

Forschungsbericht BWPLUS

**Emissionsfreier ÖPNV – eine wissenschaftliche Konzeptentwicklung  
zum Aufbau eines regionalen, emissionsfreien Busliniennetzes  
im urbanen Raum (ÖPNV2)**

von

Oliver Ehret, Ralf Wörner, Laura Langenbacher, Daniela Schneider

Hochschule Esslingen

Institut für Nachhaltige Energietechnik und Mobilität

Förderkennzeichen: BWÖPN 19003

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

24. August 2020

## Inhalt

Executive Summary .....	3
1. Hintergrund, Ziele und Vorgehen der Studie ÖPNV2.....	4
2. Regulative Rahmenbedingungen .....	7
2.1. Vorgaben für nachhaltige Kraftstoffe.....	7
2.2. Vorgaben für saubere Antriebe.....	8
3. Geografische Einordnung des Untersuchungsraums .....	10
3.1. Region Stuttgart .....	10
3.2. Rems-Murr-Kreis .....	12
3.2.1. Tankstellen für alternative Kraftstoffe .....	13
3.2.2. StraÙengebundener öffentlicher Personennahverkehr mit Bussen .....	14
3.2.3. Schienengebundener öffentlicher Personennahverkehr .....	15
4. Wasserstoffinfrastrukturen für Mobilitätsanwendungen.....	16
4.1. Solargespeiste Wasserstoffproduktion .....	17
4.2. Wasserstofftankstelle.....	22
5. Fallbeispiel Technologie- und Zukunftspark Waiblingen .....	26
5.1. Solargespeiste Wasserstoffproduktion in Waiblingen .....	27
5.2. Wasserstoffträge durch Elektrolyse.....	28
5.3. Wasserstofftankstelle.....	31
5.4. TCO-Analyse für den Technologie- und Zukunftspark Waiblingen .....	32
6. Emissionsfreie Busse und deren Einsatzpotenziale.....	36
6.1. Übersicht emissionsfreier Antriebskonzepte bei Bussen.....	37
6.1.1. Batterieelektrische Busse und Ladetechnologien .....	38
6.1.2. Detailbetrachtung Brennstoffzellenbusse.....	40
6.2. Einflussfaktoren für Technologieentscheidungen bei Busbeschaffungen .....	42
7. Fallstudien zu emissionsfreien Buslinien im Rems-Murr-Kreis .....	45
7.1. Buslinie 207: Korb – Fellbach .....	46
7.2. Expressbuslinie K3: Endersbach - Stuttgart.....	49
7.3. Gesamtübersicht Technologie- und Kostenwertungen Nullemissionsbusse .....	52
8. Potenziale für weitere H <sub>2</sub> -Anlagen und Elektrobusse in der Region.....	54
8.1. Potenzial erneuerbarer Energie zur Erzeugung grünen Wasserstoffs im Kreis .....	54
8.2. Steigender Bedarf an Nullemissionsbussen aufgrund Clean Vehicles Directive .....	57
8.3. Übertragung fallspezifischer Ergebnisse zu Bussen auf Landkreis und Region.....	59
8.4. Ableitung zukünftiger Bedarfe an Wasserstoff und Elektrolyseuren.....	61
9. Einsatz von Nullemissionstriebwagen auf der Wieslaufalbahn .....	64
9.1. Hintergrund einer möglichen Elektrifizierung der Wieslaufalbahn .....	64

9.2. Technologie- und Kostenanalyse einer möglichen Elektrifizierung .....	65
10. Studienergebnisse und Schlussfolgerungen.....	69
10.1. Vorstellung zentraler Studienergebnisse .....	69
10.2. Schlussfolgerungen und Zukunftsperspektiven .....	73
11. Danksagung .....	75
12. Literatur.....	76
Abkürzungsverzeichnis.....	83
Abbildungsverzeichnis.....	85
Tabellenverzeichnis .....	86

## Executive Summary

Die Studie untersucht die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff, dessen Abgabe an einer Tankstelle und den Betrieb einer Flotte von neun Brennstoffzellenbussen im Raum Waiblingen. Eine Potenzialanalyse ermittelt, inwieweit sich die Ergebnisse aus Waiblingen auf die Region übertragen lassen und welche Perspektiven für den Aufbau weiterer Power-to-X-Anlagen und den Betrieb zusätzlicher Nullemissionsbusse resultieren. Zudem wird der Einsatz von Brennstoffzellentriebzügen auf der nahe gelegenen Wieslautalbahn betrachtet.

Inhaltlich sticht bei allen untersuchten Anwendungsfällen die mangelnde Wirtschaftlichkeit technisch durchaus einsatzfähiger Technologien heraus. Trotz Anrechnung von Fördermitteln können weder die Waiblinger Wasserstoffanlagen noch die untersuchten Nullemissionsbusse- und Züge eine Kostendeckung erreichen. Während Batteriefahrzeuge tendenziell kostengünstiger sind, können teils nur Brennstoffzellenfahrzeuge die betrieblichen Anforderungen erfüllen.

Da andererseits klimapolitische Zielsetzungen und regulative Vorgaben die breite Markteinführung von CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffen und Nullemissionsfahrzeugen erfordern, wird weiterhin eine staatliche Förderung notwendig sein. Angesichts des bislang bestehenden Kostendeltas ist, im Einklang mit der Mitte 2020 verabschiedeten nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung, eine zeitlich befristete Ausweitung des Förderangebots zu begrüßen.

Nichtsdestotrotz ist eine Reduzierung der eigentlichen Technologiekosten v. a. im Bereich Wasserstoff unumgänglich und kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden: Zum einen ist seit langem eine kontinuierliche Kostensenkung insbesondere aufgrund von Lernkurven und Skaleneffekten zu verzeichnen. Zum anderen tragen international stark zunehmende Kommerzialisierungsaktivitäten im Bereich der Wasserstoffmobilität wesentlich zur Kostensenkung bei. Daher ist in den nächsten Jahren ein deutlicher Rückgang der Technologiekosten zu erwarten.

Methodisch und inhaltlich wird klar, dass keines der beiden Antriebskonzepte Batterie oder Brennstoffzelle eine pauschale Überlegenheit für sich reklamieren kann. Sowohl bei der Waiblinger Anlage wie auch den Bussen können lediglich situationsspezifische und nur ansatzweise auf andere Fälle übertragbare Aussagen getroffen werden. Damit sind beide Antriebskonzepte als komplementäre Technologien mit individuellen Vor- und Nachteilen zu verstehen, deren Eignung für bestimmte Anwendungen nur auf Grundlage kontextspezifischer Analysen bestimmt werden kann.

Die nationale Wasserstoffstrategie bietet auf „globaler“ Ebene einen vielversprechenden Rahmen für die weitere Unterstützung der für diese Studie zentralen Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien. Unter den konkreten von der Strategie vorgeschlagenen Maßnahmen ist neben der Ausweitung des Förderangebots insbesondere die avisierte Abschaffung der EEG-Umlage für Power-to-X-Anlagen zu begrüßen. Ebenso sind die Fördermaßnahmen des Landes Baden-Württemberg, wie z. B. in der Kofinanzierung des Projekts H2River  in großem Wert für die weitere Technologieentwicklung.

Erst angesichts der festgestellten zentralen Bedeutung situationsspezifischer Analysen wird auch der ganze Mehrwert der vom Land angebotenen Beratungsgutscheine für Busunternehmer zum Umstieg auf Elektrobusse deutlich. Auf „lokaler“ Ebene ist auch darauf zu achten, bei künftigen Ausschreibungen die mit der Anschaffung von Elektrobussen verbundenen Mehrkosten zu berücksichtigen.

Der Schlüssel zu einer ausgewogenen Elektrifizierung des Busverkehrs scheint in einer Kombination von Technologieförderung auf höherer politischer Ebene und spezifischen Analysen des lokalen Bedarfs zu liegen. So können die jeweils geeignetsten Antriebsoptionen identifiziert und zur Anwendung gebracht werden. ‚Promote global, apply local‘ – so könnte dieser Ansatz in Anlehnung an ein zentrales Credo des Nachhaltigkeitsdenkens auf den Punkt gebracht werden.

## 1. Hintergrund, Ziele und Vorgehen der Studie ÖPNV2

Der Verkehrssektor im Allgemeinen und der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) im Besonderen sieht sich heute mit erheblichen Herausforderungen konfrontiert. Zur Eindämmung des menschengemachten Klimawandels hat sich Deutschland wie auch das Bundesland Baden-Württemberg (BW) zur Erfüllung ehrgeiziger klimapolitischer Ziele verpflichtet: Insbesondere soll bis spätestens 2050 der Ausstoß von Treibhausgas (THG) auf ein Minimum reduziert werden, die Energieversorgung weitestgehend auf erneuerbaren Energien (EE) beruhen und die Effizienz der Energietechnologien erheblich gesteigert werden. Im Verkehrssektor strebt die Bundesregierung bereits 2030 eine THG-Minderung um bis zu 42 Prozent [1] und die Landesregierung Baden-Württemberg um 31 Prozent an [2]. Ähnlich ambitionierte Ziele werden auch für den Ausbau von EE und für Effizienzsteigerungen gesetzt.

Am deutlichsten werden die wachsenden ökologischen Herausforderungen für den Verkehr und speziell den Straßenverkehr in verschiedenen Regelwerken der *Europäischen Union* (EU) sichtbar: Insbesondere verlangen Richtlinien eine erhebliche Minderung des Ausstoßes an Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und verpflichten bereits ab 2021 Kommunen zur Beschaffung emissionsarmer und -freier Fahrzeuge. Andere Regularien legen Mindestanteile für EE-Kraftstoffe wie Strom oder Wasserstoff (H<sub>2</sub>) fest und fördern den Aufbau von Infrastrukturen für alternative Kraftstoffe. Mit Batterie und Brennstoffzelle (BZ) ausgestattete Fahrzeuge sind energetisch hocheffizient und können mit EE-Kraftstoffen betrieben werden. Beide elektrisch angetriebenen und damit den Elektrofahrzeugen zuzuordnenden Fahrzeugarten profitieren von den Regularien. In einigen Fällen können nur Elektrofahrzeuge, nicht aber Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, die regulativen Vorgaben erfüllen. Weiter sind Brennstoffzellen- wie auch Batteriefahrzeuge lokal emissionsfrei, wodurch sie wesentlich zur Einhaltung immissionsrechtlicher Vorgaben zur Luftqualität und damit zur Verhinderung von Fahrverboten in hochbelasteten Städten wie z. B. Stuttgart beitragen können.

Während in den letzten Jahren Batteriefahrzeuge im Vordergrund der Diskussion zu alternativen Antrieben standen, gewinnen BZ-Fahrzeuge in letzter Zeit erheblich an Gewicht. Insbesondere verabschiedete die Bundesregierung im Juni 2020 eine *Nationale Wasserstoffstrategie*, welche erstmals eine Gesamtstrategie der Bundesregierung präsentiert und die bereits zuvor stark ausgeweiteten Aktivitäten einzelner Ministerien bündelt. Die Strategie unterstützt die Herstellung von EE-Wasserstoff und den Einsatz von BZ-Fahrzeugen nachdrücklich und kündigt die Bereitstellung von mehr als 10 Milliarden Euro zusätzlicher Fördermittel für H<sub>2</sub>- und BZ-Technologien an [3]. Auch das Land Baden-Württemberg erarbeitet eine *Wasserstoff-Roadmap* und weitet seine Förderaktivitäten z. B. in dem gemeinsam mit dem Bund geförderten Großprojekt *H2Rivers* der Metropolregion Rhein-Neckar aus [4].

Vor dem Hintergrund verschärfter regulativer Vorgaben auch für schwere Nutzfahrzeuge sowie wachsender Praxiserfahrung mit batterieelektrischen Antrieben setzt sich zunehmend die Erkenntnis durch, dass Letztere nur für einen Teil der Mobilitätsanforderungen überzeugende Lösungen bieten. Gerade für schwere Nullemissionsfahrzeuge mit hohen Anforderungen an Leistung, Reichweite und betrieblicher Flexibilität sind BZ-Fahrzeuge eine vielversprechende Alternative. Hier können systemtypische Vorteile wie z. B. größere Reichweiten und kurze Betankungszeiten ausgespielt werden. Demgegenüber stehen tendenziell höhere Kosten von brennstoffzellenelektrischen Antrieben.

Insgesamt erwartet die nationale Wasserstoffstrategie einen erheblichen Bedeutungszuwachs von Brennstoffzellenfahrzeuge gerade auch im ÖPNV: „Die Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen kann u. a. im Öffentlichen Personennahverkehr (Busse, Züge), in Teilen des Straßenschwerlastverkehrs (Lkw), bei Nutzfahrzeugen [...] oder in der Logistik (Lieferverkehr und andere Nutzfahrzeuge [...]) die batterieelektrische Mobilität ergänzen und den Ausstoß von Luftschadstoffen sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen

erheblich senken. Auch in bestimmten Bereichen bei Pkws kann der Einsatz von Wasserstoff eine Alternative sein. Der Einsatz im Straßenverkehr setzt den bedarfsgerechten Aufbau der erforderlichen Tankinfrastruktur voraus“ [4].

Das Land und dessen Gebietskörperschaften stehen in der Verantwortung, im Rahmen der geschilderten rechtlichen Vorgaben einen ökologisch nachhaltigen, wirtschaftlich tragbaren und für den Bürger attraktiven ÖPNV zu gewährleisten. Als direkter Betreiber oder Auftraggeber für privatwirtschaftliche Verkehrsunternehmen sind die Kommunen den o. g. Beschaffungsvorgaben unterworfen. Überdies erfüllt Stand 2018 nur ein Drittel des Busbestands die aktuelle Euro VI-Norm [5]. Der Austausch eines Großteils der Busflotten ist damit in den nächsten Jahren unerlässlich. Insoweit die Beschaffung emissionsfreien Fahrzeugen gilt, kommen nur Batterie- und BZ-Busse in Frage.

Angesichts des großen Handlungsdrucks und der wachsenden Bedeutung von BZ-Antrieben besteht die dringende Notwendigkeit, den bislang begrenzten Wissensfundus auszubauen und verantwortlichen Entscheidungsträgern aus Politik und Unternehmen anwendungsorientiertes Wissen zur Ausgestaltung des ÖPNV zur Verfügung zu stellen. Da bislang deutlich mehr Erfahrungswerte und Veröffentlichungen zu Batteriefahrzeugen vorliegen, herrscht insbesondere hinsichtlich von wasserstoffbetriebenen BZ-Fahrzeugen Forschungsbedarf.

Die vorliegende Studie nimmt sich dieser Aufgabe an und untersucht ganzheitlich die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff, dessen Abgabe an einer Tankstelle und den Betrieb einer Flotte von neun BZ-Bussen im urbanen Raum Waiblingen. Dabei werden die Vor- und Nachteile des Einsatzes von BZ-Bussen insbesondere im Vergleich zu Batteriebussen in funktioneller, technischer und wirtschaftlicher Hinsicht bewertet. Ergänzend wird auch der Einsatz von BZ-Triebzügen auf der nahe gelegenen *Wieslaftalbahn* betrachtet. Eine Potenzialanalyse untersucht, inwieweit sich die Ergebnisse aus der zentralen Fallstudie Waiblingen auf den Landkreis Rems-Murr und die Region Stuttgart übertragen lassen und welche Schlussfolgerungen für den Betrieb von BZ-Bussen und H<sub>2</sub>-Anlagen sich hieraus ergeben.

Das Konzept dieser Studie entstand vor dem Hintergrund konkreter Gespräche zwischen den Initiatoren des oben skizzierten Waiblinger Projekts und einem weiten Kreis von Unterstützern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. Eine Umsetzung unter Zuhilfenahme staatlicher Fördermittel wurde angestrebt und damit vertiefende Untersuchungen zur Machbarkeit und Eigenschaften des Vorhabens erforderlich. Das Land Baden-Württemberg entschloss sich zur Ausschreibung der vorliegenden Forschungsarbeit, um ÖPNV-Verantwortliche im hier untersuchten und in potentiellen weiteren Anwendungsfällen bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen. Ende 2019 wurde eine prinzipielle Förderzusage für das Waiblinger Projekt im Rahmen von H<sub>2</sub> Rivers erteilt und die formelle Genehmigung wird für Herbst 2020 erwartet [6]. Gremienbeschlüsse der Stadt Waiblingen und des Rems-Murr-Kreises unterstützen die Realisierung von H<sub>2</sub>-Anlagen und Busbetrieb [7].

Die vorliegende Studie verfolgt zwei zentrale Zielsetzungen:

- (1) Die Verantwortlichen des Waiblinger Vorhabens, sowie potentielle weitere Anwender insbesondere im Großraum Stuttgart, sollen bei ihren Entscheidungsprozessen unterstützt werden. Entsprechend der Realisierungsabsicht stehen fahrzeugseitig BZ-Busse im Fokus.
- (2) Angesichts der geringen Anzahl verfügbarer Studien zum Einsatz von BZ-Bussen unter Nutzung von lokal hergestelltem und abgegebenem EE-H<sub>2</sub> soll ein auch wissenschaftlich relevanter Beitrag zur Beseitigung der bestehenden erheblichen Wissensdefizite geleistet werden.

Die Untersuchung geht vier Leitfragen nach:

- (1) Welche technische Auslegung einer Anlage zur Produktion und Abgabe von EE-H<sub>2</sub> für die Versorgung einer kleinen Flotte von BZ-Bussen empfiehlt sich im Anwendungsfall Waiblingen und welche Gesamtbetriebskosten entstehen?
- (2) Welches der beiden Antriebskonzepte Brennstoffzelle oder Batterie ist für die Bedienung zweier gesetzten Linien im Landkreis Rems-Murr besonders geeignet und welche Kostendifferenz zum Dieselantrieb besteht?
- (3) Inwieweit sind die Ergebnisse auf den Rems-Murr-Kreis und den Großraum Stuttgart übertragbar und welche Schlussfolgerungen ergeben sich hinsichtlich der Potenziale für den Einsatz von Wasserstoffanlagen und BZ-Bussen?
- (4) Inwieweit und zu welchen Gesamtbetriebskosten ist der Betrieb von elektrischen und insbesondere Brennstoffzellen-Triebzügen im gegebenen Fall Wieslaufalbahn realisierbar?

Zur Beantwortung der genannten Fragestellungen werden sieben Arbeitsstränge verfolgt:

- (1) In den anwendungsbezogenen Kapiteln 4 bis 7 werden die Detailanalysen zu den H<sub>2</sub>-Anlagen und BZ-Bussen durchgeführt.
- (2) Diverse Infoboxen liefern Hintergrundwissen und ermöglichen die Anbindung der Falluntersuchungen an die weitere wissenschaftliche Literatur.
- (3) Kapitel 2 stellt regulative Rahmenbedingungen dar, welche für die Kommerzialisierung von Nullemissionsfahrzeugen antriebs- und kraftstoffseitig von zentraler Bedeutung sind.
- (4) Kapitel 3 führt in den geographischen Untersuchungsraum ein.
- (5) Die Potenzialanalyse von Kapitel 8 erforscht, inwieweit die Ergebnisse der lokalen Detailanalysen zu H<sub>2</sub>-Anlagen und Bussen auf den Landkreis und die Region übertragbar sind und welche Schlussfolgerungen zum Einsatzpotenzial sich daraus ergeben.
- (6) Kapitel 9 untersucht ergänzend Anwendungsperspektiven von BZ-Triebzügen.
- (7) Kapitel 10 führt die Ergebnisse zusammen und zieht übergeordnete Schlussfolgerungen.

## 2. Regulative Rahmenbedingungen

Die Zukunftsperspektiven von Antriebskonzepten werden sowohl fahrzeug- wie auch kraftstoffseitig wesentlich von regulativen Vorgaben der Europäischen Union und ihrer Mitgliedsstaaten beeinflusst [8]. Nachfolgend werden die für die im Zentrum der Studie stehenden Nahverkehrsbusse bedeutsamsten Regularien vorgestellt. Die EU-Regularien werden von der EU-Kommission in Zusammenarbeit mit den Mitgliedsstaaten erarbeitet und per Überführung in nationales Recht durch Letztere umgesetzt. Gesetze auf Ebene der Mitgliedsstaaten bzw. Deutschlands ergänzen das EU-Recht. Regularien beiderlei Herkunft üben einen starken Einfluss auf die Situation in Deutschland und Baden-Württemberg aus.

