Test- und Kompetenzzentren. Diese dienen zusätzlich der Testung, Prüfung und Zertifizierung beziehungsweise Zulassung von Komponenten der Brennstoffzelle, Brennstoffzellen-Systemkomponenten, Komponenten der Elektrolyse, Elektrolyse-Systemkomponenten, Tanksystemen und Systemkomponenten von Tankstellen.

Zum großskaligen Transport von Wasserstoff (zum Beispiel mittels Pipelines oder Frachtschiffen) gibt es auch global gesehen noch wenig Forschung, Entwicklung und Demonstration. Weitere Forschung ist ebenso für Tanksysteme erforderlich, für den Transport mittlerer Mengen über lange Strecken über Schifffahrt, Schiene oder Straße, zur Speicherung und zum Einsatz in Fahrzeugen (zum Beispiel auch Flüssigwasserstoff). Hier hat der Wissenschaftsstandort Baden-Württemberg sehr gute Möglichkeiten, die Felder zu besetzen und eine wissenschaftliche Führungsposition einzunehmen. Dabei muss betrachtet werden, unter welchen Randbedingungen sich welche Energieträger für den interkontinentalen Transport technologisch und wirtschaftlich eignen. Diskutiert werden gasförmiger und flüssiger Wasserstoff sowie Methanol und Ammoniak. Die Forschung und Entwicklung muss jeweils Lösungen für die Herstellung, die Speicherung, den Transport und das Umfüllen sowie die Rückumwandlung in den lokal genutzten Energieträger untersuchen und dabei auch die Kosten und Technikfolgen in den Blick nehmen.

Die Verteillogistik im nationalen und regionalen Bereich erfordert Entwicklungen zu Pipeline, Schiff-, Zug- und LKW-Transport. Je nach Form des Energieträgers müssen Fragen zur Materialbeständigkeit, Tanktechnologie, Sensorik, Sicherheit sowie zu Befüll- und Entladeprozessen gelöst werden. Da es hierfür weder national noch europäisch geeignete Testinfrastrukturen gibt, kann Baden-Württemberg mit entsprechenden Angeboten eine Vorreiterstellung einnehmen.

Sicherheitsbetrachtungen müssen über die komplette Wertschöpfungskette von Erzeugung, Verteilung und Nutzung durchgeführt und Lösungen entwickelt werden. Dies betrifft unter anderem den Einsatz von Odorierungsstoffen, welche idealerweise als weltweite Standards vereinbart werden und für alle Nutzungsarten geeignet sind.

Immer wichtiger werden techno-ökonomische Studien, Kostenbilanzen sowie die Betrachtung des Gesamtlebenszyklus von Wertschöpfungsketten (Life-Cycle-Assessment, LCA) unter Berücksichtigung von Infrastrukturen sowie dem Recycling von Materialien zur Schließung von Stoffkreisläufen und die Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen, um die Zukunftspotenziale bewerten zu können.

4.4 MARKT

Die Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft ist nur möglich mit einer nachhaltigen Wasserstoffherzeugung. Daher wird die Technologie zukünftig sehr dynamisch an Bedeutung zunehmen. Leider kommen die heute marktdominierenden Systemanbieter nicht aus Baden-Württemberg. Trotzdem können sich Komponentenlieferanten aus dem Land im globalen Wettbewerb durchsetzen. Es ist wichtig, dass sich Baden-Württemberg als Leitanbieter für die Wasserstofftechnologie mit einer starken Zuliefererindustrie etabliert. Hierzu sind verstärkt eine Skalierung und der Technologietransfer erforderlich. Dieser zukünftige Markt wird sich aus Sicht des Landes auf den Export beziehen. Bei der Umsetzung der empfohlenen Maßnahmen werden wir auf bereits bestehende Projekte und die vorhandenen Kompetenzen aufbauen. Baden-Württemberg muss Technologieführer werden und den Übergang dazu in wenigen Jahren schaffen.