### 2.1. Vorgaben für nachhaltige Kraftstoffe

Kraftstoffseitig ist insbesondere die *Renewable Energy Directive* (RED) von 2009 von Bedeutung und zielt darauf, den Anteil erneuerbarer Energien an der Energieversorgung der EU zu erhöhen. Speziell für den Verkehrssektor sah die ursprüngliche RED vor, dass bis 2020 mindestens zehn Prozent des in allen Mitgliedsstaaten verwendeten Kraftstoffs auf EE basieren. Die Ende 2018 verabschiedete Überarbeitung *RED II* erhöht den EE-Anteil an Kraftstoffen auf 14 Prozent mit Zieljahr 2030 und erkennt Wasserstoff aus erneuerbarem Strom und daraus synthetisierte Kraftstoffe als anrechnungsfähige EE-Kraftstoffe an. Auch der Einsatz von EE-H<sub>2</sub> in Raffinerien für die Herstellung konventioneller Kraftstoffe kann auf die Quote angerechnet werden [9]. Während noch nicht alle Fragen zur bis Mitte 2021 geforderten Umsetzung der Richtlinie in nationales Recht geklärt sind, entsteht doch zweifellos ein mächtiger Nachfragetreiber für EE-Kraftstoffe einschließlich von EE-H<sub>2</sub>. Dies gilt umso mehr, als dass die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung vom Juni 2020 vorsieht, den Mindestanteil erneuerbarer Energien im Verkehr signifikant und über die Vorgaben der EU hinaus zu erhöhen. EE-H<sub>2</sub> als Kraftstoff und Produktionsmittel in Raffinerien sollen dabei, ebenso wie die gesicherte Anrechenbarkeit auf Quoten und der Aufbau von Wasserelektrolysekapazitäten, eine zentrale Rolle spielen [3].

Für die Herstellung von Wasserstoff mittels Wasserelektrolyse ist der in Deutschland herrschende nationale energierechtliche Rahmen von erheblicher Bedeutung. Dieser sieht vor, dass die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff als Letztverbraucher behandelt wird, obgleich der Wasserstoff als Energiespeicher auch für verkehrliche Anwendungen dient und zunächst nicht genutzt bzw. „verbraucht“ wird. Bei Letztverbrauchern fallen im Regelfall alle gesetzlichen Strompreisbestandteile und insbesondere Umlagen gemäß des *Erneuerbare-Energien-Gesetzes* (EEG), Netzentgelte und Energiesteuern an. Können keine Ausnahmetatbestände wie z. B. das *Eigenstromprivileg* geltend gemacht werden, verteuern diese Strompreisbestandteile die Wasserstoffproduktion erheblich. Die Fachliteratur stimmt weitestgehend darin überein, dass die Aufwendungen einen wirtschaftlichen Betrieb von Elektrolyseanlagen zur Gewinnung von EE-H<sub>2</sub> für den Verkehr unmöglich machen [10, 11]. Die nationale Wasserstoffstrategie erteilt einen Prüfauftrag auch hinsichtlich der Frage, „ob zur Herstellung von grünem Wasserstoff verwendeter Strom weitgehend von Steuern, Abgaben und Umlagen befreit werden kann“ [3] (siehe Infobox 2-1). Insbesondere strebt die Strategie „die Befreiung der Produktion von grünem Wasserstoff von der EEG-Umlage an“ [3]. Während dies die Beseitigung wesentlicher Hürden für die wirtschaftlich tragbare Versorgung des Verkehrs mit EE-H<sub>2</sub> in Aussicht stellt, müssen die nachteiligen Rahmenbedingungen einstweilen noch eingepreist werden.

Die *Alternative Fuels Infrastructure Directive* (AFID) aus dem Jahr 2014 unterstützt den Aufbau von Betankungsinfrastruktur für alternative Kraftstoffe für den Straßenverkehr. Die AFID zielt darauf, eine EU-weite Mindestabdeckung alternativer Kraftstoffinfrastrukturen für strom-, wasserstoff- und erdgasbetriebene Fahrzeuge zu gewährleisten. Die Mitgliedsstaaten wurden zur Erstellung von *Nationalen Strategierahmen* aufgerufen. Obgleich die Staaten nicht zur Berücksichtigung von H<sub>2</sub> verpflichtet

wurden, legten 14 Länder Strategien zum Auf- bzw. Ausbau von Wasserstoffinfrastrukturen bis 2025 vor. Deutschland gehört zu diesen Staaten und präsentierte einen der ehrgeizigsten Strategierahmen [12]. Die AFID verankert H<sub>2</sub> als alternativen Kraftstoff und die Notwendigkeit des Aufbaus entsprechender Infrastruktur fest im Kanon entsprechender Regularien und stärkt so das politische Gewicht der H<sub>2</sub>-Mobilität erheblich. Auch hier unterstützt die nationale Wasserstoffstrategie ein ambitioniertes Vorgehen bzw. den Ausbau grenzüberschreitender H<sub>2</sub>-Betankungsinfrastruktur [3].

#### Infobox 2-1: Farbenlehre Wasserstoff

In der nationalen Wasserstoffstrategie wird der Fokus bewusst auf die Nutzung von grünem Wasserstoff gelegt. Dabei gibt die Farbe des stets farblosen Gases Auskunft über die Art der Herstellung [13]:

**Grüner Wasserstoff:** Die Herstellung von grünem Wasserstoff erfolgt über Wasserelektrolyse, wobei der eingesetzte Strom aus 100 Prozent erneuerbaren Energien stammt. Die Produktion erfolgt somit CO<sub>2</sub>-frei.

**Grauer Wasserstoff:** Bei der Herstellung von grauem Wasserstoff wird Erdgas unter Hitze in Wasserstoff und CO<sub>2</sub> umgewandelt, wobei der Treibhauseffekt durch die Freisetzung von ungenutztem CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre verstärkt wird. Dieses Verfahren wird als Dampfreformierung bezeichnet.

**Blauer Wasserstoff:** Das Verfahren zur Herstellung ist bei blauem und grauem Wasserstoff gleich, jedoch wird bei blauem Wasserstoff das CO<sub>2</sub> abgetrennt und gespeichert (Carbon Capture and Storage: CCS), wodurch eine bilanzielle CO<sub>2</sub>-Neutralität vorliegt.

**Türkiser Wasserstoff:** Über die thermische Spaltung von Methan kann Wasserstoff sowie fester Kohlenstoff hergestellt werden. Sofern das Verfahren durch erneuerbaren Energiequellen gespeist und der Kohlenstoff dauerhaft gebunden wird, liegt eine CO<sub>2</sub>-Neutralität vor.

## 2.2. Vorgaben für saubere Antriebe

Einer der wesentlichsten Treiber für die Kommerzialisierung alternativer Antriebskonzepte sind EU-Regularien zur Begrenzung des Ausstoßes von Kohlendioxid der von den Fahrzeugherstellern vertriebenen Fahrzeugflotten. Nachdem Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bereits seit 2009 einer CO<sub>2</sub>-Regulierung unterworfen sind, wurden im Jahr 2019 erstmals CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge verabschiedet und sehen gegenüber 2019 anspruchsvolle Emissionsminderungen von 15 Prozent im Jahr 2025 und um 30 Prozent 2030 vor. Bei Nichterreichung werden empfindliche und zunehmend strenger gehandhabte Strafzahlungen für die jeweiligen Hersteller fällig. Diese belaufen sich auf 4.250 € pro g/tkm Grenzwertüberschreitung ab 2025 und auf 6.800 Euro pro g/tkm ab 2030. Demgegenüber werden Hersteller besonders emissionsarmer Fahrzeuge begünstigt und diese als *zero- and low-emission vehicles* überproportional gewichtet auf ihre Zielerfüllung anrechnen [14]. Die CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge sind mit konventionellen Verbrennungsmotoren kaum zu erreichen und die zu erwartenden Strafzahlungen beeinflussen die Gesamtbetriebskosten negativ. Überdies steigern die Anreize für besonders emissionsarme Fahrzeuge die Attraktivität der lokal emissionsfreien Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge.

Die *Clean Vehicles Directive* (CVD) von 2009 verpflichtet Mitgliedsstaaten und die darin ansässigen öffentlichen Behörden und Unternehmen zur Beschaffung emissionsarmer Fahrzeuge. Im Juni 2019 wurde eine wesentlich verschärfte Version beschlossen, die innerhalb von zwei Jahren in nationales Recht umgesetzt werden muss. Bei öffentlichen Beschaffungsmaßnahmen müssen verbindliche Mindestquoten für emissionsarme bzw. -freie Fahrzeuge eingehalten werden, die je nach Fahrzeugklasse, EU-Mitgliedsland und Zieljahr variieren. Die Mindestquoten können durch nationale Zielsetzungen zu-

sätzlich erhöht werden und sind auch bestimmten privaten Akteuren, z. B. öffentlich beauftragten privaten Busbetreibern, gegenüber bindend. Neben leichten Nutzfahrzeugen werden auch Lkw und Busse reguliert. Bei Letzteren müssen einerseits emissionsarme alternative Antriebskonzepte genutzt und z. B. Brennstoffzellen, Batterie- und Erdgasfahrzeuge angeschafft und andererseits lokal quasi emissionsfreie Fahrzeuge mit einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß von unter 1 g/kWh oder g/km eingesetzt werden. In Deutschland müssen ab August 2021 bereits 10 Prozent der Lkw und 45 Prozent der Busse emissionsarm sein und ab 2026 Mindestanteile von 15 bzw. 65 Prozent erreicht werden. Überdies ist die Hälfte der Beschaffungsziele für Busse durch emissionsfreie Fahrzeuge, im Wesentlichen also Brennstoffzellen- oder Batteriebusse zu erfüllen [15]. Da die CVD insbesondere hinsichtlich von Bussen große Teile gerade für BZ-Antriebe besonders geeigneter Märkte reguliert, kann die Richtlinie als ausgesprochen wirksamer Treiber H<sub>2</sub>-basierter Mobilität gelten. Letztendlich verbleiben bei allen nicht für Batterieantriebe geeigneten Busrouten nur Brennstoffzellenfahrzeuge als Alternative [8]. Die Auswirkung der CVD auf die voraussichtliche Busbeschaffung in der Region Stuttgart wird im Rahmen der Potenzialanalyse (Kapitel 7.3) näher untersucht. Dort wird auch der Tatsache Rechnung getragen, dass die nationale Wasserstoffstrategie wiederum auf eine zielführende Umsetzung dringt [3].

Eine wichtige Entwicklung ist die bereits 2017 angestoßene, aber noch nicht rechtskräftig beschlossene, EU-weite Einführung von CO<sub>2</sub>-abhängigen Autobahnmautgebühren in den nächsten Jahren. Betroffen sind nahezu alle Fahrzeugklassen, von Pkw bis hin zu schweren Lkw. Erstmals soll eine Differenzierung der Mautgebühren je nach CO<sub>2</sub>-Ausstoß möglich werden, welche erhebliche Vergünstigungen für emissionsfreie Fahrzeuge vorsieht. Unter anderem sollen batterie- und brennstoffzellenbetriebene Lkw wesentlich geringere Gebühren als Dieselfahrzeuge entrichten müssen [16]. Während das letztendliche Ausmaß der Vergünstigungen für Nullemissionsfahrzeuge abzuwarten bleibt, stärkt der laufende Gesetzgebungsprozess bereits heute die Position alternativer Antriebe.

### 3. Geografische Einordnung des Untersuchungsraums

Wie bereits der Einleitung erläutert, entstand das Konzept dieser Studie vor dem Hintergrund konkreter Gespräche zwischen den Initiatoren des im Zentrum dieser Untersuchung stehenden Technologieprojekts und diversen Unterstützern. Wie auch in Kapitel 4 ausgeführt, war damit Waiblingen als große Kreisstadt des Landkreises Rems-Murr als geographischer Fokus des Untersuchungsraums gesetzt. Die Nähe zu Stuttgart als Hauptstadt des Bundeslandes Baden-Württemberg und Zentrum der Mobilitätsregion Großraum Stuttgart stärkt die Relevanz des untersuchten Standorts weiter. Der ÖPNV im Rems-Murr-Kreis (RMK) ist von einer hohen Anzahl an Busverbindungen und erheblichen Unterschieden zwischen kürzeren, vorwiegend urbanen und längeren, eher ländlichen Buslinien gekennzeichnet, was angesichts des vielfältigen Angebots an in die Untersuchung einbeziehbar Linien von großem analytischen und praktischen Wert ist. Auch aufgrund der politischen Unterstützung des untersuchten und für Baden-Württemberg wegweisenden Projekts ist der Fall von großem Interesse.

#### 3.1. Region Stuttgart

Die Region Stuttgart setzt sich aus der Landeshauptstadt Stuttgart und den umliegenden Landkreisen zusammen. Wie in Abbildung 3-1 dargestellt, umfasst die Region die Landkreise Esslingen am Neckar, Böblingen, Göppingen, der Rems-Murr-Kreis, sowie Ludwigsburg. In den 179 Kommunen der wohlhabenden und wirtschaftlich stark durch die Automobilindustrie geprägten Region leben 2,8 Millionen Menschen [17].

Der Schienenverkehr bildet das Rückgrat des Angebots an öffentlichem Personennahverkehr der Region. Mit den sieben S-Bahn Linien, welche auf einem Schienennetz mit mehr als 200 km Länge verkehren, werden über 80 Haltestellen bedient. Zudem wird die S-Bahn durch einen regionalen Expressbus ergänzt, sowie durch zahlreiche Neben- und Regionalbahnen. Weiterhin existieren in Stuttgart 15 Stadtbahnlinien, sowie eine Zahnrad- und eine Standseilbahn. Das Angebot wird durch mehrere Hundert Buslinien abgerundet, welche in der Region verkehren [18].

Im Bereich des ÖPNV ist Stuttgart wie auch Böblingen, Ludwigsburg, Esslingen und der Rems-Murr-Kreis im *Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart (VVS)* organisiert. Der VVS koordiniert den ÖPNV und stellt die Einheitlichkeit von Tarifen, Fahrgastinformationen, sowie Fahrplänen sicher. Weitere Aufgaben beinhalten den Ausbau des Verkehrsnetzes, Verkehrserhebungen, sowie Marketing und Öffentlichkeits-/Pressearbeit [19].

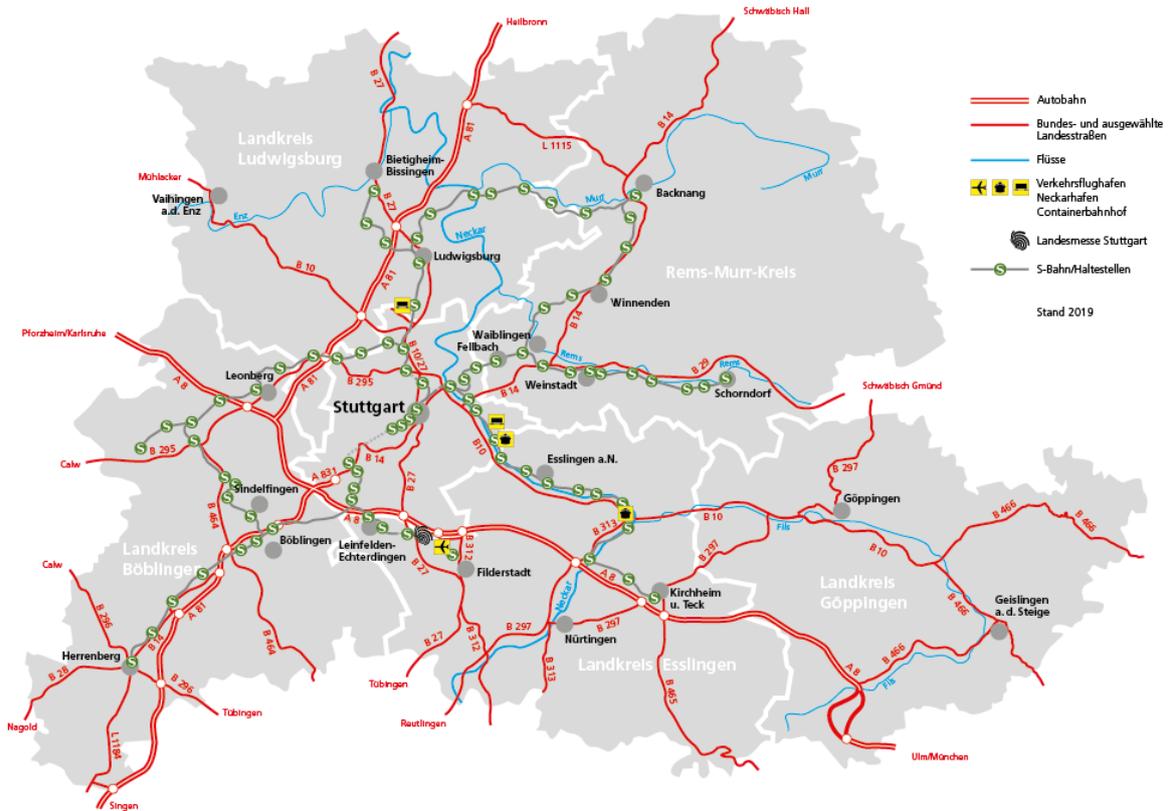


Abbildung 3-1: Region Stuttgart [17]

Nach Angaben des *Kraftfahrt-Bundesamts* (KBA) sind in den sechs Kreisen insgesamt 1.838 Kraftomnibusse zugelassen [20]. Nach Definition des KBA ist ein Kraftomnibus ein „Nutzfahrzeug, das nach seiner Bauart und Einrichtung zur Beförderung von mehr als 9 Personen (einschließlich Fahrzeugführer) und ihres Reisegepäcks bestimmt ist. Es kann ein oder zwei Decks [...] aufweisen [...]“ [21]. Nachfolgend wird statt des Begriffs *Kraftomnibus* der Terminus *Bus* verwendet.

Die Verteilung der Busse über die Zulassungsbezirke ist in Abbildung 3-2 dargestellt. In Baden-Württemberg gibt es 9.178 Busse, von denen 6.803 (74,1 Prozent) der Haltergruppe *Verkehr und Lagerei* zugeordnet sind [22]. Zu dieser Haltergruppe gehören: der Landverkehr und der Transport mittels Rohrfernleitungen, die Schifffahrt, die Luftfahrt, die Lagerei und Erbringung sonstiger Dienstleistungen für den Verkehr, sowie Post-, Kurier- sowie Expressdienste. Dem *Landverkehr und dem Transport mittels Rohrfernleitungen* ist unter anderem die Kategorie *Personenbeförderung zu Lande im Nahverkehr (ohne Taxis)* zugeordnet, zu der die *Personenbeförderung im Orts- und Nahverkehr zu Lande* gehört. Dabei kommen unter anderem Omnibusse zum Einsatz, die auf festgelegten Strecken nach einem festen Fahrplan Fahrgäste zu vordefinierten Haltestellen transportieren [23]. Wird davon ausgegangen, dass die Verteilung von 74,1 Prozent für den Verkehr und die Lagerei so auch in der Region Stuttgart besteht, ergeben sich die zwei in Abbildung 3-2 dargestellten Gruppen.

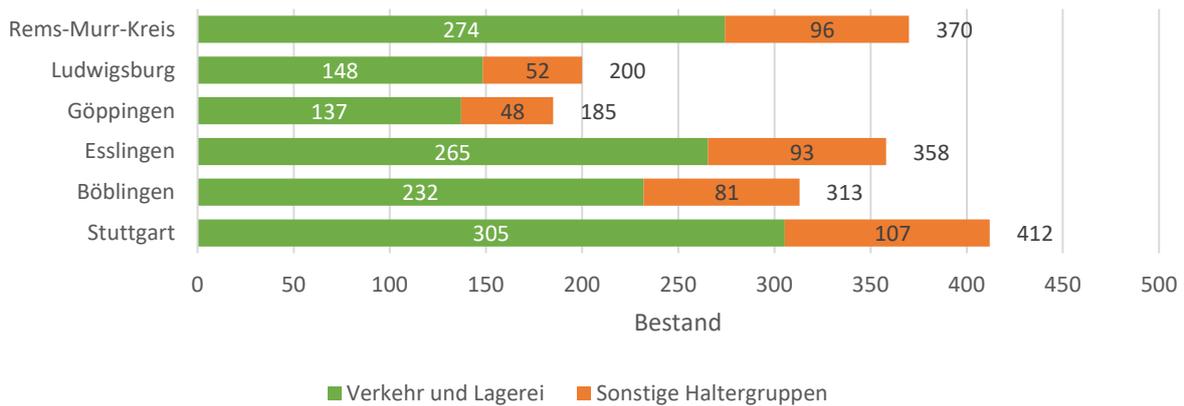


Abbildung 3-2: Bestand Kraftomnibusse in der Region Stuttgart nach Zulassungsbezirk und Haltergruppe [20, 22]

In Deutschland gibt es insgesamt 80.519 Busse. Von diesen sind 21.767 drei- oder mehrachsrig (ca. 27 Prozent). Die übrigen 73 Prozent sind zweiachsrig. 2,2 Prozent (1.757 Busse) haben weniger als 17 Sitzplätze. Bei den restlichen Bussen ist davon auszugehen, dass sie Solobusse sind und mit 56.995 Bussen 70,8 Prozent des Gesamtbestands ausmachen [24]. Die in der vorliegenden Studie vorrangig betrachteten Brennstoffzellen- und Batteriebusse sind Solobusse, weshalb hier deren Bestand identifiziert wird. Unter der Annahme, dass 70,8 Prozent der für Verkehr und Lagerei aufgezeigten Busse Solobusse sind, ergibt sich für die verschiedenen Kreise der in Abbildung 3-3 dargestellte Bestand.

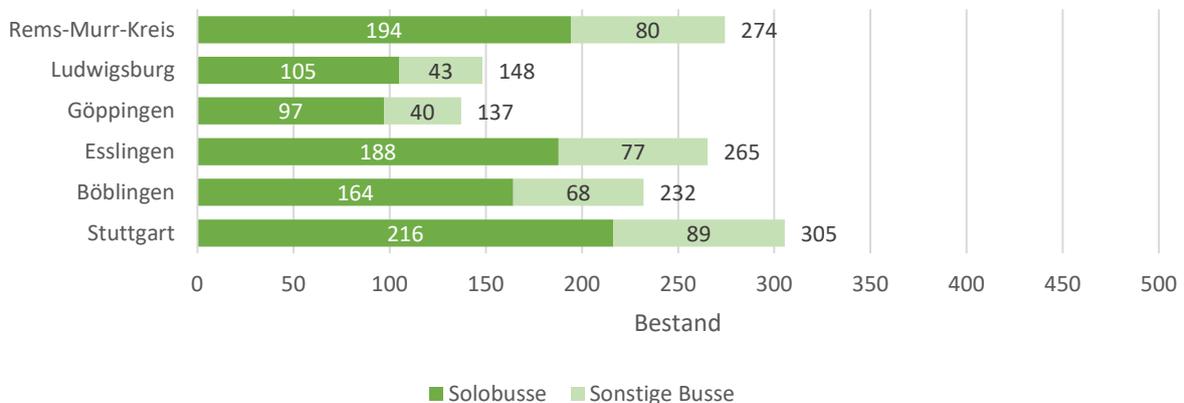


Abbildung 3-3: Bestand Solobusse in der Region Stuttgart nach Zulassungsbezirk [20, 24]

### 3.2. Rems-Murr-Kreis

Der Rems-Murr-Kreis liegt in der Region Stuttgart (Abbildung 3-1) [25] und grenzt an die Landkreise Stuttgart, Ludwigsburg, Heilbronn, Schwäbisch Hall, Göppingen, Esslingen sowie den Ostalbkreis [26]. Der Name geht auf die beiden im Kreis verlaufenden Flüsse Rems und Murr zurück (Abbildung 3-4). Mit 426.635 Einwohnern Stand Juni 2019 ist der Landkreis ein Großkreis. Zu ihm gehören insgesamt 31 Städte und Gemeinden, darunter sechs große Kreisstädte [25]. Der RMK umfasst eine Gesamtfläche von 85.800 Hektar. 18 Prozent davon sind Siedlung und Verkehr vorbehalten, 82 Prozent bestehen aus Naturflächen. Im Landkreis gibt es Straßen mit einer Gesamtlänge von 779 km. Zudem verlaufen 84 km

Schienennetz durch den RMK [26]. Im Vergleich zur Landeshauptstadt Stuttgart ist der RMK eher ländlich geprägt, was hinsichtlich der vergleichenden Analyse alternativer Antriebskonzepte hilfreich ist.



Abbildung 3-4: Darstellung Rems-Murr-Kreis [26]

### 3.2.1. Tankstellen für alternative Kraftstoffe

Gemäß der bereits in Kapitel 2 angesprochenen Alternative Fuels Infrastructure Directive sind alternative Kraftstoffe „Kraftstoffe oder Energiequellen, die zumindest teilweise als Ersatz für Erdöl als Energieträger für den Verkehrssektor dienen und die zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen und die Umweltverträglichkeit des Verkehrssektors erhöhen können“ [27]. Die Richtlinie zählt u. a. Wasserstoff, Elektrizität und Erdgas einschließlich von Biomethan zu den alternativen Kraftstoffen. Im Rems-Murr-Kreis gibt es vier Erdgas- und eine Wasserstofftankstelle, deren Standorte in Abbildung 3-5 markiert sind. Die Tankstelle in Fellbach vertreibt sowohl Erdgas wie auch Wasserstoff. Für die Betankung von Erdgasbussen sind lediglich die Tankstellen in Waiblingen und Murrhardt geeignet [28]. Die fellbacher H<sub>2</sub>-Tankstelle ist nur für BZ-Pkw ausgelegt und verfügt über für Pkw-typische 700-bar-Druckwasserstoff-Betankungstechnologie [29]. Wie in Kapitel 5 weiter ausgeführt, sind BZ-Busse mit 350-bar-Technologie ausgestattet und können daher nicht in Fellbach tanken [30]. Dies bedeutet, dass bislang zur Versorgung von BZ-Bussen im RMK keine Tankstellen zur Verfügung stehen und daher bei Bedarf erst errichtet werden müssten.



Abbildung 3-5: Tankmöglichkeiten alternativer Kraftstoffe [28, 31]

### 3.2.2. Straßengebundener öffentlicher Personennahverkehr mit Bussen

Insgesamt werden im Rems-Murr-Kreis über 100 Buslinien betrieben und 1.548 Bushaltestellen angefahren [32]. Einige Linien überwinden die Grenzen des Landkreises. Neun Linien verfügen über keine Konzession des RMK, sondern werden von Esslingen bzw. Ludwigsburg aus bedient. Die Buslinien des Rems-Murr-Kreis sind in 14 Linienbündel aufgeteilt, welche von acht Busunternehmen betrieben werden. Ein Linienbündel umfasst mehrere regional zusammenhängende Buslinien. Zudem betreiben die *Stuttgarter Straßenbahnen (SSB)* drei Linien [33]. Abbildung 3-6 zeigt das Busliniennetz im Rems-Murr-Kreis und seiner Umgebung auf. Hier wird ersichtlich, welche Linien überhaupt existieren und daher für den Einsatz von Brennstoffzellen- und Batteriebussen prinzipiell in Betracht kommen.

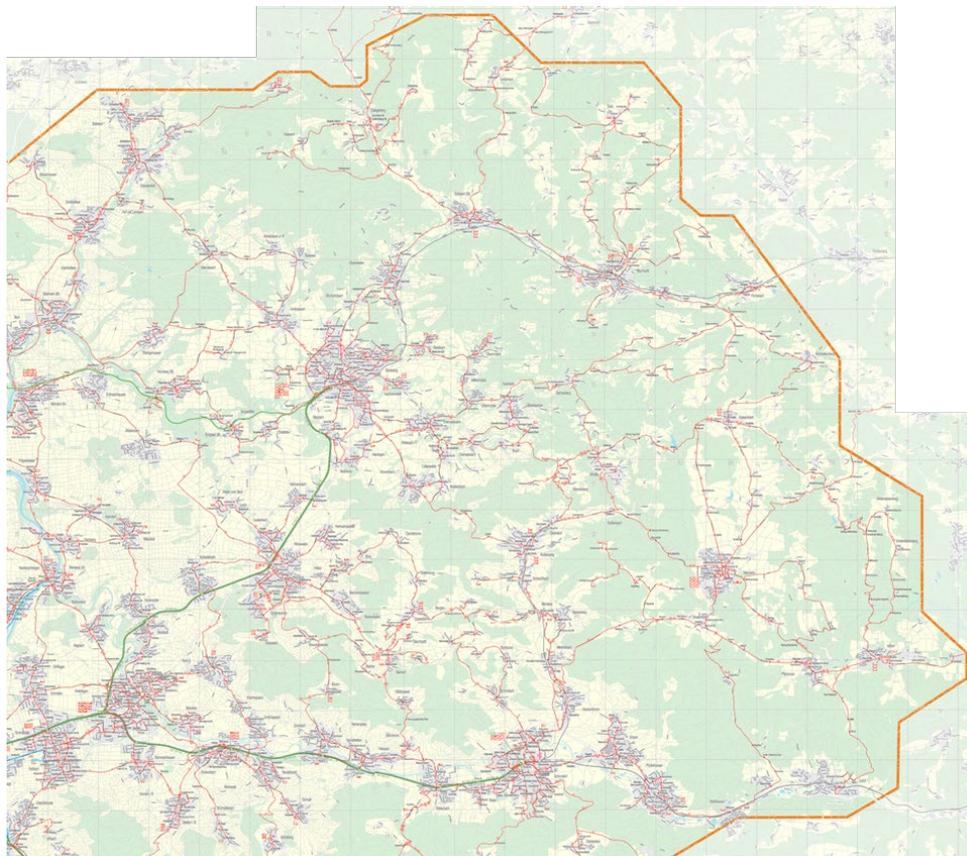


Abbildung 3-6: Busliniennetz im Rems-Murr-Kreis [34]

### 3.2.3. Schienengebundener öffentlicher Personennahverkehr

Auch der schienengebundene ÖPNV im Rems-Murr-Kreis ist in den Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart integriert (Abbildung 3-7). Die S-Bahn-Linien S2, S3 und die Verlängerung der S4 führen in den Landkreis. Zudem wird das Netz durch die Wieslauffalbahn erweitert [35]. Die Strecken im RMK sind in der Abbildung mit einer roten Linie markiert. Damit werden die Strecken dargestellt, die prinzipiell für die in Kapitel 9 betrachtete Nutzung von Brennstoffzellen- und Batteriezügen in Frage kommen. Insbesondere wird dort die Wieslauffalbahn untersucht.



Abbildung 3-7: VVS-Schiennetz [36]

## 4. Wasserstoffinfrastrukturen für Mobilitätsanwendungen

Zur Umsetzung einer erfolgreichen, sektorenübergreifenden Energiewende bedarf es einer „Kombination von Versorgungssicherheit, Bezahlbarkeit und Umweltverträglichkeit mit innovativem und intelligentem Klimaschutz“ [3]. Durch das nationale Ziel des Ausbaus erneuerbarer Energien auf mindestens 80 Prozent bis 2050 entsteht ein hoher Bedarf an Speicher- und Konversionstechnologien, zu dessen Deckung *Power-to-X-Anlagen* (PtX-Anlagen) auch hinsichtlich der Sektorenkopplung einen wichtigen Beitrag leisten können (siehe Infobox 4-1). Insbesondere ermöglichen PtX-Anlagen die Integration fluktuierender erneuerbaren Stroms, die Wandlung in Wasserstoff per Wasserelektrolyse, dessen Speicherung und Abgabe an Verbraucher im Verkehr, der stationären Energieversorgung, sowie Industrie [37]. Angesichts der in Kapitel 2 beschriebenen regulativen Herausforderungen kommt einer umweltfreundlichen Ausgestaltung des Verkehrs eine besonders bedeutsame Rolle zu.

Vor diesem Hintergrund entwickelten sich auch die in der Einleitung beschriebenen Planungen, eine PtX-Anlage am Standort Waiblingen zu errichten und unter Nutzung des hergestellten EE-Wasserstoffs eine kleine Flotte von Brennstoffzellenbussen im Umland zu betreiben. Wie dargelegt, besteht ein Ziel der vorliegenden Studie darin, die potentiellen Betreiber der hier genannten und anderer H<sub>2</sub>-Anlagen und Mobilitätsanwendungen zu beraten. Im Falle von Waiblingen trug die Untersuchung bereits zur Einreichung eines Förderantrags zur Unterstützung der Umsetzung zentraler Gegenstände dieser Untersuchung bei. Der Antrag erfolgte als Teil des Großprojekts H2Rivers im Rahmen im Wettbewerbs HyPerformer und wurde Ende 2019 prinzipiell positiv beschieden, wobei ein formeller Förderbescheid noch aussteht. Zudem entschieden im Juli 2020 der Kreistag des Landkreises-Rems-Murr und der Gemeinderat der Stadt Waiblingen, die Realisierung des Konzepts zu unterstützen [7].

Zugleich trägt die Studie auch zur Befriedigung des wissenschaftlichen Forschungsbedarfs bei und untersucht einen bislang wenig erforschten Anwendungsbereich. Den Autoren sind keine Studien bekannt, die ein vergleichbares Anlagen- und Mobilitätskonzept analysieren, so dass auch angesichts der großen Dynamik des Technologiefeldes die Untersuchungsergebnisse zur Schließung erheblicher Wissenslücken beitragen können.

Dabei profitiert der keineswegs zufällig gewählte Standort von spezifischen Vorteilen wie z. B. der Möglichkeit der Inanspruchnahme des Eigenstromprivilegs und einer verkehrsgünstigen Lage. Bei der als Industriegebiet ausgewiesenen Fläche gelten zudem vereinfachte regulatorische Rahmenbedingungen. Aufgrund der politischen Unterstützung war überdies eine hohe Auskunftsbereitschaft der potentiellen Betreiber gegeben, welche einen guten Zugang auch zu sensiblen Daten gewährleistete.

#### 4.1. Solargespeiste Wasserstoffproduktion

Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten qualifizieren Wasserstoff als zukunftsfähigen und nachhaltigen Energieträger, welcher einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele Deutschlands und Baden-Württembergs leisten kann [38]. Strom aus erneuerbaren Energien kann in einer Power-to-X-Anlage über Wasserelektrolyse zu Wasserstoff umgewandelt werden. Die Motivation kann darin liegen, aufgrund wirtschaftlicher oder technischer Aspekte nicht direkt z. B. für den Betrieb klassischer Stromverbraucher nutzbaren EE-Strom einer anderweitigen sinnvollen Verwendung zuzuführen. Andererseits kann die Produktion von H<sub>2</sub> z. B. als Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge auch gezielt angestrebt werden. Der flexible Energieträger zeichnet sich u. a. durch eine sehr gute Speicher- und Transportfähigkeit aus und kann in verschiedensten Verbrauchssektoren (Strom, Wärme, Mobilität) genutzt werden [39]. Somit kann Wasserstoff als ein Schlüsselement der Sektorenkopplung gelten [38], wie Abbildung 4-1 anhand eines denkbaren zukünftigen Energiesystems illustriert.

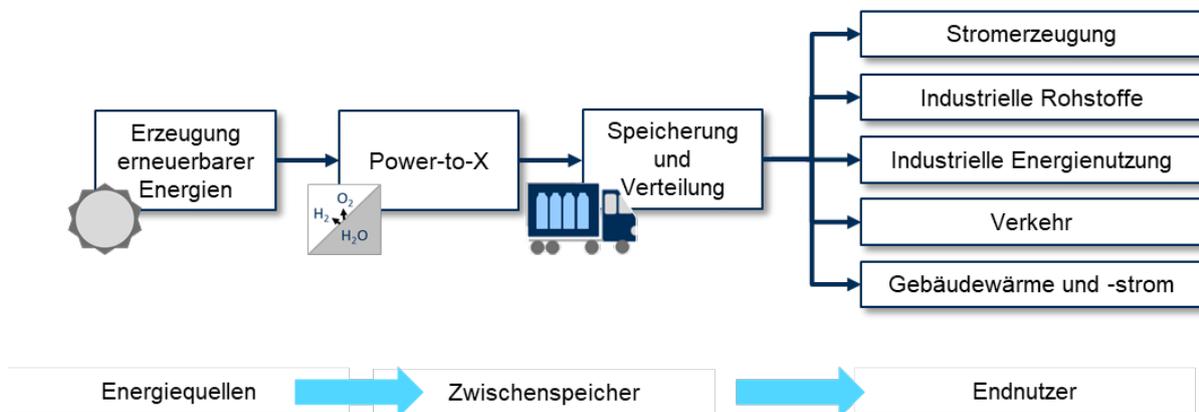


Abbildung 4-1: Die Schlüsselrolle von Wasserstoff im Energiesystem der Zukunft [38, 40]

Die umseitige Infobox 4-1 stellt das Konzept Power-to-X ausdifferenziert in seine wichtigsten Ausprägungen *Power-to-Heat*, *Power-to-Gas* und *Power-to-Liquid* vor.

**Infobox 4-1: Power-to-X**

Die Bezeichnung Power-to-X-Anlage ist ein Sammelbegriff für Anlagen zur Umwandlung von Strom, zumeist via Wasserstoff, in unterschiedliche Energieträger, wie z. B. Wärme (Power-to-Heat), Gas (Power-to-Gas) oder Kraftstoffe (Power-to-Liquid). Abbildung 4-2 zeichnet ein Gesamtbild der Technologien.

**Power-to-Heat (PtH):** Power-to-Heat bezeichnet die Umwandlung von Strom in Wärme, z. B. über eine Wärmepumpe oder über Heizstäbe. Eine Rückverstromung ist theoretisch möglich, jedoch nicht wirtschaftlich, weshalb diese Technologie einen Letztverbraucher darstellt.

**Power-to-Gas (PtG):** Unter Power-to-Gas kann die Umwandlung von Strom in Gas, wie z. B. Wasserstoff, verstanden werden. Diese Technologie stellt ein Schlüsselement der Sektorenkopplung dar, da der erzeugte Energieträger in allen Sektoren (Strom, Wärme und Verkehr) zur Anwendung kommen kann. Im Stromsektor wird von einem bidirektionalen Energiespeicher gesprochen, da eine Rückverstromung über Ausspeichertechnologien, z. B. Brennstoffzellen, möglich ist.

**Power-to-Liquid (PtL) bzw. Power-to-Fuel:** Power-to-Liquid koppelt den Strom- und den Verkehrssektor durch die Umwandlung von Strom in strombasierte Kraftstoffe, sog. *E-Fuels*. Die Speicherung erfolgt derzeit unidirektional, weshalb der Verkehrssektor als Letztverbraucher gilt [41, 42].

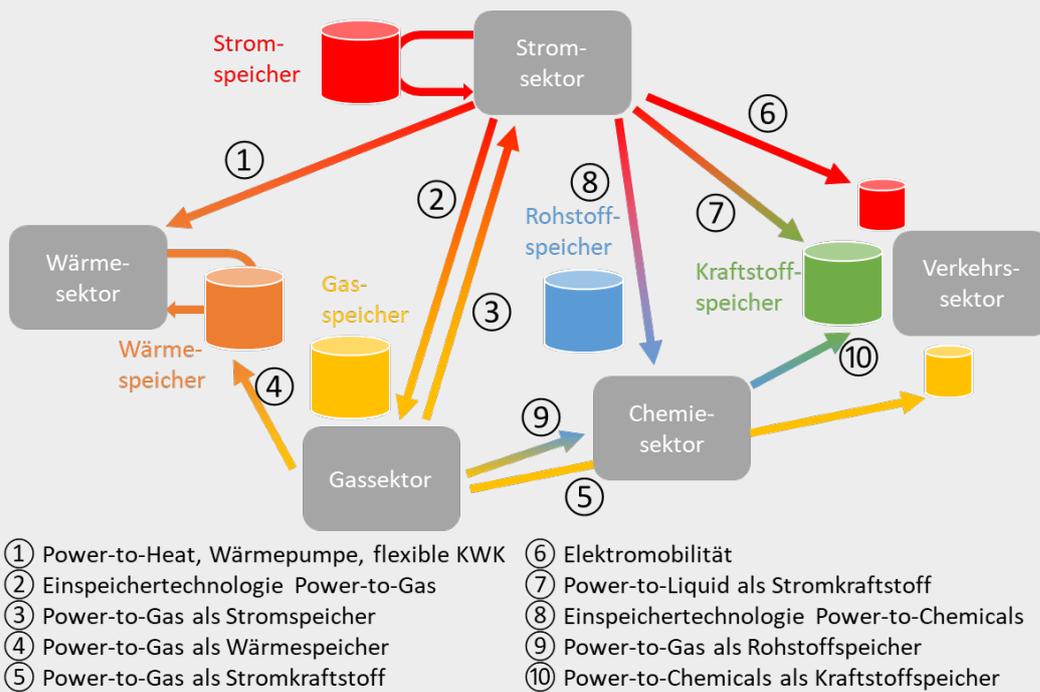


Abbildung 4-2: Sektorenkoppelnde Energiespeicher nach [41]

Die Kosten des für die Wasserelektrolyse verwendeten Stroms (siehe Infobox 4-2) haben einen wesentlichen Effekt auf die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffproduktionsanlagen, weshalb eine Befreiung von Steuern und Umlagen anzustreben ist. Der Strompreis für Industriekunden setzt sich derzeit aus den folgenden Bestandteilen zusammen [43]:

- Beschaffung, Netzentgelt, Vertrieb
- EEG-Umlage
- Stromsteuer
- Offshore-Haftungsumlage
- Umlage gemäß Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)
- Umlage gemäß Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV)
- Konzessionsabgabe
- Umlage für abschaltbare Lasten (AbLa)

Durch Änderungen des Betriebs- und Anlagenkonzeptes von PtX-Systemen ist eine Befreiung oder Reduzierung von Abgaben und Umlagen möglich. Eine Auflistung der relevanten Optionen wurde im Rahmen einer Potenzialstudie für den Kreis Nordfriesland [44] durchgeführt und wird in Tabelle 4-1 dargestellt. Ein Wegfall der Umlage für abschaltbare Lasten ist nicht vorgesehen. Die Auflistung ist nur als Orientierungshilfe zu verstehen und kann eine rechtsanwaltliche Beratung nicht ersetzen.