5 Technologiestandort Baden-Württemberg

Baden-Württemberg ist ein bedeutender Technologiestandort in der Welt mit einer sehr starken Automobilindustrie sowie einem bedeutenden Maschinen- und Anlagenbau. Aber auch in der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie sind bereits zahlreiche Unternehmen zum Teil weltweit erfolgreich. Sehr ausgeprägt ist der Mittelstand mit einigen „hidden champions“ im internationalen Wettbewerb. In der Kombination von sehr wettbewerbsfähiger Zulieferindustrie im Verkehrssektor sowie dem Maschinen- und Anlagenbau hat das Land einige Unternehmen mit einer Führungsrolle in der Industrialisierung, welche den Aufbau und Betrieb von Produktionsstraßen zur Herstellung von Millionen Gleichteilen in höchster Qualität beherrschen. Die nun beginnende Phase des Markthochlaufs der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien bietet neue Chancen. Die heute weltweit führenden Unternehmen stehen vor der Herausforderung, ihr Know-how auf relevante Stückzahlen zu übertragen. Gleichzeitig gilt es, die Exportmärkte zu bedienen. Hier können die gut vernetzten Unternehmen in Baden-Württemberg auf ihre globalen Lieferketten und Kundenbeziehungen zurückgreifen. Baden-Württemberg wird den Übergang von der Technologieentwicklung hin zu einer Exportstrategie angehen und erfolgreich umsetzen. Dazu wird uns die neu einzurichtende Plattform H2BW unterstützen. Hier werden die weiteren Umsetzungsschritte konzipiert und vorangetrieben. Dies wird vor allem aber auch durch die gemeinsame Strategie in Form von Kompetenzclustern, Wertschöpfungsketten und gemeinsamen Projekten gelingen. Wir wollen alle wesentlichen Player in diesem Prozess mitnehmen und einbinden.

Wesentliches Ziel von Baden-Württemberg ist es, die vorhandenen Stärken auf die neuen Wasserstofftechnologien zu übertragen. Baden-Württemberg hat hier bereits viel erreicht. Es gibt zahlreiche Projekte, in denen die Kompetenzen baden-württembergischer Unternehmen in der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie sehr erfolgreich umgesetzt und dargestellt wurden. Wir müssen nun diese Kompetenzen weiter ausbauen und Übergangsstrategien entwickeln, um die Transformation erfolgreich gestalten zu können. Diese Entwicklungen werden entsprechend den Planungen der nationalen und europäischen Wasserstoffstrategie adaptiert.

Die zahlreichen unabhängigen Forschungseinrichtungen sowie Hochschulen und Universitäten Baden-Württembergs zeichnen sich durch eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten im Bereich der Wasserstofftechnologien von der Entwicklung bis hin zur Technologiedemonstration aus. Die Forschung ist interdisziplinär ausgerichtet. Von der Materialforschung (zum Beispiel Wasserstoffversprödung) über die Chemie, Physik, die Ingenieurs- und Produktionswissenschaften bis zur Systemanalyse in der Begleitforschung sind viele Wissenschaftsdisziplinen aktiv. Die

Anwendungen betreffen Elektrollysetechnologie, Brennstoffzellen, den Wasserstoffverbrennungsmotor (auch stationär in Blockheizkraftwerken), Mess- und Eichverfahren, Power-to-X Technologie und die Brennstoffzellenproduktion.

Baden-Württemberg will die Kompetenzen und Akteure in der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in einer öffentlichkeitswirksamen Dachmarke „Wasserstoff BW“ vereinen und vermarkten. Das Land wird so veranschaulichen können, was es bereits anbieten kann und zukünftig noch leisten wird. Baden-Württemberg hat ein großes Technologiepotenzial, mit dem eine Skalierung der Technologie erreicht werden kann. Das sind die Kernbotschaften unserer Strategie.

Baden-Württemberg hat eine zentrale Lage in Europa mit nationalen Grenzen nach Frankreich, zur Schweiz und nach Österreich sowie Landesgrenzen nach Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz. Der Rhein bildet eine der wesentlichen Strecken für den europäischen Güterverkehr („Rheintalschiene“). Aufgrund der hohen Konzentration von Industrie und der Nähe zur Rheintalschiene als potenzielle künftige europäische Verteilungsachse für Wasserstoff kann Baden-Württemberg frühzeitig als Standort für Pilotprojekte zu den Wasserstofftechnologien positioniert werden.

Die wirtschaftspolitische Herausforderung besteht darin, angesichts der heute noch offenen Fragen zur zukünftigen Bedeutung konkreter Technologien und globaler Märkte eine Technologieoffenheit zu bewahren und trotzdem für Schlüsseltechnologien wie Elektrolyse, effiziente PtX-Verfahren und Brennstoffzellen eine Technologieführerschaft zu erreichen. Ein Leitgedanke dabei muss der Vorrang für klimaneutrale und Effizienztechnologien sein, wobei die globalen Lieferketten für Energie beachtet werden müssen.