Wie schon in Kapitel 2 angemerkt, bekundet die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung die Absicht, die regulativen Rahmenbedingungen für Anlagen zur Produktion von grünem Wasserstoff zu verändern und u. a. durch Streichung von Umlagen die Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen Betrieb von PtX-Anlagen zu verbessern [3].

Daraus ergeben sich drei Ausgangsszenarien für den Strombezug von PtX-Anlagen, wovon Punkt 1 und Punkt 3 als Szenarien in die Falluntersuchung zu Waiblingen von Kapitel 5 eingehen werden:

- (1) Direkte Kopplung einer erneuerbaren Energiequelle und einer Wasserstoffproduktionsanlage in einem Inselnetzbetrieb,
- (2) Wasserstoffproduktion mit Netzanschluss als industrieller Großverbraucher, mit verringerter EEG-Umlage,
- (3) Wasserstoffproduktion mit Netzanschluss bei Befreiung von der EEG-Umlage, gemäß Maßnahmenvorschlag der nationalen Wasserstoffstrategie.

Tabelle 4-1: Regularien zur Reduzierung oder vollständiger Streichung von Stromumlagen

Preisbestandteil	Regulatorische Regelungen zur Reduzierung/Befreiung
Netzentgelte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion bei &gt; 10 GWh Verbrauch und &gt; 7.000 Vbh (§ 19 Abs. 2 StromNEV)</li> <li>• entfallen bei Elektrolyse (§ 118 Abs. 6 S. 1 und S. 7 EnWG)</li> </ul>
EEG-Umlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion bei Stromkostenintensität &gt; 14 Prozent (besondere Ausgleichsregelungen §§ 63-63 EEG) und bei Eigenstromversorgung (§ 61b EEG)</li> <li>• entfällt bei Inselbetrieb (§ 61 a Nr. 2 EEG) oder Eigenversorgung mit Überschusseinspeisung ohne Inanspruchnahme einer EEG-Vergütung (§ 61a Nr. 3)</li> </ul>
Stromsteuer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion um 90 Prozent für produzierendes Gewerbe und Elektrolyse (§§ 9, 9a, 10 Strom StG)</li> <li>• entfällt bei 100 Prozent Grünstrom (§ 9 Abs. 1 StromStG)</li> </ul>
Offshore-Haftungsumlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion in Anlehnung an EEG- und KWKG-Umlage (§ 17f EnWG bzw. §§ 27 bis 27c KWK)</li> </ul>
KWKG-Umlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion in Anlehnung an EEG-Umlage (§§ 27 bis 27c KWK)</li> </ul>
StromNEV-Umlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion auf 0,05 oder 0,025 ct/kWh bei Verbrauch &gt; 1 GWh und entsprechendem Umsatz und Gewerbe (§ 19 Abs. 2 StromNEV)</li> </ul>
Konzessionsabgabe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion auf 0,11 ct/kWh für Sondervertragskunden (§ 2 Abs. 3 KAV)</li> </ul>

In einem Inselnetzbetrieb wird eine Wasserelektrolyse mit einer Erzeugungsanlage für erneuerbaren Strom direkt gekoppelt und hat keinen Anschluss an das öffentliche Stromnetz. Dabei ist die Wasserstoffproduktion unmittelbar von dem anfallenden Stromertrag abhängig, weshalb im Hinblick auf eine Versorgung stetiger Verbraucher die saisonalen Schwankungen von Wind- und Sonnenenergie zu berücksichtigen sind. Diese Schwankungen werden in Abbildung 4-3 beispielhaft dargestellt und zeigen, dass in Hinsicht auf eine gewünschte hohe und damit wirtschaftliche Auslastung des Elektrolyseurs die erneuerbare Energiequelle deutlich größer dimensioniert werden sollte. Bei einer leistungsstärkeren Stromversorgung können jedoch in den Sommermonaten Überschüsse entstehen, die ohne Netzanschluss nicht in das Stromnetz eingespeist werden können. Zudem geht eine potentere Stromversorgung auch mit höheren Investitionskosten einher. Eine technisch und wirtschaftlich vertretbare Versorgungssicherheit für Verbraucher ist damit letztlich nur schwer darstellbar.

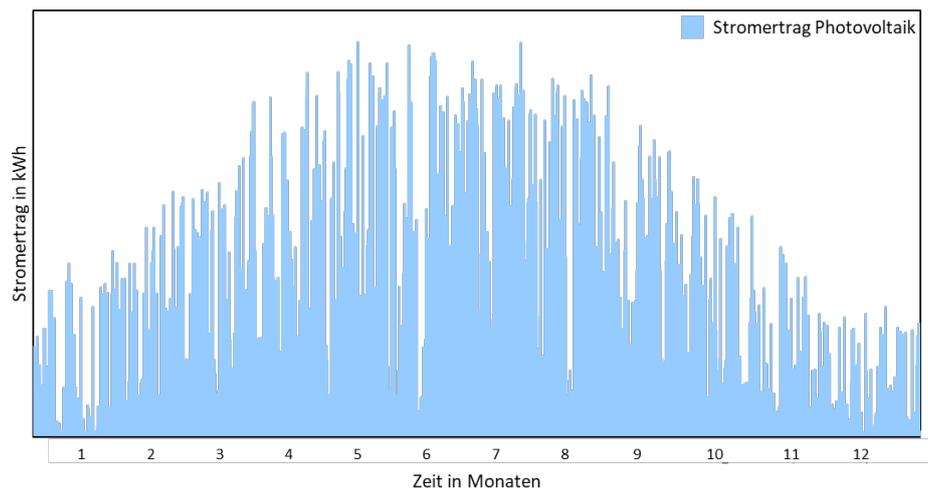


Abbildung 4-3: Exemplarische Darstellung saisonaler Schwankungen von Photovoltaik-Erträgen

Schon vor einer möglichen Befreiung von einzelnen Abgaben und Umlagen aufgrund regulatorischer Anpassungen gemäß der nationalen Wasserstoffstrategie können H<sub>2</sub>-Produktionsanlagen ggf. als industrielle Großverbraucher anerkannt werden und dadurch Strombezugskosten einsparen. Als größter Kostenbaustein an das Stromnetz angeschlossener PtX-Anlagen kann neben Beschaffung und Vertrieb die EEG-Umlage identifiziert werden, von welcher industrielle Großverbraucher nach der ersten GWh bis zu 85 Prozent einsparen können. Aufgrund bei höherem Energieverbrauch möglichen Kosteneinsparungen sollte eine hohe Anzahl von Vollbenutzungsstunden angestrebt werden. Die für eine gute Anlagenauslastung benötigten Wasserstoffabnehmer mit großen Nachfragemengen sollten bereits in der frühen Planungsphase identifiziert werden, um eine angemessene Dimensionierung der PtX-Anlage zu erreichen. Aufgrund des Strombezugs über das öffentliche Stromnetz besteht keine zwingende Notwendigkeit einer lokalen Kopplung von EE-Quelle und Elektrolyseur. Vielmehr kann der Strombezug überregional erfolgen, weshalb auch keine Abhängigkeit vom saisonal variierenden Dargebot lokaler EE besteht. Wird ein klimaneutraler Betrieb bzw. die Produktion grünen Wasserstoffs angestrebt, ist ausschließlich erneuerbarer Strom zu beziehen.

Angesichts der hohen Kostenbelastungen durch Steuern und Umlagen zumindest bei kleineren H<sub>2</sub>-Produktionsanlagen, welche nicht vom Ausnahmetatbeständen profitieren, liegt die Empfehlung nahe, im Sinne der nationalen Wasserstoffstrategie eine vollständige oder zumindest weitgehende Befreiung von den Belastungen voranzutreiben. Während Großverbraucher erhebliche Vergünstigungen in Anspruch nehmen können, unterliegen gerade kleine, zur Nutzbarmachung lokal aufkommender und ansonsten oft verlorengelender EE geeignete PtX-Anlagen ungünstigen regulativen Bedingungen. Aufgrund der unter diesen Umständen nicht realisierbaren Wirtschaftlichkeit gehen umfangreiche Potenziale für die Erreichung klimapolitischer Zielsetzungen verloren.

#### Infobox 4-2: Wasserelektrolyse: Bedeutung, Technologie und Zukunftsperspektiven

Für eine kohlenstofffreie bzw. –arme Wasserstoffherstellung sind insbesondere zwei Verfahren relevant: Die Wasserelektrolyse auf Basis von EE-Strom und die Dampfreformierung von Erd- oder Biogas. Die Elektrolyse ist bislang von geringer kommerzieller Bedeutung und ihr Anteil an der weltweiten H<sub>2</sub>-Produktion ist marginal. Allerdings gilt sie als die Zukunftstechnologie nachhaltiger H<sub>2</sub>-Herstellung und das strategische Interesse einschlägiger Akteure ist groß. Demgegenüber dominiert heute die Dampfreformierung die etablierten Produktionsverfahren und ist die in Deutschland und Europa mit Abstand bedeutsamste Technologie [37].

Die Wasserelektrolyse umfasst drei Unterarten: Die *Alkalische Elektrolyse* (AEL) ist die älteste und in langdauernden Einsätzen bewährte Technologie. Sie ist kostengünstig und spielt ihre Vorteile insbesondere bei großen Elektrolyseanlagen ab 10 MW Leistung aus. Die *Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse* (PEMEL) etabliert sich seit einigen Jahren als kommerziell einsatzbereite Technologie und erweckt angesichts erheblicher Entwicklungspotenziale großes Interesse. Vorteilhaft sind ihre ausgeprägte Lastflexibilität und geringe Baugröße, die sie für die Nutzung fluktuierender EE und dezentrale Einsätze z. B. bei H<sub>2</sub>-Tankstellen qualifiziert. Die *Hochtemperatur-Festelektrolyt-Elektrolyse* (HTEL) ist hocheffizient und technologisch vielversprechend, befindet sich aber noch im F&E-Stadium [10].

Allen Elektrolysearten gemein ist die Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mit Hilfe elektrischer Energie. Wird EE-Strom für den Betrieb verwendet, verursacht der H<sub>2</sub>-Produktionsprozess nahezu keine THG-Emissionen und ist der umweltfreundlichste aller eingangs skizzierten Herstellungspfade. Beim Einsatz in BZ-Fahrzeugen werden daher die niedrigsten Emissionen erreicht. Bei Nutzung fossilen Stroms verschlechtert sich die Emissionsbilanz jedoch deutlich [8]. Eine Reihe internationaler Anbieter vertreibt AEL- und PEMEL-Systeme unterschiedlichster Leistungsklassen.

Wie eine Studie zur Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland aus dem Jahr 2018 feststellt, wird angesichts einer erwarteten starken Zunahme des H<sub>2</sub>-Bedarfs bis 2030 ein Ausbau an installierter Elektrolysekapazität im zweistelligen Gigawattbereich erwartet [10]. Gemäß der Studie sind AEL- und in vielerlei Hinsicht auch PEMEL-Systeme bereits technisch weit ausgereift. Die AEL-, PEMEL- und HTEL-Technologien weisen jeweils spezifische Vor- und Nachteile auf und werden insgesamt als ähnlich zukunftsfähig erachtet. Erhebliche Kostenreduktionen werden aufgrund von Skaleneffekten erwartet.

Verschiedene Szenarien bilden für Deutschland einem Ausbaukorridor im Bereich von 137 bis 275 GW installierter Elektrolysekapazität bis zum Jahr 2050 ab. Die heutige Herstellerindustrie wäre prinzipiell in der Lage, die antizipierte und stark wachsende Nachfrage zu decken. Allerdings müssten zunächst regulative Hindernisse beseitigt und die Strombezugskosten reduziert werden [10].

Die 2020 erschienene nationale Wasserstoffstrategie strebt indes einen Ausbau der Elektrolysekapazität auf bis zu 5 GW bis zum Jahr 2030 an. Für den Zeitraum bis 2035, bzw. spätestens bis 2040, sollen weitere 5 GW zugebaut werden. Die Wasserstoffstrategie sieht zugleich eine Anpassung des regulativen Rahmens im Sinne einer Kostenreduzierung des Elektrolysebetriebs vor [3].

## 4.2. Wasserstofftankstelle

Zum Betrieb von brennstoffzellenbetriebenen Mobilitätsanwendungen ist eine bedarfsgerechte H<sub>2</sub>-Tankstelleninfrastruktur unabdingbar. Dabei wird zwischen unterschiedlichen Tankstellenkonzepten unterschieden, die in Abhängigkeit des Verbraucherszenarios auszuwählen sind. Tankanlagen für BZ-betriebene Busse und andere schwere Nutzfahrzeuge sind auf 350-bar-Druckbetankung ausgelegt und unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich des Druckniveaus von 700-bar-Tankstellen für BZ-Pkw.

Die kohlenstofffreie bzw. –arme Wasserstoffproduktion zur Versorgung der Tankstelle kann, wie in Infobox 4-2 beschrieben, insbesondere mittels Dampfreformierung oder Wasserelektrolyse erfolgen.

Überdies wird zwischen dezentraler und zentraler H<sub>2</sub>-Erzeugung unterschieden. Das Schema zur dezentralen Erzeugung wird Abbildung 4-4 dargestellt, wohingegen das Schema zur zentralen Erzeugung und exemplarischen Anlieferung von gasförmigem Wasserstoff in Abbildung 4-5 illustriert wird.

Bei der dezentralen Wasserstoffherzeugung spricht man auch von *On-site*-Erzeugung an der Tankstelle, d. h. H<sub>2</sub>-Erzeugung vor Ort. Der produzierte Wasserstoff liegt bei einem Druckniveau von etwa 1 bis 50 bar vor und wird zur Zwischenspeicherung auf 200 bis 450 bar verdichtet. Danach kann entweder über einen Hochdruckkompressor in einen Hochdruckspeicher hinein auf 800 bis 1.000 bar verdichtet oder der Wasserstoff direkt über einen Booster-Kompressor an das Fahrzeug abgegeben werden. In beiden Konzepten wird der H<sub>2</sub> vor der Fahrzeugbetankung über einen Wärmeüberträger vorgekühlt. Die maximale Speicherkapazität liegt dabei nach BImSchG bei drei Tonnen Wasserstoff [45].

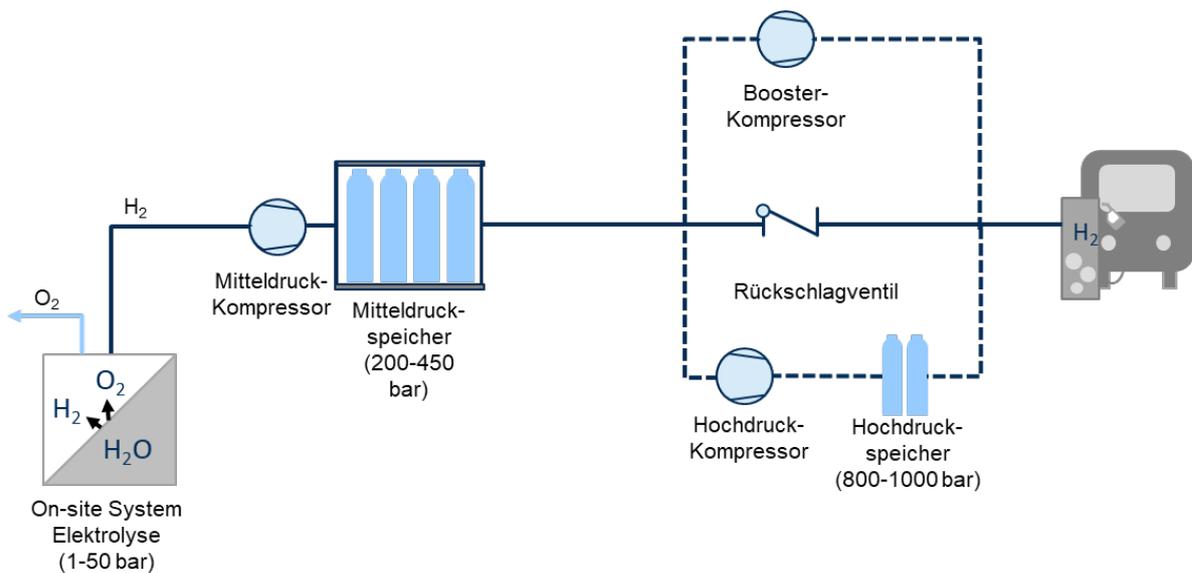


Abbildung 4-4: Schema einer On-site-Erzeugung durch Elektrolyse [45]

Bei der zentralen Wasserstoffherzeugung erfolgt die Anlieferung von gasförmigem oder flüssigem Wasserstoff an die Tankstelle in der Regel per Lkw bzw. *Trailer* und gelegentlich per Pipeline [45]. Aufgrund des bislang wenig ausgebauten H<sub>2</sub>-Pipelinennetzes sowie der geringen Verfügbarkeit von Flüssigwasserstoff werden diese Anlieferungstechnologien nicht weiter betrachtet [46]. In einem Umkreis von etwa 400 km kann die Wasserstoffanlieferung über Trailer mit gasförmigen Wasserstoff, komprimiert auf mindestens 200 bar erfolgen. Von einem Niederdruckspeicher mit einem Druckniveau von etwa 50 bar bis 200 bar wird zwischen der Verdichtung mit einem Hochdruckkompressor und einem anschließenden Hochdruckspeicher, sowie der Verdichtung durch einen Booster-Kompressor unterschieden. Wie aus Abbildung 4-5 ersichtlich, wird beim Einsatz eines Booster-Kompressors zusätzlich ein Mitteldruckspeicher vorgehalten. Bei der Betankung eines Fahrzeugs wird zunächst H<sub>2</sub> aus dem Mitteldruckspeicher entnommen und über eine Vorkühlung dem Fahrzeugtank zugeführt. Sobald ein Druckausgleich zwischen Fahrzeugtank und Mitteldruckspeicher erreicht wird, füllt der Kompressor den Fahrzeugtank im Booster-Betrieb mit vorgekühltem Wasserstoff. Die maximale Speicherkapazität ohne Elektrolyse Vorort liegt nach BImSchG bei fünf Tonnen Wasserstoff [45, 47].

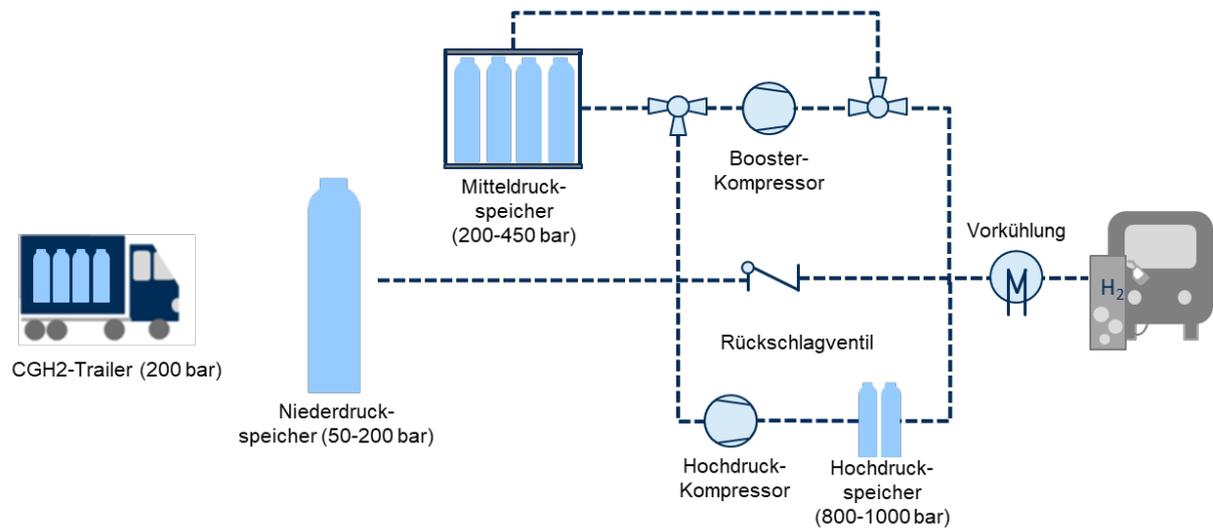


Abbildung 4-5: Schema einer gasförmigen Belieferung von Wasserstoff an eine Tankstelle [45]

Darüber hinaus sind mobile Tankstellen zur Abgabe von gasförmigem Wasserstoff am Markt erhältlich. Die Tankstellen sind auf Lkw-Auflieger montiert und verfügen über einen integrierten Kompressor sowie 350-bar- und 750-bar-Druckwasserstoff-Dispenser. Per separatem Trailer auf einem Druckniveau von 300 bis 450 bar angelieferter H<sub>2</sub> wird in der Tankstelle bedarfsgerecht verdichtet und an Pkw und Nutzfahrzeuge abgegeben[45].

#### Infobox 4-3: Wasserstofftankstellen für Busse: Entwicklung, Technik und Kosten

Der Betrieb von brennstoffzellenbetriebenen Bussen und anderen schweren BZ-Nutzfahrzeugen geht stets mit dem Einsatz bedarfsgerecht aufgebauter H<sub>2</sub>-Betankungsinfrastruktur einher. Beispielsweise wurden die in der *Clean Energy Partnership*, einem vormals zentralen Leuchtturmprojekt der Bundesregierung im Bereich der H<sub>2</sub>-Mobilität, u. a. in Hamburg und Berlin erprobten BZ-Busse an eigens errichteten 350-bar-Druckbetankungsanlagen befüllt [48]. Analog wird in allen unten in den Infobox 6-1 und Infobox 6-2 angesprochenen EU-Busprojekten der Fahrzeugbetrieb durch situationsgerecht ausgelegte Betankungsangebote flankiert.

So wurden im groß angelegten Vorhaben *Clean Hydrogen in European Cities* (CHIC) nicht nur 54 Busse, sondern auch neun technologisch unterschiedliche H<sub>2</sub>-Tankstellen erprobt [49]. In den aktuellen Großprojekten *Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe* (JIVE) und *JIVE 2* wird der Busbetrieb vom Vorhaben *Models for Economic Hydrogen Refuelling Infrastructure* (MEHRLIN) flankiert, welches mit sieben großen Tankanlagen wesentlich zur Kraftstoffversorgung beiträgt [50]. Dabei werden verschiedene Tankstellenkonzepte umgesetzt und H<sub>2</sub> sowohl von externen Quellen bezogen wie auch vor Ort per Elektrolyse mit täglichen Produktionsmengen bis zu 860 kg auf EE-Basis hergestellt [8].

Tankanlagen für BZ-betriebene Busse und andere schwere Nutzfahrzeuge sind auf 350-bar-Druckbetankung ausgelegt und unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich des Druckniveaus von 700-bar-Tankstellen für BZ-Pkw. Bedingt durch die deutlich höheren Kraftstoffbedarfe schwerer Fahrzeuge ist auch eine Auslegung auf wesentlich größere H<sub>2</sub>-Umsätze und Speicherkapazitäten erforderlich [30]. Die Betankung schwerer BZ-Nutzfahrzeuge stellt zudem hohe Anforderungen bezüglich der Anlagenzuverlässigkeit sowie eines möglichst geringen Flächenbedarfs gerade bei innerstädtischen und platzbeschränkten Busdepots [51]. Demgegenüber ist von vornherein für eine ausreichende Infrastrukturverfügbarkeit gesorgt und Probleme mit der Kraftstoffversorgung, wie sie Pkw-Fahrer mangels eines flächendeckend aufgebauten H<sub>2</sub>-Tankstellennetzes erleben können, entstehen bei den routengebundenen bzw. lokalen Einsätzen nicht.

Die Auslegung von Tankstellen orientiert sich an den zu versorgenden und in Infobox 7-1 beschriebenen Buskonzepten. Eine Anlage zur Versorgung von 50 BZ-Bussen weist einen ungefähren täglichen H<sub>2</sub>-Umsatz von 1.300 kg im Falle der Auslegung auf brennstoffzellendominante Fahrzeuge, bzw. von 600 kg im Falle eines Designs für Busse mit BZ-Range-Extender auf. Während in ersterem Fall die tankstellenseitige Auslegung der H<sub>2</sub>-Anlagen anspruchsvoller ist, wird in letzterem Fall neben dem H<sub>2</sub>-Pfad auch die Einrichtung einer Stromladeinfrastruktur erforderlich. Die Investitionskosten einer Tankstelle für 50 BZ-dominante Busse liegen grob beziffert bei 5 Millionen Euro, wird der H<sub>2</sub> vor Ort per Wasserelektrolyse produziert, steigen sie auf ungefähr 12 Millionen Euro [30]. Die Kosten einer Anlage zur Versorgung von 50 Bussen mit Range-Extender unterscheiden sich nicht wesentlich. Zukünftige Kostensenkungen sind zu erwarten.

Dabei ist zu beachten, dass die Investitions- und Betriebskosten jeglicher Anlagen zur Abgabe und Herstellung von H<sub>2</sub> situationspezifisch stark variieren und dass die hier zitierten Kosten nur erste Anhaltspunkte geben können. Fallspezifische Analysen sind unerlässlich und werden nachfolgend in der vorliegenden Studie für den Technologie- und Zukunftspark Waiblingen vollzogen.

Während die Tankstelleninfrastruktur für Busse und andere schwere BZ-Nutzfahrzeuge derzeit durch Einsatz der 350-bar-Technologie charakterisiert ist, zeichnet sich ein neuer Trend zur 700-bar-Versorgung zumindest von BZ-Lkw ab. Sollte sich diese Entwicklung fortsetzen und sich die 700-bar-Betankung auch bei schweren Nutzfahrzeugen etablieren, könnten infolge von Synergien mit dem Pkw-Tankstellennetz Skaleneffekte realisiert und der Infrastrukturaufbau insgesamt wesentlich befördert werden [8].

## 5. Fallbeispiel Technologie- und Zukunftspark Waiblingen

Im *Technologie- und Zukunftspark* in Waiblingen sollen, neben anderen in Abbildung 5-1 dargestellten Vorhaben, innovative Lösungsansätze für Mobilitätsanwendungen einschließlich eines autonom fahrenden Busshuttles geschaffen werden. Insbesondere soll für den auch als *Energyhub* bekannten Technologie- und Zukunftspark eine EE-gespeiste Wasserstoffherzeugung in Verbindung mit einem regionalen Verwertungsszenario konzipiert und später realisiert werden. Dafür wurden in dem exemplarischen Fallbeispiel zwei in Kapitel 4.1 hergeleitete Szenarien betrachtet:

- (1) Der Betrieb rein über eine Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage) in einem *Inselnetz* (Szenario 1),
- (2) sowie der einer Auslastung des Elektrolyseurs von etwa 80 Prozent im Jahr (Szenario 2).

In Szenario 1 wird auf den Dachflächen zweier Industriegebäude eine Photovoltaik-Anlage installiert. Anschließend soll der erneuerbar produzierte Strom in einem Inselnetz, d. h. ohne Anschluss an das öffentliche Stromnetz, in Wasserstoff gewandelt werden, um die in Kapitel 7 beschriebenen BZ-Busse und ggf. auch die in Kapitel 9 behandelten BZ-Züge im Sinne eines emissionsfreien ÖPNV zu versorgen.

Dem Szenario 2 wird ein Netzanschluss mit Strombezug aus erneuerbaren Energiequellen zugrunde gelegt. Unter den angestrebten Anpassungen der regulativen Rahmenbedingungen der nationalen Wasserstoffstrategie entfällt in diesem Szenario die oben in Tabelle 4-1 beschriebene EEG-Umlage, wobei bedingt durch den Strombezug aus dem öffentlichen Stromnetz eine höhere Auslastung des Elektrolyseurs angenommen wird.

Die Vor- und Nachteile dieser Betriebsweisen werden in den folgenden Kapiteln aufgegriffen und in einer *Total Cost of Ownership-Analyse* (TCO-Analyse) bewertet. Die vorliegenden Ergebnisse wurden anteilig in einem *peer-reviewed paper* und einer Posterpräsentation im Rahmen des *European Advanced Energy Materials and Technology Congress* unter dem Titel *Sustainable Concept And Economic Evaluation Of A Solar-Powered Hydrogen Generation Unit* [52] in Schweden veröffentlicht.

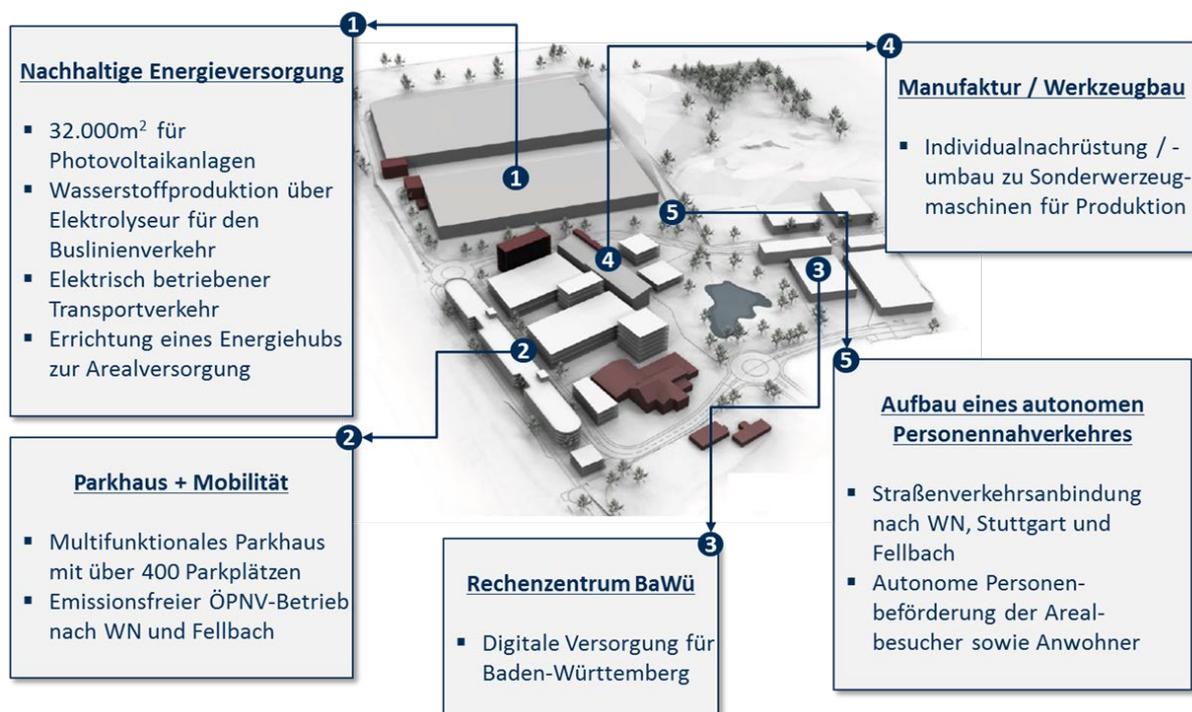


Abbildung 5-1: Übersicht des *Technologie- und Zukunftsparks* in Waiblingen (Stand 2019)

## 5.1. Solargespeiste Wasserstoffproduktion in Waiblingen

Bei den Analysen wurde zunächst für zwei Industriedächer im Technologie- und Zukunftspark Waiblingen mit einer Bruttogesamtfläche von etwa 42.000 m<sup>2</sup> eine Photovoltaik-Anlage mit einer Spitzenleistung von bis zu 5,6 MWp zugrunde gelegt. Dies entspricht einer Belegung von 80 Prozent der Bruttodachfläche. Abbildung 5-2 zeigt einen Ausschnitt des Areals mit den beiden PV-Flächen auf den Dächern der Industriehallen sowie die Lage des Energyhubs, welcher mit einer Fläche von etwa 1.000 m<sup>2</sup> alle Komponenten zur anschließenden Elektrolyse sowie der Wasserstofftankstelle beinhalten soll. Ein möglicher Aufstellungsplan des Energyhubs ist in Kapitel 5.2 zu finden.

Erst in den letzten Wochen des hier protokollierten Förderprojekts lag der Hochschule Esslingen ein Dachbebauungsplan mit darin verzeichneten Fenstern und Dachauslässen vor. Zudem ergab sich, dass für die vollständige Realisierung der ursprünglich vorgesehenen PK-Kapazität aus Gründen der Statik PV-Module an den Dachrändern mit einer Dachdurchdringung hätten befestigt werden müssen. Dies war seitens der potenziellen Betreiber angesichts der rechtlichen Lage hinsichtlich Wartung und Garantie der Dächer nicht erwünscht. Daher wurde die Nettofläche und somit auch die installierte Leistung der PV-Anlage reduziert, sodass letztendlich die Spitzenleistung auf 4,3 MWp verringert wurde. Die nachfolgenden Kalkulationen wurden an die veränderte installierte Leistung angepasst.

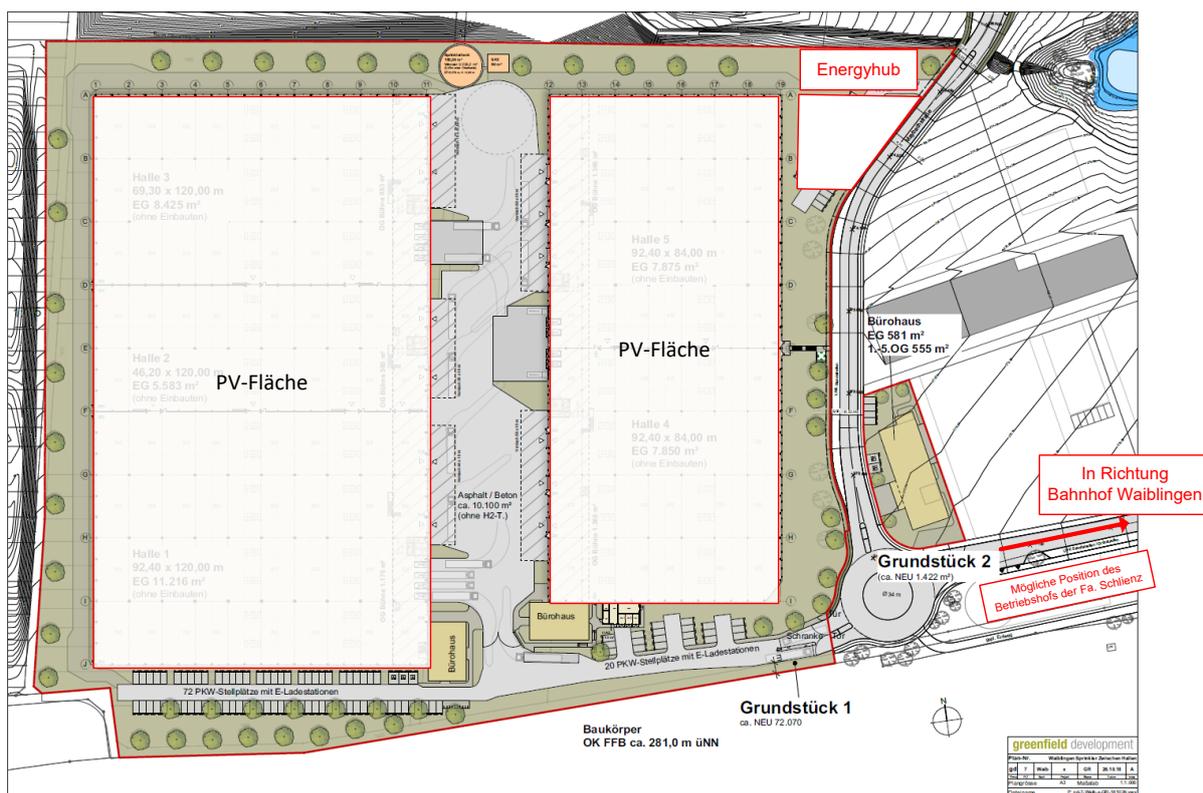


Abbildung 5-2: Geplante Photovoltaik-Flächen im Technologie- und Zukunftspark in Waiblingen (Angelehnt an [53])

Mit der Software *Polysun* wurden die Solarerträge der diffusen und direkten Sonneneinstrahlung am Standort Waiblingen berechnet. Die Wetterdaten dieser Simulation stammen aus der Datenbank *Me-teonorm*. Mit dem Ziel einer ganztägig nutzbaren Stromerzeugung wurde in der Konzeptstudie für die PV-Anlage eine Ost/West Ausrichtung mit einer Aufständigung von 20 Grad simuliert. Abbildung 5-3 zeigt die berechnete Stromerzeugung der Photovoltaik-Anlage eines Jahres in grau sowie die Auslastung des Elektrolyseurs mit einer maximalen Nennleistung von 1,25 MW in blau. Um eine hohe Anzahl an Vollbenutzungsstunden des Elektrolyseurs zu erreichen, wurde die Nennleistung des Elektrolyseurs

kleiner als der maximale Ertrag der PV-Anlage dimensioniert. Dies ermöglicht auch zwischen Oktober und Februar (Herbst/Winter) zumindest teilweise einen Volllastbetrieb des Elektrolyseurs. Jedoch ist die Speicherung von Wasserstoff an einer Tankstelle mit on-site Elektrolyse gemäß BImSchG auf drei Tonnen begrenzt. Eine detaillierte Diskussion der Wasserstoffproduktion für den öffentlichen Personennahverkehr wird im nachfolgenden Kapitel geführt.

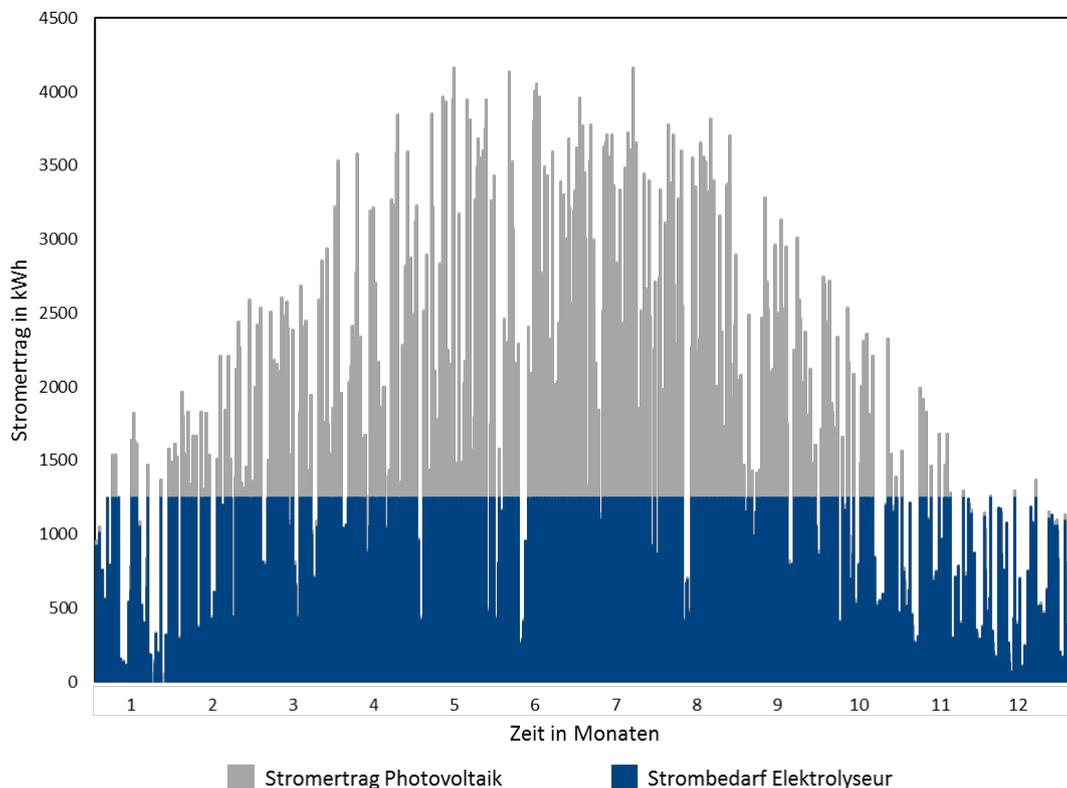


Abbildung 5-3: Darstellung der Photovoltaik-Erträge gegenüber der Elektrolyseurauslastung in Jahresansicht

## 5.2. Wasserstofferträge durch Elektrolyse

In Szenario 1 wird eine Volllaststundenzahl von 2.710 Stunden pro Jahr sowie eine Wasserstoffproduktion von etwa 55 Tonnen pro Jahr erreicht (Abbildung 5-4, rot). Der Betreiber der PV-Anlage ist gleichzeitig Betreiber des Elektrolyseurs, zudem liegt eine direkte Kopplung der Anlagen ohne Netzanschluss vor. Dieser Inselnetzbetrieb ermöglicht, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, eine Einsparung von Abgaben und Umlagen, wie insbesondere der EEG-Umlage. Dadurch entfällt jedoch die Möglichkeit den Überschussstrom (Abbildung 5-3, grau dargestellt) an der Strombörse zu vermarkten.

In Szenario 2 wird die Anlage an das öffentliche Stromnetz angeschlossen und bei einer Auslastung von 7.000 Vollbenutzungsstunden pro Jahr betrieben (Abbildung 5-4, blau). Der Strom für den Elektrolyseur kann aus dem öffentlichen Netz bezogen werden, um somit eine höhere Wasserstoffproduktion von 131 Tonnen pro Jahr zu erreichen. Dabei werden jährlich mehrere Zeitfenster für Wartungs- und Instandhaltungszwecke vorgehalten.