5.1 TECHNOLOGIE

Der Maschinen- und Anlagenbau Baden-Württembergs ist auch deswegen weltweit führend, weil insbesondere im Mobilitätssektor die Herausforderung besteht, sehr hohe Stückzahlen in gleichbleibend sehr hoher Qualität zu produzieren. Diese Fähigkeiten müssen auf die Wasserstofftechnologien übertragen werden, so zum Beispiel:

- Elektrolyseure erfordern Bauteile mit Flächen im Quadratmeter-Maßstab wie Membrane, Katalysatorschichten, Poröse Transportlagen, Bipolarplatten und Dichtungen. Die Komponenten des Zellstapels sowie die Peripheriebauteile wie Ventile, Pumpen, Kompressoren, Wärmeüberträger, Rohrleitungen und andere mehr müssen eine hohe Wasserstoffverträglichkeit aufweisen und Druckniveaus bis etwa 50 bar dauerhaft bestehen.

Die Anforderungen an die Lebensdauer liegen bei zwei bis drei Jahrzehnten. Zwar sind die Stückzahlen verhältnismäßig klein, aber die Anforderungen an die Fertigungsqualität sind aufgrund der hohen Leistungsanforderungen, der Sicherheitsrelevanz und der erwarteten Lebensdauer sehr hoch.

- Marktübliche Serien für PKW haben Stückzahlerwartungen von über 200.000 pro Jahr. Daraus leitet sich für die Produktion von Brennstoffzellen-Komponenten ein 10 Hertz-Takt ab, also ein Durchsatz von 10 Einzelzellen pro Sekunde. Die Besonderheit von Brennstoffzellen in der Mobilität besteht in der enorm hohen Anzahl von Gleichteilen. Bei einem Stapel aus 300 Einzelzellen müssen 600 Monopolarplatten gefertigt werden, also 120 Millionen Stück für eine Automobilproduktion von 200.000 jährlich. Da Fehler in diesen Einzelteilen (wie Membran, Katalysatorschicht, Gasdiffusionslage, Bipolarplatte, Dichtung) zum Totalausfall des gesamten Zellstapels führen können, wird eine „Nullfehlertoleranz“ ausgegeben (zum Beispiel darf nur eines von 10 Millionen Teilen fehlerhaft sein). Der Stapelprozess erfordert neue Ansätze. Hier gilt es zu prüfen, inwieweit branchenfremde Technologien zum Beispiel von der Zeitungs-, der Pflasterherstellung oder der Verpackungsindustrie auf die Stackassemblierung transferiert werden können. Systemkomponenten wie Ventile, Rezirkulationspumpen, Kompressoren, Wärmeüberträger und Luftfilter können mit entsprechenden Adaptionen teilweise aus verbrennungsmotorischen Antriebskomponenten übernommen werden.
- Komponenten für Verbrennungsmotoren mit synthetischen Kraftstoffen können in der Regel mit geringfügigen Anpassungen aus den Baukästen für fossil betriebene Verbrennungsmotoren übernommen werden.

5.2 FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

Die Kernkomponenten von Elektrolyse und Brennstoffzelle (zum Beispiel Membran, Katalysatorschicht, Poröse Transportlagen, Bipolarplatte) sowie Systemkomponenten müssen serientauglich weiterentwickelt werden. Insbesondere besteht Bedarf zur Entwicklung kryogener und kostengünstiger Druckgasspeicher für Fahrzeuge. Allgemein müssen Kosten reduziert und die Langlebigkeit der Produkte weiter erhöht werden.

Die angewandte Forschung in Baden-Württemberg kooperiert eng mit dem häufig mittelständisch geprägten Maschinen- und Anlagenbau. Da der Mittelstand und Kleinunternehmen in der Regel wenig Möglichkeiten für den Aufbau von Laboren für das Arbeiten mit Wasserstoff haben und die Fähigkeit, in umfangreiche Testmöglichkeiten investieren zu können, unter Umständen beschränkt sind, ist der Aufbau von unabhängigen Testzentren sinnvoll. Eine Fokussierung auf Komponententests käme sowohl dem Maschinen- und Anlagenbau zugute (der Anlagen zur Komponentenherstellung entwickelt) als auch den entsprechenden Zulieferern.

Der Ausbau der Forschungskapazitäten ist wesentlich für den wirtschaftlichen Erfolg Baden-Württembergs in einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft. Gerade die Technologieentwicklung zur Industrialisierung der Wasserstofftechnologien benötigt hochqualifiziertes Personal im Ingenieurbereich sowie in den Sparten Chemie, Physik und Materialwissenschaft. Sie alle erwerben ihre Qualifikation an den Hochschulen und Universitäten im Studium und mit Promotionsprojekten sowie mit entsprechender Forschungsinfrastruktur. Die kooperative Forschung mit Unternehmen ist auf moderne Test- und Forschungsinfrastrukturen angewiesen.