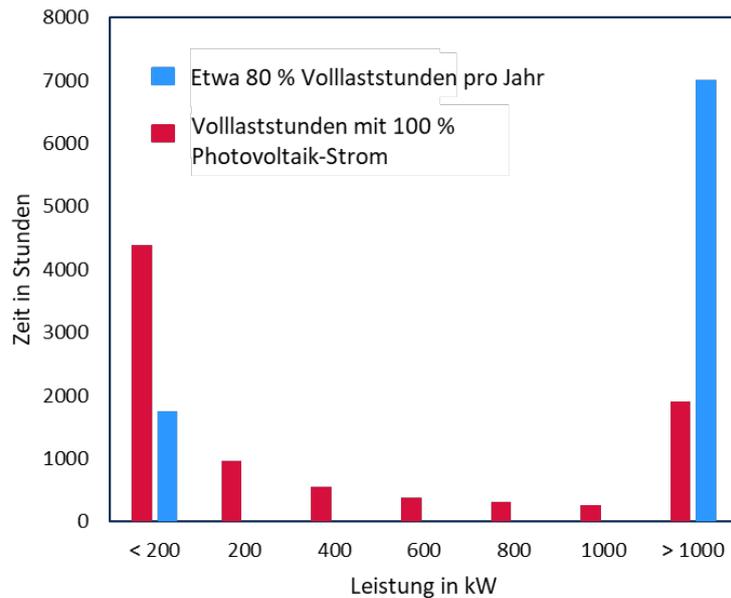


Abbildung 5-4: Prognose der Volllaststunden mit etwa 80 Prozent Auslastung (blau) und Auslastung durch Photovoltaik-Strom (rot) des Elektrolyseurs

Wie zuvor in Kapitel 4.2 beschrieben, ist die Speicherung von Wasserstoff an einer Tankstelle mit on-site Elektrolyse, wie in Szenario 1, nach BImSchG auf drei Tonnen begrenzt. Um den Wasserstoffbedarf eines emissionsfreien öffentlichen Personennahverkehrs in einem Inselnetzbetrieb abzudecken, ist es daher notwendig die Strom- und damit auch die Wasserstofferzeugung innerhalb exemplarischer Wochen detailliert zu betrachten. Aufgrund des Netzanschlusses und somit des ganzjährig flexiblen Strombezugs in Szenario 2 wird die Auswertung ausschließlich für Szenario 1 durchgeführt.

Abbildung 5-5 stellt die exemplarische Winterwoche 18. bis 24. Januar dar. Es ist zu erkennen, dass der Elektrolyseur (rot) fast ausschließlich im unteren Teillastbereich läuft und am 21. Januar gar keinen Wasserstoff produziert. Hier ist der Anschluss an das öffentliche Stromnetz zur Absicherung der Versorgungssicherheit für den ÖPNV sinnvoll.

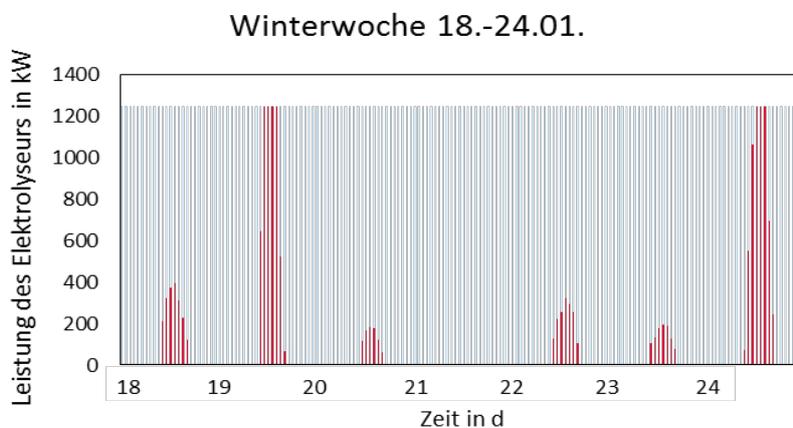


Abbildung 5-5: Prognose der Elektrolyseur-Nutzung (rot) beispielhaft für eine Winterwoche

Abbildung 5-6 stellt die exemplarische Sommerwoche 19. bis 25. Juni dar. Der Elektrolyseur (rot) ist hier deutlich besser ausgelastet und kann den Wasserstoffbedarf aus dem ÖPNV problemlos decken.

Jedoch besteht ohne Netzanschluss keine Möglichkeit den überschüssigen Strom, wie zuvor dargestellt, in das öffentliche Stromnetz einzuspeisen.

Als Resultat der Betrachtung der beiden exemplarischen Wochen wird in der Konzeptstudie die Realisierung eines Netzanschlusses empfohlen. In einer geplanten künftigen Studie (Projektskizze eingereicht im Rahmen des 7. *Energieforschungsprogramms* beim *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, Stand Dezember 2019), soll darüber hinaus der Einsatz einer Batterie zur Glättung des Stroms detailliert untersucht und erforscht werden.

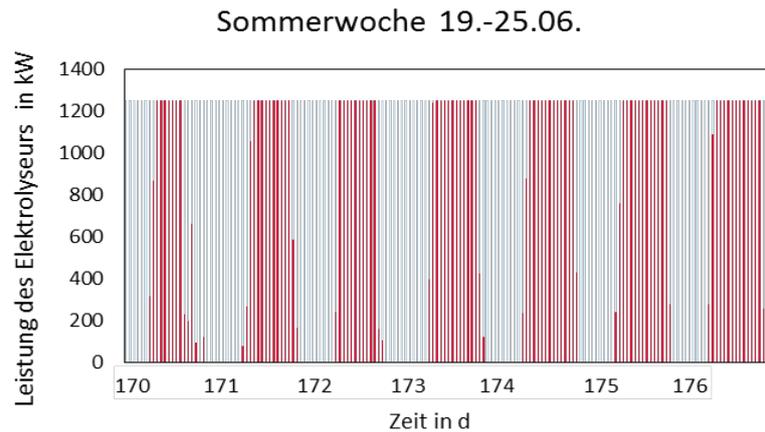


Abbildung 5-6: Prognose der Elektrolyseur-Nutzung (rot) beispielhaft für eine Sommerwoche

Im Folgenden wird das Aufstellungskonzept der Wasserstoffherzeugungsanlage sowie der H<sub>2</sub>-Tankstelle im Energyhub dargestellt (Abbildung 5-7), das unter Hinzuziehung der Expertise des *Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)* entwickelt wurde. Die Fläche teilt sich in vier Bereiche auf. Der Bereich zur Wasserstoffherstellung beinhaltet einen Proton-Exchange-Membrane-Elektrolyseur sowie einen Kompressor zur Speicherung des Wasserstoffs in einem Mitteldruckspeicher. Im Bereich des Batterie-Speichersystems soll die bereits erwähnte Batterie zur Glättung des fluktuierenden Stroms aus der PV-Anlage Platz finden. Im Wasserstofftankstellenbereich sollen die Fahrzeuge einer emissionsfreien Buslinie, beschrieben in Kapitel 7, auf einem Druckniveau von 350 bar betankt werden. Der H<sub>2</sub>-Trailerbereich ermöglicht einerseits den Abtransport von überschüssigem Wasserstoff in den Sommermonaten und andererseits die Anlieferung von Wasserstoff aus externen Quellen während der Durchführung von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten.

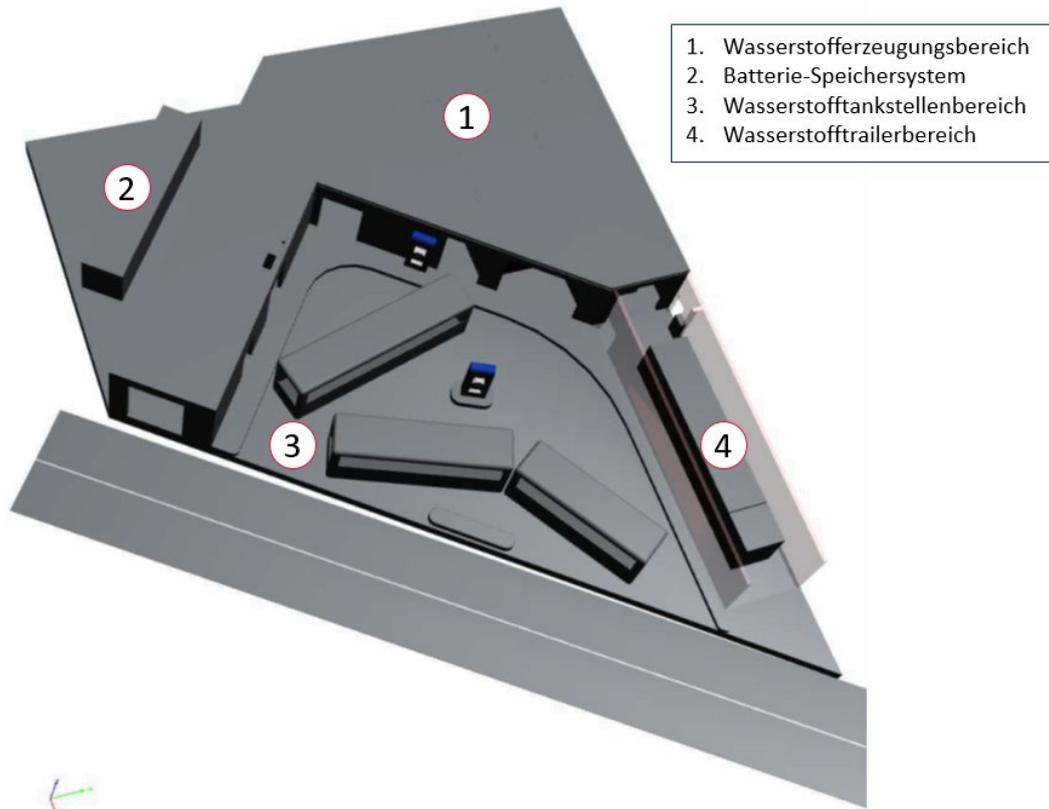


Abbildung 5-7: Geplante Fläche für erneuerbar gespeiste Wasserstoffherzeugung sowie Wasserstofftankstelle im Technologie- und Zukunftspark, Stand 2019 (Quelle: ZSW)

### 5.3. Wasserstofftankstelle

Die Wasserstofftankstelle für den emissionsfreien ÖPNV wird vorerst und bis zu einem erhofften Markthochlauf von BZ-Pkw nur für eine Druckbetankung auf 350 bar ausgelegt. Allerdings wird eine spätere Erweiterung um eine 700-bar-Zapfsäule angestrebt. Das mit dem Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg entwickelte Konzept wird in Abbildung 5-8 dargestellt und umfasst neben einer Tankstelle für BZ-Fahrzeuge auch eine Station zur Beladung von H<sub>2</sub>-Trailern. Entgegen den Erwartungen bei Projektbeginn kann die Wasserstoffherzeugung entkoppelt von den Betankungsanforderungen der Busse verlaufen. Dies liegt in der großen Speicherkapazität der Trailer sowie den ausreichend großen Tanks der Busse begründet, welche nur einmal am Tag mit H<sub>2</sub> befüllt werden müssen. In dem betrachteten Fall mit etwa neun Bussen stellt die Wasserstoffversorgung keine Herausforderung dar. Zudem könnten bei Bedarf zusätzliche Trailer eine ausreichende H<sub>2</sub>-Versorgung sicherstellen. Die Untersuchung unterstreicht die Notwendigkeit, Tankstellenkonzepte jeweils individuell und in Abhängigkeit von situationsgerechten Verbrauchsszenarien zu entwickeln.

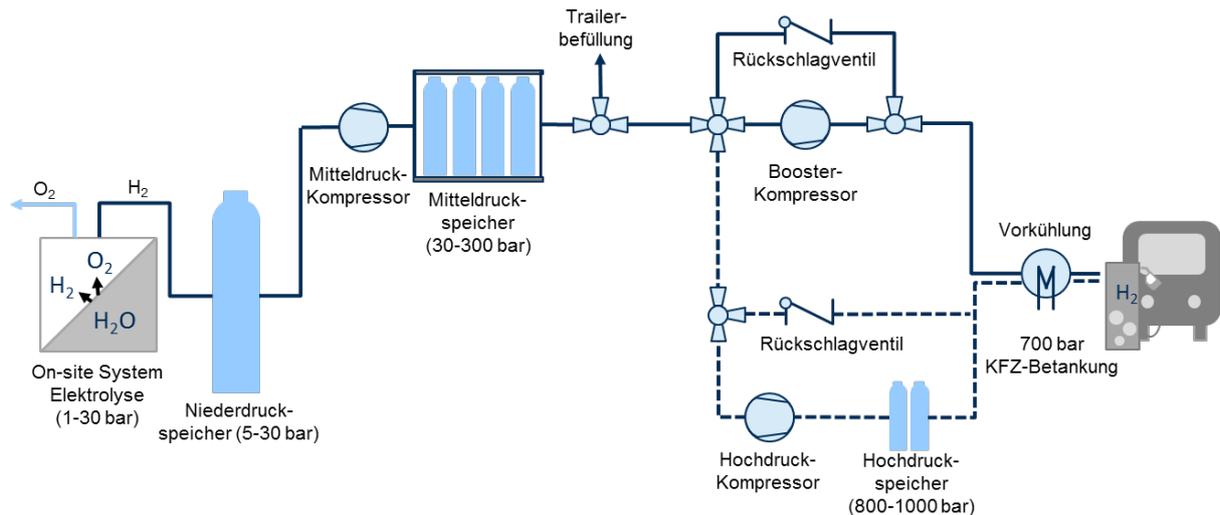


Abbildung 5-8: Darstellung des voraussichtlichen Tankstellensystems, Stand: November 2019 adaptiert nach [45]

#### 5.4. TCO-Analyse für den Technologie- und Zukunftspark Waiblingen

Für die Wasserstoffanlagen des Technologie- und Zukunftsparks Waiblingen wurde eine Total-Cost-of-Ownership-Analyse durchgeführt. Dafür wurde eine Excel-Maske entwickelt, die als Ergebnis die anfallenden Wasserstoffgestehungskosten in Abhängigkeit des Betrachtungszeitraumes darstellt. Neben den Investitionen (capital expenditure: CAPEX) wurden auch die Betriebskosten (operational expenditure: OPEX) der folgenden Komponenten sowie zugehörigen Nebenaggregate näher betrachtet:

- Elektrolyseur, Verdichter und Druckspeicher, sowie
- Trailer und Wasserstofftankstelle.

Des Weiteren wurden Baukosten der jeweiligen Komponenten sowie des notwendigen Netzanschlusses berücksichtigt. Um die Realitätsnähe der TCO-Analyse sicherzustellen, gingen in Expertengesprächen erhobene Erfahrungswerte in die Kalkulationen ein. Infobox 5-1 liefert weiterführende Informationen zur Methodik von TCO-Analysen.

### Infobox 5-1: Total-Cost-of-Ownership-Analyse

Total-Cost-of-Ownership-Analysen bzw. *Gesamtbetriebskostenanalysen* dienen der Ermittlung der Lebenszykluskosten jeglicher Technologien. Dabei werden neben den Kosten für die Anschaffung auch die Wartungs-, Reparatur- und Betriebskosten berücksichtigt. Daneben erfolgt meist ein Technologievergleich [54]. In die Analyse fließen alle Kosten verursachenden Dinge und Aktivitäten ein. Häufig werden die Kosten zusammengefasst und auf einen Faktor heruntergerechnet (Produktionseinheit, Arbeitsstunden, etc.) [55].

Bremen definiert eine TCO wie folgt: „Total Cost of Ownership ist ein Konzept zur vollständigen Erfassung der Kosten, die in Zusammenhang mit dem Erwerb eines Guts stehen, mit dem primären Ziel, alternative Bezugsquellen miteinander vergleichen zu können. Die Total Cost of Ownership eines Guts bezeichnen die stückbezogenen Gesamtkosten eines Guts, welche nach dem gleichnamigen Konzept ermittelt werden“ [56].

Meist werden die Kosten, wie nachfolgende illustriert, in Investitionen und Betriebskosten aufgeteilt.

Investitionen	Betriebskosten
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anschaffungskosten für Betriebsmittel (z. B. Bus, Anlage etc.)</li> <li>• Anschaffungskosten für Infrastruktur (z. B. Tankstelle etc.)</li> <li>• etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Personalkosten</li> <li>• Energie-/Kraftstoffkosten</li> <li>• Wartungs-/Instandhaltungskosten</li> <li>• Versicherung</li> <li>• Emissionskosten</li> <li>• etc.</li> </ul>

Abbildung 5-9: Inputdaten TCO

Die Ergebnisse der TCO-Analyse der Wasserstoffanlagen in Waiblingen werden in Abbildung 5-10 dargestellt. Die auf der Ordinate aufgetragenen Mehrkosten basieren auf dem Verhältnis der Wasserstoffgestehungskosten zu dem Marktpreis von 8,00 €/kg H<sub>2</sub> netto bzw. 9,50 €/kg H<sub>2</sub> brutto [57]. Die Wasserstoffgestehungskosten werden nach der Annuitätenmethode berechnet und berücksichtigen die Investitionen und die Betriebskosten der Anlage. Der Betrachtungszeitraum stellt den Zeitraum dar, innerhalb dessen die Anlage abbezahlt werden soll.

Im Rahmen der Analyse wird zunächst ein Inselnetzbetrieb nach Szenario 1 mit Wasserstofftankstelle aufgegriffen (Abbildung 5-10 oben links). In dieser Betriebsweise werden 2.710 Vollbenutzungsstunden des Elektrolyseurs erreicht, weshalb eine H<sub>2</sub>-Abnahmemenge von 55 Tonnen zugrunde gelegt wurde. Die aufzubringenden Investitionen übersteigen die potenziellen Erlöse der Wasserstoffabnahme zum derzeitigen Marktpreis signifikant, wobei auch die unterstellte Einsparung von Abgaben und Umlagen, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, die Wirtschaftlichkeit nicht nachhaltig verbessern kann. Daraus kann auf ein Abhängigkeitsverhältnis zwischen Vollbenutzungsstunden bzw. potenzieller Abnahmemenge und der Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs geschossen werden.

Durch den Wegfall der Wasserstofftankstelle können die Wasserstoffgestehungskosten fast halbiert werden (Abbildung 5-10 unten links). Allerdings ist dann einerseits natürlich keine Betankung von Fahrzeugen mehr möglich und steht andererseits kein direkter Abnehmer für den erzeugten Wasserstoff mehr zur Verfügung, weshalb zusätzliche Logistikkosten für den Vertrieb anfallen können.

In Szenario 2 verfügt der Elektrolyseur über einen Anschluss an das öffentliche Mittelspannungsnetz (Abbildung 5-10 oben rechts). Aufgrund der angestrebten Anpassung regulatorischer Rahmenbedingungen wird der größte Kostenbaustein, die EEG-Umlage, in diesem Szenario nicht berücksichtigt.

Durch die deutlich höhere Anzahl von 7.000 Vollbenutzungsstunden des Elektrolyseurs, sowie der daraus resultierenden Wasserstoffabnahmemenge von 131 Tonnen im Jahr, stellt sich ein besseres Verhältnis zwischen notwendigen Investitionen und Abnahmemenge ein. Dies führt verglichen mit einem Inselnetzbetrieb zu reduzierten Wasserstoffgestehungskosten im Netzanschlussbetrieb.

Der Wegfall der Wasserstofftankstelle reduziert die Wasserstoffgestehungskosten in diesem Szenario unterhalb des derzeit bestehenden Marktpreises von 8,00 €/kg H<sub>2</sub> netto. Wie erwähnt, ist in dieser Betrachtung kein Abnehmer vorgesehen, weshalb in einer Gesamtkostenkalkulation zusätzlich Logistikkosten berücksichtigt werden sollten.

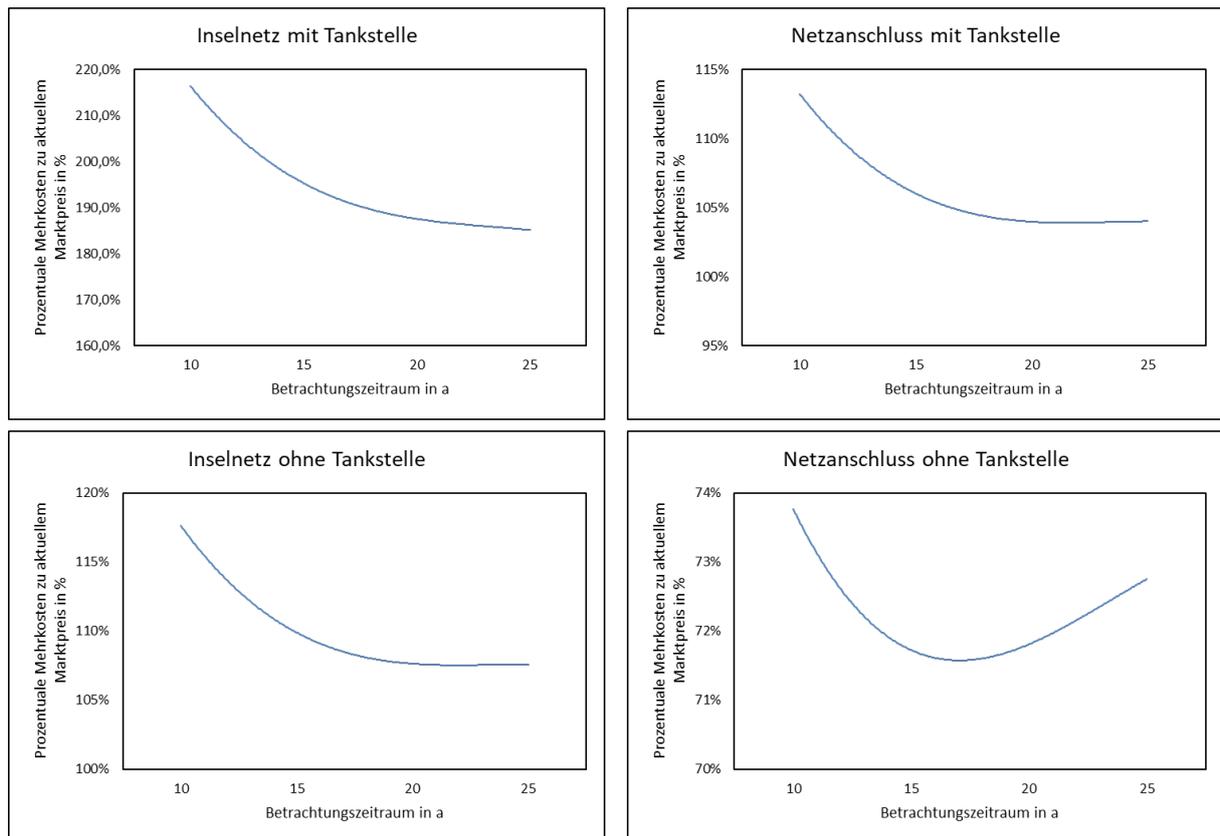


Abbildung 5-10: Betrachtungszeitraum in Abhängigkeit der Wasserstoffgestehungskosten verglichen mit dem derzeitigen Marktpreis

Die Ergebnisse der Total-Cost-of-Ownership-Analyse werden auszugsweise in Tabelle 5-1 zusammengefasst. Dabei werden nochmals die in Kapitel 4.1 hergeleiteten Szenarien zur Einsparung von Abgaben und Umlagen aufgegriffen und mit den Ergebnissen der in der Fallstudie durchgeführten Kalkulationen bewertet. Es wird deutlich, dass der *Netzanschluss ohne EEG* die bei weitem vorteilhafteste Variante ist. Insofern wäre auch für eine zügige Realisierung der in der nationalen Wasserstoffstrategie angestrebten Abschaffung der EEG-Umlagen zu plädieren.

Tabelle 5-1: Übersicht der Bewertungskriterien am Fallbeispiel des *Technologie- und Zukunftsparks* in Waiblingen

	<b>Inselnetzbetrieb</b>	<b>Netzanschluss mit EEG</b>	<b>Netzanschluss ohne EEG</b>
<i>Wirtschaftlichkeit</i>	-	+/-	++
<i>Abgaben und Umlagen</i>	++	-	++
<i>Vollbenutzungsstunden</i>	+/-	+	++
<i>Versorgungssicherheit</i>	-	++	++
Legende: ++ sehr gut, + gut, - schlecht			

Abschließend sei angemerkt, dass die Erkenntnisse hinsichtlich der Betriebsweise und Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffproduktionsanlagen sowie -tankstellen lediglich als Ergebnisse *einer* vollzogenen Fallstudie zu verstehen sind, aber nicht unmittelbar auf ähnliche Anwendungsfälle übertragen werden können. Während wertvolle Anhaltspunkte für künftige Untersuchungen bzw. Umsetzungsvorhaben bereitgestellt werden, sind in jedem Fall tiefgehende projektspezifische Analysen anzuraten.

## 6. Emissionsfreie Busse und deren Einsatzpotenziale

In diesem Kapitel werden zunächst die verschiedenen in diesem Bericht betrachteten Nullemissions-Antriebskonzepte für Busse aufgezeigt. Danach werden wichtige Einflussfaktoren für Technologieentscheidungen bei Busbeschaffungen anhand einer vergleichenden Analyse von *Key Performance Indicators* (KPI) der verschiedenen Konzepte identifiziert. Damit wird die Grundlage für die spätere Detailanalyse zweier Buslinien im Rems-Murr-Kreis und weiterführende Betrachtungen geschaffen.

Die nachfolgende Abbildung 6-1 illustriert, wie aus Sicht des deutschen *Verbands der Automobilindustrie* (VDA) ein gradueller Übergang vom heutigen, von Verbrennungsmotoren und fossilen Kraftstoffen dominierten Antriebsparadigmen, zu nachhaltigeren und zunehmend von elektrischen Antrieben und regenerativen Kraftstoffen geprägten Antriebskonzepten bewerkstelligt werden könnte. Die Strategie beinhaltet die drei Aspekte *Einsparen*, *Ergänzen* und *Ersetzen*.

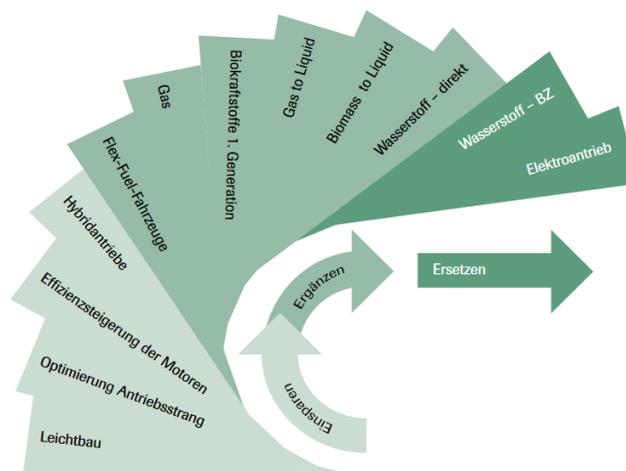


Abbildung 6-1: Fächerstrategie der deutschen Automobilindustrie [58]

Beim *Einsparen* wird der Fokus auf Effizienzsteigerung im Kern verbrennungsmotorischer Antriebe gelegt, um so den Mineralölverbrauch bei Weiternutzung bestehender Technologiekompetenzen zu senken. Trotz der hohen Reife bestehender Motorentechnik wurden bislang noch nicht alle möglichen Maßnahmen der Effizienzsteigerung ausgereizt. Durch neue Motorengenerationen, Leichtbau und die Optimierung von Getrieben und Hybridantrieben soll der Kraftstoffverbrauch weiter gemindert werden. Trotz der steigenden Fahrleistungen in Deutschland gelang es bereits, den absoluten Kraftstoffverbrauch zu vermindern [58]. Wie in Kapitel 2 dargelegt, sind allerdings wichtige regulatorische Vorgaben insbesondere zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung und zur Beschaffung von Nullemissionsfahrzeugen kaum bzw. nicht durch den alleinigen Einsatz von Verbrennungsmotoren zu erfüllen.

Die Strategie des *Ergänzens* hat die Steigerung des Anteils mit alternativen Kraftstoffen betriebener Fahrzeuge zum Ziel. Neben Erdgas und erdgasbasierten flüssigen Kraftstoffen werden auch alternative Treibstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zu den hier relevanten Kraftstoffen gezählt. Deutschland kann darauf verweisen, beim Einsatz von Biodiesel europaweiter Spitzenreiter zu sein [58]. Allerdings waren laut KBA Anfang 2019 in Baden-Württemberg nur wenige Flüssig- und Erdgasbusse unterwegs. Abbildung 6-2 illustriert die Verteilung alternativer Kraftstoffe beim Busbestand in Baden-Württemberg, dokumentiert den Bestand an Dieselbussen von 8.977 Fahrzeugen jedoch nicht [59]. Angesichts dessen Dominanz greift die Strategie des Ergänzens offenkundig noch nicht.

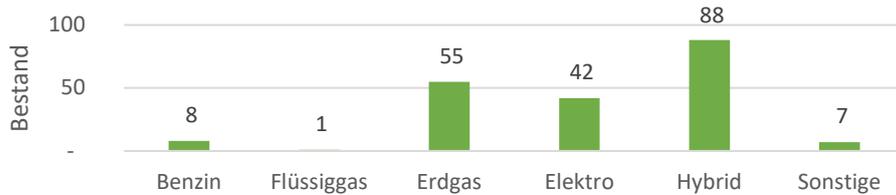


Abbildung 6-2: Kraftstoffarten ohne Diesel bei Bussen in Baden-Württemberg [59]

Die Strategie des *Ersetzens* zielt auf die langfristige Umstellung des Antriebsportfolios auf Wasserstofftechnik und batterieelektrische Fahrzeuge. Gemäß VDA kann Wasserstoff im sowohl in Brennstoffzellen wie auch Verbrennungsmotoren genutzt werden [58]. Allerdings ist anzumerken, dass die verbrennungsmotorische Umsetzung von H<sub>2</sub> aktuell nur eine marginale Rolle spielt. Abgesehen davon entspricht die Strategie des Ersetzens jedoch dem Fokus des vorliegenden Berichts.

### 6.1. Übersicht emissionsfreier Antriebskonzepte bei Bussen

Die im Kapitel 2 vorgestellten EU-Richtlinien zur drastischen Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und insbesondere die Vorgaben der Clean Vehicles Directive, welche auf die Beschaffung von Nullemissionsfahrzeugen seitens der öffentlichen Hand besteht, wirken als mächtige Treiber einer breiteren Markteinführung von Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeugen. Nachfolgend werden die bestehenden Technologieoptionen für die Auslegung der beiden Arten von Elektrobussen beschrieben.

Gemäß Kunith wird zunächst zwischen Brennstoffzellen- und Batteriebussen unterschieden [60]. Die Batteriebusse werden nach *Übernachtladung* (Overnight Charging: ON) per Ladekabel (Plug-in), *Gelegenheitsladung* an Haltestellen (Opportunity Charging: OC) mit Pantografen, *Induktionsladung* sowie *Plug-in*, Gelegenheitsladung mittels *partieller Oberleitung* (PO) sowie *Batteriewechsel* (Battery Changing: BC) unterteilt. Die vorliegende Studie differenziert darüber hinaus bei BZ-Bussen nach *brennstoffzellendominanten* Antriebskonzepten bzw. *Fuel Cell Electric Vehicles* (FCEV) und *Range-Extender-Systemen* (FC-REX). Die beiden Konzepte werden unten ausführlicher beschrieben und zusammen mit Batteriebussen in einer TCO-Analyse betrachtet.



Abbildung 6-3: Übersicht innovativer Technologietypen zur Elektrifizierung des Busverkehrs [60]

### 6.1.1. Batterieelektrische Busse und Ladetechnologien

Als batterieelektrischer Bus bzw. *Battery Electric Vehicle* (BEV) werden in dieser Studie Busse bezeichnet, in denen Akkumulatoren als dominierende oder ausschließliche Energiespeicher zum Einsatz kommen. Die Akkumulatoren bzw. umgangssprachlich *Batterien* versorgen den Elektromotor mit Strom [61]. Unterschieden werden batterieelektrische Busse hinsichtlich ihrer Ladetechnologien. Grundsätzlich wird zwischen Übernachtladung, sowie Gelegenheitsladung und Batteriewechsel differenziert.

Bei der Übernachtladung erfolgt die Ladung ausschließlich auf dem Betriebshof innerhalb der Betriebspausen. Dabei werden meist konduktive, also steckerbasierte, Systeme unter 100 kW Ladeleistung genutzt. Diese Busse zeichnen sich durch eine größere Batteriekapazität aus, da die Nachlademöglichkeiten im laufenden Betrieb eingeschränkt sind. Dennoch besteht eine Reichweitereinschränkung verglichen mit dem Diesel [60]. In der Praxis liegen die Reichweiten deutlich unter 400 km. Zukünftig können jedoch voraussichtlich auch bei batterieelektrischen Fahrzeugen mit ON höhere Reichweiten mithilfe neuartiger, noch in der F&E-Phase befindlicher, Batterietechnologien erreicht werden [62]. Die Ladetechnologie wird in Abbildung 6-4 illustriert.

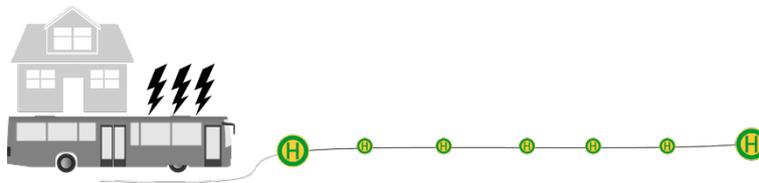


Abbildung 6-4: Depotladung

Die Gelegenheitsladung ist, wie in Abbildung 6-3 dargestellt, in vier Möglichkeiten der Ladung zu differenzieren und erfolgt mittels Pantograf, Induktion, Plug-in oder partieller Oberleitung. Bei den drei erstgenannten Konzepten bieten sich insbesondere Endhaltestellen, an denen Wendepausen eingelegt werden, als Ladeorte an. Mithilfe dieses Konzepts kann einer durch die Batteriekapazität beschränkten Reichweite entgegengewirkt werden. Es besteht jedoch eine Bindung der Busse an Strecken, die mit Ladepunkten ausgestattet sind, was in der Praxis erhebliche Einschränkungen hinsichtlich der betrieblichen Flexibilität mit sich bringt. Die Anzahl der Lademöglichkeiten entlang der Strecke ist abhängig von diversen Randbedingungen und Einflüssen [60]. Die Gelegenheitsladung an Haltestellen wird in Abbildung 6-5 dargestellt.

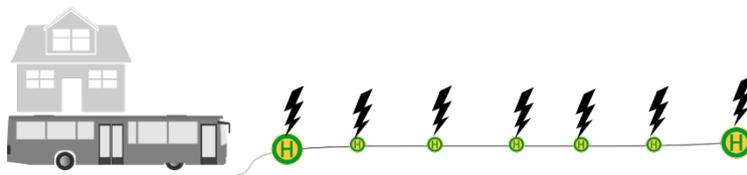


Abbildung 6-5: Gelegenheitsladung

Eine weitere Variante der Gelegenheitsladung ist die partielle Oberleitung, bei der die elektrische Energie fast zeitgleich in kinetische Energie umgewandelt wird. Die Busse selbst unterliegen dadurch keiner Reichweitenbeschränkung. Je nach Auslegung bzw. Batterieausstattung können die Busse streckenweise auch unabhängig von Oberleitungen operieren. Dies ermöglicht einen gewissen Grad der Autonomie. Erforderlich ist jedoch in jedem Fall eine Oberleitungsinfrastruktur [60]. Von den Mitte des 20. Jahrhunderts (1954 bis 1957) vorhandenen 55 Oberleitungsbusnetzen in Deutschland [63] existieren derzeit nur noch drei: in Esslingen (Baden-Württemberg), Solingen (Nordrhein-Westfalen) und Eberswalde (Brandenburg) [60]. Abbildung 6-6 verdeutlicht das Ladekonzept.

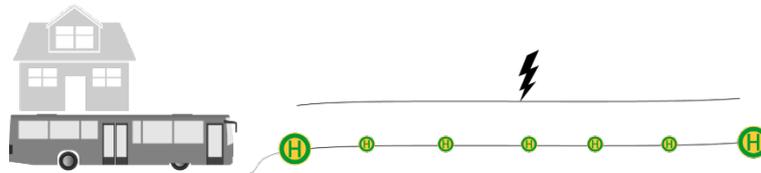


Abbildung 6-6: Partielle Oberleitung

Die letzte Variante bedient sich eines Batteriewechselsystems. Dabei erfolgt ein Wechsel der Batterie, wobei die entladene ausgebaut und durch eine geladene ersetzt wird. Diese Ladeform erfordert neben Leerfahrten zur Wechselstation, zusätzlichem Personal und einem deutlich höheren Platzbedarf auch höhere Investitionen [56]. Die Variante wird in Abbildung 6-7 aufgezeigt.

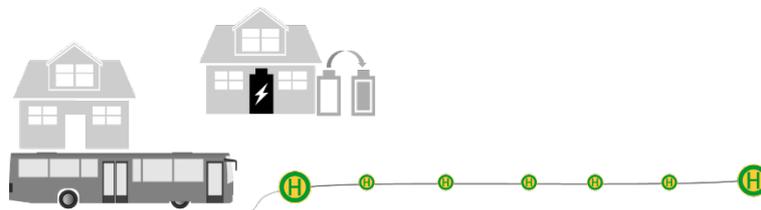


Abbildung 6-7: Batteriewechselsystem

### 6.1.2. Detailbetrachtung Brennstoffzellenbusse

Bei Brennstoffzellenbussen kommen sowohl brennstoffzellendominante Antriebe wie auch Range-Extender-Systeme zum Einsatz. Brennstoffzellenbusse (Abbildung 6-8) sind Dieselmotoren in Bezug auf Infrastruktur und Betriebsverhalten am ähnlichsten. Die Einsatzreichweiten der beiden Konzepte sind miteinander vergleichbar und auch das Tankkonzept ist ähnlich. Die Gewinnung der elektrischen Energie erfolgt bei Brennstoffzellenbussen primär durch die Umwandlung von Wasserstoff [60]. Die Antriebssystemkapazität ist dabei vom Energieinhalt des im Tank mitgeführten  $H_2$  abhängig [61].

Ein typischer BZ-dominanter 12-Meter-Solobus verfügt über eine Brennstoffzelle von 100 kW Leistung, einen 350-bar-Drucktank mit 40 kg Wasserstoff, sowie eine Batterie von 30 kWh Speichervermögen. Der Wasserstoffverbrauch BZ-dominanter Busse liegt relativ konstant zwischen 8,5 und 10,5 kg  $H_2$ /100 km [30]. Für BZ-dominante Busse werden Reichweiten von 300 bis 450 km und Betankungszeiten von unter 10 Minuten angegeben [64].

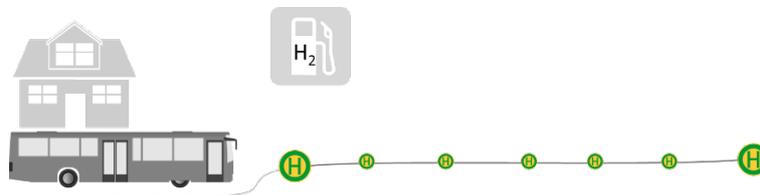


Abbildung 6-8: Brennstoffzellenbus

Ein Brennstoffzellenbus mit Range-Extender hat eine größere Batterie als ein reiner Brennstoffzellenbus, jedoch meist eine kleiner dimensionierte Brennstoffzelle. Ein typischer Range-Extender-Bus weist eine BZ von lediglich 30 kW und einen Tank mit nur 15 kg Wasserstoff, aber eine potente Batterie von 250 kWh Speicherkapazität auf. Diese Technologie benötigt neben einer Wasserstofftankstelle zusätzlich noch eine Ladeinfrastruktur für die Batterie. Je nach Fahrzeugkonfiguration und Umlauflänge kann der Verbrauch eines FC-REX-Busses stark variieren, da er nur batteriebetrieben oder zur Erzielung einer höheren Reichweite unter Nutzung der BZ fahren kann. Aufgrund der stark variierenden Wasserstoff- und Stromverbräuche lassen sich für FC-REX-Busse keine allgemeingültigen Reichweitemaussagen treffen. Im Vergleich zu reinen Batteriebusen ist jedoch für beide BZ-Konzepte ein Zugewinn an Reichweite und eine größere Unempfindlichkeit gegenüber witterungsbedingten Reichweitenverlusten festzustellen, da einerseits durch den mitgeführten Wasserstoff mehr Energie zur Verfügung steht und andererseits die Abwärme der BZ zur Fahrzeugklimatisierung genutzt werden kann [8, 30]. Zusammen mit den kurzen Betankungszeiten ermöglicht die hohe Reichweite eine große betriebliche Flexibilität von Brennstoffzellen- gegenüber Batteriebusen. Das Tankkonzept ist in Abbildung 6-9 aufgezeigt.



Abbildung 6-9: Brennstoffzellenbus mit REX

Wie in Infobox 6-2 näher erläutert, bieten Brennstoffzellenfahrzeuge aller Klassen verschiedene ökologische Vorteile. Entsprechend der Anforderungen des *Energiekonzepts* der Bundesregierung ermöglichen sie die Nutzung erneuerbarer Energien als Kraftstoff, wandeln diesen mit hoher Effizienz in Bewegungsenergie um und reduzieren so maßgeblich den Ausstoß von Treibhausgasen. Vergleichbar einem Batteriefahrzeug entstehen beim Fahren keinerlei Treibhausgas- oder Schadstoffemissionen und nahezu keine Antriebsgeräusche. Damit können BZ-Fahrzeuge gerade in urbanen Zentren einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung verkehrsbedingter Emissionen und zur Erfüllung gesetzlicher Vorgaben zur Luftqualität leisten [39]. Als Elektrofahrzeuge tragen BZ-Busse ebenso wie Batteriebusse überdies zur Abwendung von Fahrverboten in hochbelasteten Städten wie z. B. Stuttgart bei.