Ebenso muss in die Aus- und Weiterbildung investiert werden. Die Industrie benötigt Fachkräfte, und das Handwerk muss im Umgang mit Wasserstofftechnologien geschult sein. Baden-Württemberg hat bereits vielfältige Maßnahmen ergriffen, die dazu beitragen, dass sich Forschungseinrichtungen und Unternehmen im Bereich Wasserstofftechnologien qualifizieren und ansiedeln. Für angehende Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler sowie Fachkräfte, gegebenenfalls aus dem Ausland, die beruflich im Bereich Wasserstoff und PtX-Technologien tätig werden wollen, ist der Technologiestandort Baden-Württemberg sehr attraktiv.

5.3 MARKT

Die Landesregierung sieht nach wie vor auch für den Einsatz der Brennstoffzelle im PKW und leichten Nutzfahrzeugen mittelfristig Potenziale. Für Anwendungen, die einen hohen Energiebedarf benötigen, also Fahrzeuge mit hohem Gewicht und großer Reichweitenanforderung beziehungsweise häufigem Tanken, bietet die Brennstoffzelle Vorteile. Der technologische Vorsprung der baden-württembergischen Automobilhersteller sollte hier nicht aufgegeben werden.

Die europäische Emissionsgesetzgebung löst dringenden Handlungsbedarf in Europa und Baden-Württemberg zur Entwicklung emissionsfreier Antriebe für LKW und Busse aus. Dementsprechend entstehen bereits heute sehr dynamische Heimatmärkte für die erforderlichen Komponenten und Systeme. Ausgehend von einem kurzfristig aufzubauenden Heimatmarkt über die komplette Wertschöpfung der Wasserstofftechnologien und der damit einhergehenden Demonstration der Technologie- und Marktreife kann somit der langfristig bedeutende Exportmarkt erschlossen werden.

Gleichzeitig könnte ein Markt für synthetische Kraftstoffe entstehen zum Beispiel durch Quotenregelungen zur Beimischung (unter anderem Flugkraftstoffe). Ferner wird es in Schwellen- und Entwicklungsländern noch viel länger dauern, um eine Infrastruktur für den rein elektrischen Antrieb oder den Wasserstoff-Antrieb bereitzustellen. Die weitere Planung der Landesregierung zu synthetischen Kraftstoffen basiert auf dem Programm reFuels. Weitere Details dazu stehen in der Roadmap reFuels.

Notstromaggregate (beispielsweise für Behördenfunk, Mobilfunk, Banken, Krankenhäuser, Rechenzentren), mobile Stromversorgungen (zum Beispiel für Baustellen, Märkte, Konzerte, TV-Übertragungen, Verkehrssignale, Camping), Flurförderfahrzeuge und Off-Road-Vehicles (Baumaschinen, Landwirtschaft, Ground-Handling an Flugzeugen usw.) stellen weitere Anwendungen für Brennstoffzellentechnologien dar. Insbesondere für den Markthochlauf können sie interessante Einstiegsmärkte darstellen. Da all diese Brennstoffzellen-Anwendungen eine Wasserstoffversorgung benötigen, reizen sie zugleich auch Märkte für die Wasserstoffherzeugung, -logistik und -betankungssysteme an. Über eine entsprechende Technologieförderung können insbesondere die kleinen und mittelständischen Unternehmen in Baden-Württemberg attraktive Märkte erschließen.

Um funktionierende und zukunftsfähige Geschäftsmodelle für einen wirtschaftlichen Betrieb mit einer entsprechenden Investitionssicherheit zu schaffen, müssen regulatorische Rahmenbedingungen angepasst werden. Die Anpassungen können hinsichtlich Änderungen an Emissionsgrenzwerten, Genehmigungsprozessen und Investitionsförderungen sowie Zuschüssen für den Betrieb ausgestaltet werden. Dabei sollen die Erreichung der Klimaziele im Vordergrund stehen, technologieoffene Lösungen ermöglicht werden und eine nutzerorientierte Kostenteilung verfolgt werden.

6 Maßnahmen für Baden-Württemberg

Wesentlicher Ansatz der Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg ist es, die Wirtschaft im Land insbesondere mit den Branchen Mobilität sowie Maschinen- und Anlagenbau im Transformationsprozess weg von der Nutzung fossiler Energien hin zu klimaneutralen Technologien zu unterstützen. Wir haben dabei das Wohl der Menschen, die Zukunftsfähigkeit der Wirtschaft und den konsequenten Klimaschutz im Blick. Die Transformation unter diesen Gesichtspunkten soll gelingen, indem Baden-Württemberg unter anderem folgende Maßnahmen im Rahmen der zur Verfügung stehenden Mittel und unter Berücksichtigung der bereits laufenden und abgeschlossenen Projekte umsetzt:

6.1 SEKTOR-UND TECHNOLOGIEÜBERGREIFENDE MAßNAHMEN

Maßnahme 1:

Baden-Württemberg setzt sich in Abstimmung mit anderen Bundesländern bei der Bundesregierung, in Europa und international für Rahmenbedingungen ein, welche möglichst bald betriebs- und volkswirtschaftlich solide Geschäftsmodelle für die neuen Wasserstofftechnologien ermöglichen. Darüber hinaus ist es von großer Bedeutung, eine grundsätzliche, energiewendekonforme Reform der Steuern, Abgaben und Umlagen im Energiebereich mit dem Hauptinstrument der CO₂-Bepreisung voranzutreiben.

Maßnahme 2:

Um mittel- bis langfristig eine hohe Versorgungssicherheit mit Wasserstoff und den Folgeprodukten zu erlangen, setzt sich Baden-Württemberg in nationaler und europäischer Abstimmung für den Aufbau internationaler Kooperationen mit Wasserstoff exportierenden Ländern (Energiepartnerschaften) ein. Diese sollten auf Basis von Machbarkeitsstudien inklusive techno-ökonomischer Analysen und Lebenszyklusanalysen zur ökologischen Bewertung der kompletten Liefer- und Nutzungsketten von der Erzeugung bis zur Nutzung durch den Endverbraucher initiiert werden.

Maßnahme 3:

Baden-Württemberg fördert Modellregionen, die als Keimzelle für die Markterprobung der neuen Technologien und Geschäftsmodelle dienen und Strahlwirkung für einen flächendeckenden Markthochlauf entwickeln. In diesem Sinne sollen die Modellregionen mit ihren Wasserstoffanwendungen als Schaufenster genutzt werden.

Maßnahme 4:

Die kommunale Wasserstoffnutzung soll ausgebaut werden. Die Kommunen können Plattformen zum verstärkten Einsatz von Wasserstoff bieten. Hier könnte ein zielgerichtetes Förderprogramm zum Beispiel Quartierslösungen unterstützen, in denen die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme, Kälte und Mobilität erfolgreich dargestellt wird.

Maßnahme 5:

Des Weiteren unterstützt das Land den Einsatz von Wasserstofftechnologien in Unternehmen, insbesondere in KMU. Dies zielt vor allem auf Demonstrationsprojekte und die Vorbereitung des Markthochlaufs ab.

Maßnahme 6:

Um die mittelständisch geprägte Industrie in Baden-Württemberg zu unterstützen, Ressourcen zu bündeln und einen raschen Kompetenzaufbau zu ermöglichen, sind die Bedarfe für unabhängige Test- und Prüfzentren für Komponenten der Wasserstofftechnologien zu ermitteln. Deren Einrichtung wird unterstützt. Die Zentren könnten von den entwickelnden und produzierenden Unternehmen genutzt werden, ohne dass in der derzeitigen Entwicklungsphase jeweils eigene, umfangreiche Testumgebungen aufgebaut und betrieben werden müssen. Dabei sollten auch Fragen der Zertifizierung und Zulassung beachtet werden.

Maßnahme 7:

Die bereits bestehende Führungsrolle der wirtschaftsnahen Forschung und der Grundlagenforschung soll weiter gestärkt werden. Weltweit anerkannte Forschungsinstitutionen, Universitäten und Hochschulen in Baden-Württemberg haben sich in den vergangenen Jahrzehnten eine gute Wettbewerbsposition erarbeitet. Sie soll zur Unterstützung der baden-württembergischen Wirtschaft weiter ausgebaut werden. Dies soll unter anderem im Rahmen wirtschaftsorientierter Forschungsprojekte zugunsten der wesentlichen Sektoren Baden-Württembergs erfolgen. Sofern aus der Forschung neuer Handlungsbedarf und erforderliche Maßnahmen resultieren, sollen auch diese unterstützt und umgesetzt werden.

Maßnahme 8:

Der Einsatz netzunabhängiger lokaler Stromversorgungsanlagen (beispielsweise auf Baustellen oder Märkten) mit Brennstoffzellen kann lokale Emissionen reduzieren. Fördermöglichkeiten in diesem Bereich werden geprüft.

Maßnahme 9:

Die bestehenden Kompetenzcluster Baden-Württembergs sollen konsequent weiter ausgebaut werden, um die Vernetzung der Technologie- und Markttreiber zu fördern. Mit der e-mobil BW, dem Cluster Brennstoffzelle BW sowie dem Strategiedialog Automobilwirtschaft sind entsprechende Netzwerke bereits angelegt. Zur Unterstützung kann eine ergänzende Studie zur Akteurslandschaft in Baden-Württemberg sinnvoll sein. Diese Kompetenzcluster müssen genutzt werden, um die Sichtbarkeit der Kompetenzträger im Land sowie bundes- und weltweit zu erhöhen und um einen gesellschaftlichen Dialog zu entfalten. Die Entwicklung einer öffentlichkeitswirksamen Dachmarke „Wasserstoff BW“ und eine entsprechende Vermarktung hilft, die Sichtbarkeit dieser Technologie zu fördern.

Maßnahme 10:

Der Aufbau der Wasserstoffwirtschaft in Baden-Württemberg wird in engem Schulterschluss mit den benachbarten Bundesländern sowie mit inner- und außereuropäischen Ländern und mit gemeinsamen Projekten durchgeführt.

Maßnahme 11:

Baden-Württemberg unterstützt die Universitäten und Hochschulen im Ausbau von Lehr- und Forschungskapazität für Wasserstofftechnologien.

Maßnahme 12:

Die Aus- und Weiterbildung wird beispielsweise unter Einbeziehung von Industrie- und Handelskammern, Handwerkskammern sowie beruflichen Schulen ausgebaut. Ziel ist, die Aktivitäten zur Produktentwicklung in der Industrie durch kompetenten Nachwuchs an Fachkräften zu unterstützen.

Maßnahme 13:

Es soll eine Plattform H2BW etabliert werden, welche die Maßnahmen voranbringt, die in der Wasserstoff-Roadmap entwickelt wurden. Die Plattform H2BW soll die aktuelle Dynamik der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie für den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg passgenau und zukunftsgerichtet fördern. Die Plattform H2BW soll den Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten im Land ein sichtbares und sektorenübergreifendes Dach geben, bereits vorhandene und neue Aktivitäten und Akteure bündeln und vernetzen und so Potenziale möglichst effektiv nutzen.

Maßnahme 14:

Unterstützung der baden-württembergischen Wirtschaft und Wissenschaft bei europäischen und/oder bundesweiten Projekten, Ausschreibungen und Wettbewerben im Bereich Wasserstoff, insbesondere IPCEI.

6.2 MAßNAHMEN FÜR DEN SEKTOR ERZEUGUNG, SPEICHERUNG, VERTEILUNG

Maßnahme 15:

Baden-Württemberg befürwortet den Aufbau eines europäischen Wasserstoff-Gasnetzes, ohne das eine kostengünstige Wasserstoffversorgung nicht darstellbar und die Umrüstung von fossilen Kraftwerken auf Wasserstoff nicht realisierbar ist (vgl. auch Maßnahme 28). Dieser Aufbau kann perspektivisch auch die optionale Umwidmung bestehender Gaspipelines einschließen. Die dafür erforderlichen nationalen Ausbaumaßnahmen werden im Rahmen des Prozesses zur Erstellung des Netzentwicklungsplans Gas ermittelt. Ferner werden Anpassungen der regulatorischen Rahmenbedingungen erfolgen müssen. Baden-Württemberg wird diese Prozesse unterstützen.

Maßnahme 16:

Baden-Württemberg unterstützt eine Wasserstoff-Logistik mittels Transportnetz, Schifffahrt, Zug und Straße. Dabei gilt es, die Wasserstoffversorgung mit einer globalen Lieferkette bis zur lokalen Verteilung zu berücksichtigen.

Maßnahme 17:

Zur Unterstützung der Technologie soll die Erzeugung von grünem Wasserstoff in Baden-Württemberg mittels Wasserelektrolyse in angemessener Größenordnung aufgebaut werden. Dadurch soll das Technologiepotenzial zur Eigenerzeugung aufgezeigt und zu Beginn des Markthochlaufs die Versorgung mit grünem Wasserstoff ermöglicht werden.

Maßnahme 18:

Um die Technologie- und Marktreife zu demonstrieren, sollen Projekte zur Speicherung von Wasserstoff unter anderem für dezentrale Anlagen zur Wasserstoffherzeugung gestartet werden. Diese Projekte können auch in Modellregionen integriert werden.

Maßnahme 19:

Die Industrialisierung der Elektrolyse erfordert neue Wege in der Produktion. Dies bietet eine Chance für die Zuliefererindustrie und den Maschinen- und Anlagenbau in Baden-Württemberg. Daher soll die Entwicklung und Produktion von Elektrolyseuren in verschiedenen Skalierungen weiter unterstützt werden.

Maßnahme 20:

Die Industrialisierung der Produktion von Brennstoffzellenstacks soll weiter vorangetrieben werden. Ein Marktanzreizprogramm kann Komponentenhersteller beim Wandel vom Verbrennerzulieferer zum Zulieferer für Brennstoffzellen-Antriebe unterstützen. Zudem sollte die Industrialisierung durch die Vorbereitung einer Brennstoffzellenstack-Fabrik vorangetrieben werden. Weiterer FuE-Bedarf wird adressiert.

Maßnahme 21:

Die Entwicklung und Herstellung von Brennstoffzellensystemen soll unterstützt werden. Dabei kommt es unter anderem auf die Entwicklung und Fertigung von Nebenkomponten für die Brennstoffzellen-Systeme an.

Maßnahme 22:

In den Fahrzeugen stellt der Wasserstofftank einen signifikanten Kostenfaktor dar. Hier müssen neben geeigneten technischen Lösungen auch Ansätze gefunden werden, die Kosten zu reduzieren. Deshalb sollen Projekte zu Tank- und Betankungstechnologien initiiert werden. Dies beinhaltet sowohl die Weiterentwicklung von Druckgastanks als auch Tanks zum Beispiel zur Speicherung kryogenen Wasserstoffs. Betrachtet werden sollen auch die serientaugliche Herstellung sowie die Entwicklung von Betankungsprotokollen.

6.3 MAßNAHMEN FÜR DEN SEKTOR INDUSTRIE

Maßnahme 23:

Die Transformation der Wasserstoffeinsetzenden Industrie hin zur Produktion von grünem Wasserstoff stellt eine besondere Herausforderung dar. In Baden-Württemberg betrifft dies vor allem die Mineralölraffinerie und die Zementherstellung, langfristig die Bereitstellung von Prozesswärme in diversen industriellen Anwendungen. Hier gilt es, zusammen mit den Stakeholdern aus der Industrie, der Wasserstoff-Erzeugung und -Lieferung sowie der Wissenschaft, Ansätze hin zu einer grünen Produktion zu entwickeln. Dies kann durch ein entsprechendes Verbundforschungsprojekt geschehen.

Maßnahme 24:

Die Bewertung von Prozessvarianten in der Industrie für eine klimaneutrale Produktion ist sehr komplex, und es gibt zum Teil große Unsicherheiten hinsichtlich der sinnvollen Transformationspfade. Daher soll ein FuE-Projekt zur techno-ökonomischen und ökologischen Lebenszyklus-Analyse von Prozessen initiiert werden. Dabei sind auch Infrastruktur und Recycling über globale Lieferketten zu betrachten. Mit längerfristiger Perspektive soll die Bereitstellung von Prozesswärme betrachtet werden. Ziel ist es, einen verlässlichen Handlungsrahmen für Politik und Industrie bereitzustellen.

6.4 MAßNAHMEN FÜR DEN SEKTOR MOBILITÄT

Maßnahme 25:

Die Wasserstoffmobilität erfordert ein ausreichendes Tankstellennetz. Baden-Württemberg setzt sich für den weiteren Ausbau des Tankstellennetzes für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge aller Art (Nutzfahrzeuge, Transporter, Busse, kommunale Fahrzeuge, PKW usw.) ein, abhängig vom anfallenden Bedarf. Gerade der Schwerlastgüterverkehr auf der Straße bietet ein großes Potenzial für die Wasserstofftechnologie. Die europäische Emissionsgesetzgebung erfordert einen sehr schnellen Technologiewechsel. Für schwere Nutzfahrzeuge ist ein Tankstellennetz zur Betankung von wasserstoffbetriebenen LKW entlang der Hauptverkehrsrouten wichtig. Der Ausbau des Tankstellennetzes soll in Abstimmung mit den angrenzenden Ländern erfolgen, da der Straßengüterverkehr europäisch betrachtet werden muss.

Maßnahme 26:

Auch der ÖPNV insbesondere in den Großstädten ist von der Verschärfung der europäischen Emissionsgesetzgebung betroffen. Je nach Topographie der Städte und der Länge der Linien bietet die Brennstoffzellentechnologie erhebliche Chancen. Nach einer Analyse der Bedarfe, Kosten und Rahmenbedingungen setzt sich das Land Baden-Württemberg im Rahmen der verfügbaren Mittel für den Aufbau eines wasserstoffbasierten ÖPNV mit Infrastruktur und Brennstoffzellen-Bussen ein.

Maßnahme 27:

Der Industrialisierung der Produktion von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen und -Bussen kommt eine besondere Bedeutung für die Stärkung der heimischen Automobil- und Zuliefererindustrie zu. Das Land plant dementsprechend Maßnahmen zur Unterstützung der Technologie-, Produktions- und Marktentwicklung sowie Demonstration in diversen Anwendungen (Industrie, Kommunen, Reisebusse, usw.). Dazu zählen zu Beginn des Aufbaus auch Umbauten verschiedener Nutzfahrzeugkategorien und -größen, Arbeitsmaschinen und Spezialfahrzeuge.

6.5 MAßNAHME FÜR DEN SEKTOR GEBÄUDE

Maßnahme 28:

Um die Treibhausgasemissionen weiter zu senken, treibt das Land Baden-Württemberg die klimafreundliche Gebäudesanierung und technologieoffen den Einsatz von Effizienztechnologien voran. Auch die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie kann hier eine Rolle spielen. Neben dem Wohnungsbau soll insbesondere der öffentliche und industrielle Sektor berücksichtigt werden. Die Potenziale von stationären Brennstoffzellen- beziehungsweise Wasserstoff-Anwendungen werden als mögliche Option gesehen. Sie sollen ermittelt und insbesondere stromgeführte, hocheffiziente Kraft-Wärme-gekoppelte Anwendungen in Krankenhäusern, Rechenzentren und ähnlichen Einrichtungen geprüft und gegebenenfalls Demonstrationsanlagen unterstützt werden.

6.6 MAßNAHME FÜR DEN SEKTOR STROMERZEUGUNG

Maßnahme 29:

Das Land Baden-Württemberg unterstützt den Einsatz von sogenannten H2ready-Technologien, um in Kraftwerken einen Fuel-Switch, also die Umstellung von fossilen Energien zu erneuerbaren Gasen oder Wasserstoff zu forcieren. Dies wird vor allem im Zusammenhang mit Wartungs- und Sanierungsarbeiten an den betroffenen Kraftwerken geschehen. Der Wasserstoff-Betrieb dieser Kraftwerke wird voraussichtlich erst mit der Verfügbarkeit einer Wasserstoff-Pipeline erfolgen können.

7 Glossar

Blauer Wasserstoff:	aus Erdgas (oder Kohle) gewonnener Wasserstoff, wobei das erzeugte Kohlendioxid abgetrennt und gespeichert oder in weiteren Prozessen genutzt
CCS:	Carbon Capture and Storage - Abscheidung und Sequestrierung von Kohlendioxid
CCU:	Carbon Capture and Utilisation - Abscheidung und Weiterverwendung von Kohlendioxid
CO ₂ :	Kohlendioxid
FuE:	Forschung und Entwicklung
Grauer Wasserstoff:	aus Erdgas über Reformierung oder aus Kohle gewonnener Wasserstoff mit Freisetzung von Kohlendioxid
Grüner Wasserstoff:	mit Hilfe erneuerbarer Energien und Elektrolyse oder aus Biomasse hergestellter Wasserstoff
H ₂ :	Wasserstoff
KMU:	Kleine und mittelständische Unternehmen
LCA:	Life Cycle Assessment - Lebenszyklusanalyse
LH ₂ :	liquid Hydrogen - Flüssigwasserstoff
LKW:	Lastkraftwagen
LOHC:	Liquid Organic Hydrogen Carrier (Thermoöle, die Wasserstoff aufnehmen und bei Temperaturerhöhung freisetzen können)
ÖPNV:	Öffentlicher Personennahverkehr
PKW:	Personenkraftwagen
PtX:	Power-to-X – auf Basis von Strom über Elektrolyse erzeugte Produkte wie Wasserstoff, Methan, Methanol, synthetische Kraftstoffe, Chemikalien etc.

Schwarzer
Wasserstoff:

mit Hilfe von Atomstrom über Elektrolyse gewonnener
Wasserstoff

TWh:

Terawattstunden

Türkiser Wasserstoff:

mit Hilfe von Erdgas-Pyrolyse hergestellter Wasserstoff, wobei der
Kohlenstoff als Feststoff anfällt und somit gebunden und
klimaunschädlich ist

Impressum

Herausgeber:

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Kernerplatz 9

70182 Stuttgart

Telefon: 0711 126-0

Internet: um.baden-wuerttemberg.de

E-Mail: poststelle@um.bwl.de

Konzeption und Redaktion:

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Referat 24 – Wasserstoff, Ressourceneffizienz, Bioökonomie

E-Mail: wasserstoff@um.bwl.de

Konzeption und Ausarbeitung:

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Anna-Lena Klingler, Frieder Schnabel

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Ulf Groos, Christopher Hebling, Achim Schaadt, Tom Smolinka

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Henning Döscher, Simone Kimpeler, Martin Wietschel, Ewa Dönitz, Marius Neuwirth

Titelgestaltung:

unger+ kreative strategien GmbH, Stuttgart

Internet: www.ungerplus.de

Stand: Dezember 2020