Der für den Praxiseinsatz wichtige technologische Reifegrad von BZ-Bussen ist heute zwischen den Stufen 8, also *Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich – Produkt* und Stufe 9: *Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes – Produkt* zu verorten [11, 65]. Dabei ist zu beachten, dass trotz der insgesamt relativ hohen Reife nicht unerhebliche Unterschiede zwischen den von verschiedenen Herstellern angebotenen Modellen bestehen. Infobox 7-1 liefert eine Übersicht zu dem kommerziell verfügbaren und damit technisch reifen Busangebot.

#### **Infobox 6-1: Anbieter von Brennstoffzellenbussen und deren Produkte**

Das Angebot an BZ-Bussen ist klein, aber existent: Während sich der belgische Busersteller *Van Hool* in den letzten Jahren als in Europa besonders aktiver Anbieter hervortat, boten bzw. bieten auch zahlreiche weitere Firmen in der EU, Nordamerika und Asien BZ-Busse an. Beispielsweise entwickelten *APTS*, *Broad Ocean*, *EvoBus*, *Hyundai*, *New Flyer*, *Solaris*, *Toyota*, *VDL* und *Wrightbus* Fahrzeuge und erprobten diese im Zusammenspiel mit H<sub>2</sub>-Tankstellen in diversen Demonstrationsprojekten wie z. B. dem EU-Vorhaben CHIC [49]. Aktuell ist das Angebot in Europa verfügbarer BZ-Busse allerdings begrenzt.

*Van Hool* sicherte sich große Aufträge für die Lieferung von BZ-Bussen an die Städte Köln und Wuppertal. Die teilweise bereits ausgelieferten 12-Meter-Busse vom Typ *A330* verfügen über eine Reichweite von 350 km. Das polnisch-spanische Unternehmen *Solaris* bringt ein neues 12-Meter-Modell mit einer Reichweite von mehr als 350 km auf den Markt. Daimler gab die Fortführung der Aktivitäten bei BZ-Bussen bekannt: Der Batteriebus *eCitaro* wird weiterentwickelt und um einen BZ-Range-Extender erweitert, der die Reichweite deutlich auf 400 km erhöht. Der Bus soll bis 2022 erprobt und dann verkauft werden [8, 66]. Obwohl neben den beispielhaft genannten weiteren Hersteller BZ-Busse veräußern, ist ein unzulängliches Angebot an BZ-Bussen zu beklagen, was den Nachfragepotenzialen von mehr als 1.500 Bussen entgegensteht [67].

Im Gegensatz zu Europa engagieren sich asiatische Hersteller stark im Bereich von BZ-Bussen. So vertreibt *Toyota* seit 2018 ein neues BZ-Busmodell kommerziell in Japan und beabsichtigt, 2020 über 100 Exemplare in Tokyo zum Einsatz zu bringen. Über den portugiesischen Busersteller *CaetanoBus* wird die BZ-Technologie mittlerweile auch in Europa verkauft [11]. China steigt in großem Ausmaß in die Fertigung von BZ-Bussen ein und auch koreanische Hersteller wie *Hyundai* kommerzialisieren BZ-Busse mit Nachdruck [37].

## 6.2. Einflussfaktoren für Technologieentscheidungen bei Busbeschaffungen

Bei der Wahl einer Antriebstechnologie für eine Buslinie ist auf verschiedene Indikatoren zu achten, da die Technologien unterschiedliche Bedarfe (z. B. Ladeinfrastruktur) und Eigenschaften (z. B. Reichweite) aufweisen. Abbildung 6-10 gibt hierzu einen Überblick.

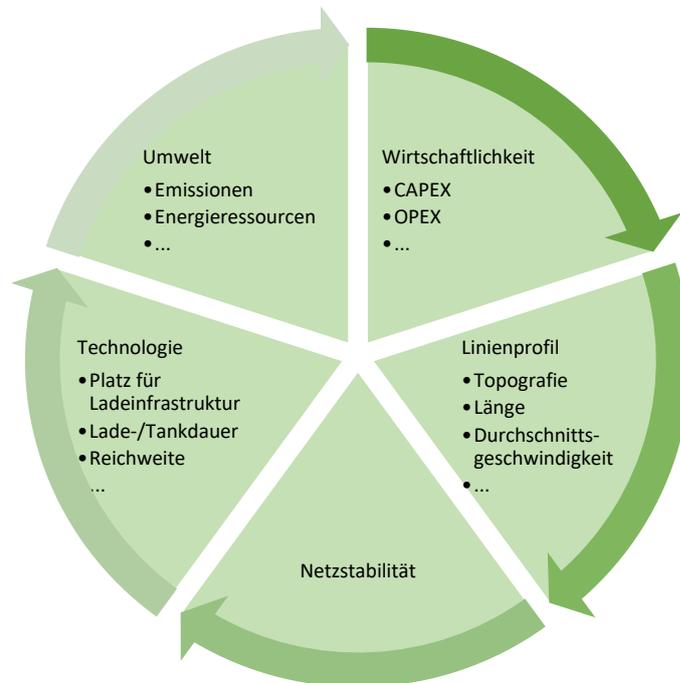


Abbildung 6-10: Key Performance Indikatoren [68]

Das Linienprofil hat einen großen Einfluss auf die Wahl einer Antriebstechnologie, da die gewählte Technologie einen reibungslosen Betriebsablauf gewährleisten sollte. In den Indikator *Linienprofil* fließen unter anderem die Topografie, die Durchschnittsgeschwindigkeit sowie die Länge der Strecke ein, da diese Faktoren den Verbrauch des Busses mitbestimmen [68].

Vereinfachend kann zwischen zwei Linienprofilen unterschieden werden: dem Überland- und dem innerstädtischen Bus. Die innerstädtische Linie ist normalerweise kürzer als die Überlandlinie. Zudem zeichnet sie sich durch eine geringere Durchschnittsgeschwindigkeit aus, da sie meist mehr Haltestellen anfährt, Ampeln auf der Strecke den Verkehrsfluss aufhalten und die Höchstgeschwindigkeit auf 30 oder 50 km/h begrenzt ist. Demgegenüber steht die Überlandlinie, welche weniger Bremsvorgänge vorweist, da die Abstände zwischen den Haltestellen größer sind und weniger Ampeln auf der Strecke vorhanden sind [68].

Die verschiedenen im Kapitel 5.1 vorgestellten Antriebskonzepte sind mit jeweils charakteristischen Key Performance Indicators verbunden. Ausgewählte, besonders aussagekräftige KPIs einschließlich von Reichweite, Alltags- bzw. Betriebstauglichkeit, Kosten für Kraftstoff und Infrastruktur, sowie Lade- bzw. Betankungsdauer, wurden im Rahmen der hier protokollierten Forschungsarbeit vergleichend bewertet. Dies erfolgte auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse und eines umfassenden Wissensaustauschs mit drei im Rems-Murr-Kreis tätigen und von diesen beauftragten Busbetreibern. Die Methodik und Ergebnisse der Bewertungen wurden dabei regelmäßig abgeglichen und validiert. Die aus Betreibersicht hochsensiblen Kosten wurden unter strikten Vertraulichkeitsvorbehalten diskutiert und können daher nur näherungsweise protokolliert werden. Die Ergebnisse zu den oben genannten KPIs werden in Tabelle 6-1 vorgestellt; andere Befunde später aufgegriffen.

Tabelle 6-1: Übersicht der Bewertungskriterien innovativer Antriebe zur Elektrifizierung des Busverkehrs

	Wasserstoff	Wasserstoff REX	Plug-In Nacht	Pantograf	Induktion	Plug-In Tag	Partielle Oberleitung
<i>Reichweite</i>	+	++	--	+	+	+	++
<i>Betriebstauglichkeit</i>	++	+	+/--	++	++	--	+
<i>Kraftstoffkosten</i>	-	+/-	++	++	++	++	++
<i>Kosten für Infrastruktur</i>	+/-	-	+	+/-	--	+	--
<i>Ladedauer</i>	++	++	-	++	++	--	++
Legende: ++ sehr gut, + gut, - schlecht, -- sehr schlecht							

Bei der Betrachtung der Reichweite schneiden Busse mit einem Wasserstoff-REX sowie Busse mit einer partiellen Oberleitung im Vergleich am besten ab. Die Oberleitungsbusse erhalten ihre Energie beständig während der Fahrt, solange sie an die Oberleitung angeschlossen sind, während der Wasserstoff-REX durch die Batterie und den Wasserstofftank eine hohe Reichweite hat. Diese ist jedoch, wie in Kapitel 6.1 und 8.3 beschrieben, abhängig von der Auslegung der Batterie und der Wasserstofftanks.

Bei der Ladedauer schneiden die beständig ladende partielle Oberleitung, die Induktion, der Pantograf mit seiner von der Ladeleistung abhängigen Ladedauer, sowie die innerhalb weniger Minuten betankbaren Wasserstoffbusse am besten ab. Die Betriebstauglichkeit wird durch die Faktoren Reichweite und Ladedauer beeinflusst, bezieht aber auch die Alltagserfahrungen der Busbetreiber ein.

Hier ist zu beachten, dass im Falle aller dargestellten, hochinnovativen Buskonzepte erhebliche Unterschiede hinsichtlich Alltagstauglichkeit und Zuverlässigkeit zwischen den von verschiedenen Herstellern angebotenen Modellen bestehen können. Bei Beschaffungsentscheidungen ist damit eine anspruchsvolle Prüfung der unterschiedlichen Modelle von besonderer Bedeutung.

Eine weitere wichtige Bewertungsgröße ist die Nachhaltigkeit der dargestellten Antriebstechnologien. Wie in den Kapiteln 1 und 2 dargestellt, ergibt sich die Notwendigkeit für die breite Markteinführung emissionsarmer- bzw. freier Fahrzeuge durch die Verpflichtung zur Erfüllung ehrgeiziger klimapolitischer Ziele einerseits und anspruchsvoller europäischer Regularien insbesondere zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Beschaffung umweltfreundlicher Fahrzeuge andererseits. Infobox 6-2 stellt für die Bewertung der Nachhaltigkeit brennstoffzellen- und batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge zentrale Sachverhalte dar.

### Infobox 6-2: Nachhaltigkeit elektrischer Fahrzeuge: Kernaussagen, Verfahren und Studien

Brennstoffzellenfahrzeuge aller Klassen bieten verschiedene ökologische Vorteile. Entsprechend den Anforderungen des *Energiekonzepts* der Bundesregierung ermöglichen sie die Nutzung erneuerbarer Energien als Kraftstoff, wandeln diesen mit hoher Effizienz in Bewegungsenergie um und reduzieren so maßgeblich den Ausstoß von Treibhausgasen. Vergleichbar einem Batteriefahrzeug entstehen beim Fahren keinerlei Treibhausgas- oder Schadstoffemissionen und nahezu keine Antriebsgeräusche. Damit können BZ-Fahrzeuge gerade in urbanen Zentren einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung verkehrsbedingter Emissionen und zur Erfüllung gesetzlicher Vorgaben zur Luftqualität leisten [39]. Als Elektrofahrzeuge tragen BZ-Busse ebenso wie Batteriebusse überdies zur Abwendung von Fahrverboten in hochbelasteten Städten wie z. B. Stuttgart bei.

Für die Ermittlung während des Fahrbetriebs anfallender Emissionen sind laut herrschender Gesetzgebung lediglich *Tank-to-Wheel*-Emissionen relevant, die nur die eigentlichen Fahrzeugabgase einschließen. Somit gelten Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge als Nullemissionsfahrzeuge, da bei der Herstellung von Strom bzw. H<sub>2</sub> anfallende THG-Emissionen nicht berücksichtigt werden. Für die Beurteilung der THG-Emissionen sind *Well-to-Wheel*-Bilanzen (WtW-Bilanzen) wesentlich aussagekräftiger, da sie auch die während der Produktion, Verteilung und Abgabe von Kraftstoffen entstehenden klimarelevanten Emissionen erfassen [69].

WtW-Analysen z. B. der Firma *Daimler* zeigen, dass die THG-Emissionen von brennstoffzellen- und batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen wesentlich geringer als diejenigen mit fossilen Treibstoffen betriebener Verbrennerfahrzeuge sind [70]. Beide Elektrofahrzeugkonzepte punkten mit einer deutlich höheren Energieeffizienz. Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge weisen insbesondere beim Einsatz erneuerbarer Energien extrem niedrige THG-Emissionen auf, wobei Batteriefahrzeuge aufgrund ihrer höheren Effizienz die geringsten Emissionen verursachen. Allerdings sind Batteriefahrzeuge nicht für alle Einsatzfelder geeignet. Bei Nutzung fossiler Energien verschlechtern sich die Emissionsbilanzen. Dies bedingt, dass der Einsatz von kohlenstoffarm oder -frei hergestelltem Strom bzw. H<sub>2</sub> eine unabdingbare Voraussetzung für weitreichende Verminderungen von THG-Emissionen ist. Aktuell wird H<sub>2</sub> für den Verkehr nur teilweise auf EE-Basis hergestellt und oftmals aus Erdgas reformierter oder Nebenprodukt-H<sub>2</sub> genutzt [8].

Demgegenüber unterstützt die Politik nachdrücklich die Verwendung von erneuerbaren Kraftstoffen im Bereich der Elektro- bzw. H<sub>2</sub>-Mobilität: Die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung stellt klar, dass nur auf EE-Basis hergestellter bzw. grüner Wasserstoff auf Dauer nachhaltig ist und setzt das Ziel, „grünen Wasserstoff zu nutzen, für diesen einen zügigen Markthochlauf zu unterstützen sowie entsprechende Wertschöpfungsketten zu etablieren“ [3]. Das Land Baden-Württemberg verfolgt ähnliche Zielsetzungen [4]. Überdies verpflichten die in Kapitel 2 referierten Regularien die Industrie zum Einsatz von EE-Kraftstoffen und erkennen sowohl EE-Strom wie auch EE-H<sub>2</sub> als anrechnungsfähige Kraftstoffe an. Daher ist davon auszugehen, dass zukünftig die Anteile erneuerbarer Kraftstoffe einschließlich von EE-H<sub>2</sub> wesentlich steigen.

Allerdings bilden selbst WtW-Analysen lediglich einen Teil der mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Fahrzeugen verbundenen Umweltbelastungen ab. Lebenszyklusanalysen berücksichtigen ganzheitlich auch die bei Produktion und Wiederverwertung aufkommenden Belastungen und stellen daher Umwelteffekte besonders realitätsnah dar. Zwei der wenigen für BZ-Fahrzeuge durchgeführten Lebenszyklusanalysen kommen zu dem Schluss, dass die Umweltbelastungen BZ-betriebener Pkw und Busse auf einem insgesamt ähnlichen Niveau liegen. Sofern EE-Kraftstoffe genutzt werden ist die Umweltbilanz in beiden Fällen sehr günstig und deutlich besser als diejenige vergleichbarer Dieselfahrzeuge [71].

## 7. Fallstudien zu emissionsfreien Buslinien im Rems-Murr-Kreis

Nachfolgend wird der Einsatz emissionsfreier Busse anhand konkreter Anwendungsfälle im Rems-Murr-Kreis untersucht. Zunächst werden die Entscheidungsprozesse zur Auswahl zweier exemplarisch zu analysierenden Buslinien dargelegt. Dem schließt sich die Untersuchung der ausgewählten Buslinien an, wobei eine innerstädtische und eine Überlandstrecke betrachtet wird. Schließlich werden die übergreifenden Ergebnisse von Gesamtbetriebskostenanalysen vereinfachend zusammengeführt.

Für die Auswahl zweier Buslinien mit Relevanz sowohl für die Bustreiber wie auch die wissenschaftliche Betrachtung war eine Abstimmung zwischen den für den Busbetrieb Verantwortlichen und den Studierstellern unerlässlich. Als für die Vergabe von Konzessionen für einen eigenwirtschaftlichen Betrieb von Bussen zuständiger Aufgabenträger wurde das Landratsamt Rems-Murr, ebenso wie Busunternehmer, intensiv konsultiert. Wer auf öffentlichen Straßen gewerbsmäßig Personen zu befördern beabsichtigt, benötigt nach *Personenbeförderungsgesetz* (PBefG) eine Genehmigung (auch *Linienkonzession* genannt). Diese Genehmigung erteilt „die Genehmigungsbehörde, in deren Bezirk der Verkehr ausschließlich betrieben werden soll“ [72]. Die Konzession kann für Busse maximal zehn Jahre vergeben werden, unter bestimmten Umständen aber auch für einen längeren Zeitraum gelten [72].

Die Konzessionen für den eigenwirtschaftlichen Betrieb einer der beiden letztendlich ausgewählten Linien wurden kurz vor Beginn der Studie vergeben und haben eine Laufzeit bis mindestens 2025. Als *eigenwirtschaftlich* werden Verkehre bezeichnet, deren Aufwand durch Beförderungserlöse, allgemeine Finanzierungsregelungen und sonstige Erträge getragen wird [73]. Der der Konzessionsvergabe zugrunde gelegte preisliche Rahmen ließ wenig Spielraum für mit einer nachträglichen Umorientierung auf alternative Antriebskonzepte verbundene Mehrkosten gegenüber Dieselnissen. Bereits in einer frühen Phase der Sondierungen wurde klar, dass entsprechende Mehrkosten Busunternehmer vor große Herausforderungen stellten. Daher zog sich ein Busbetreiber aus den Verhandlungen zurück. Dennoch gelang es, durch Einbeziehung neuer Partner die Dynamik der Sondierungsprozesse hinsichtlich der Schaffung emissionsfreier Buslinien im Kreis aufrecht zu halten.

Bereits zum Zeitpunkt der Ausschreibung der o. g. Konzessionen im Jahr 2017 war der Entschluss gefasst worden, zwei Buslinien eines Bündels in Waiblingen zu elektrifizieren. Für die *Citybus-Linien* 208 und 218 wurde Einsatz von Elektrobussen zur Ausschreibungsbedingung gemacht und zugleich der Ausgleich entsprechender Mehrkosten ermöglicht [74]. Seit Beginn des Jahres 2020 werden die beiden Linien mit insgesamt drei mittelgroßen, batterieelektrischen *Midi-Bussen* bedient, die einerseits die Routen trotz beengter Platzverhältnisse gut befahren können und andererseits gerade die Innenstadt von Schadstoff- und Lärmemissionen entlasten [75]. Dabei erforderte die Ertüchtigung für den elektrischen Busbetrieb einige Änderungen: So erfolgten eine zusätzliche Ausstattung der Werkstatt, eine Schulung der Mitarbeiter und eine neue Ausrichtung der Disposition. Letztere war notwendig, weil durch die batterieelektrischen Busse zusätzlich zu den Lenk- und Ruhezeiten Umlauf- und Ladezeiten berücksichtigt werden müssen [76].

Als weiterer Schritt der Elektrifizierung des Linienbündels lag der Einsatz eines brennstoffzellenelektrischen Busses nahe. Die letztendlich ausgewählte *Linie 207* gehört dem gleichen Bündel wie die beiden Citybus-Linien an und weist die größte Streckenlänge im Bündel auf. Aufgrund der in aller Regel gegenüber Batteriefahrzeugen größeren Reichweite brennstoffzellenelektrische Busse bot sich Linie 207 als Testfeld für die Analyse der Einsatztauglichkeit von BZ-Bussen an. Auch die Möglichkeit der Einbeziehung der Erfahrungen mit den Midi-Bussen trug zur Attraktivität des Untersuchungsfalls bei [33].

Vor Beginn der Analyse der beiden Buslinien sei festgehalten, dass die oben geschilderten Erfahrungen zur Ausgestaltung von Ausschreibungen für Konzessionen von erheblicher Relevanz sind. Während die mangelnde Berücksichtigung der Mehrkosten alternativer Antriebe im Falle der Sondierungen zum Einsatz von BZ-Bussen in deutlicher Zurückhaltung seitens der Busbetreiber resultierte, wurde dank der

möglichen Mehrkostenkompensation bei der Ausschreibung der elektrifizierten Citybus-Linien eine erfolgreiche Betriebsaufnahme möglich.

Daraus kann geschlossen werden, dass Konzessionsvergaben die Mehrkosten alternativer Antriebskonzepte berücksichtigen bzw. einpreisen sollten, sofern ein Einsatz emissionsarmer oder –freier Fahrzeuge gewünscht ist. Dies ist insbesondere in Hinblick auf Erfüllung der in Kapitel 2 und 8.2 diskutierten Beschaffungsvorgaben für Nullemissionsfahrzeuge der Clean Vehicles Directive von Bedeutung.

### 7.1. Buslinie 207: Korb – Fellbach

Die Ergebnisse von Technologiebewertung und TCO-Analyse der Buslinie 207 werden nachfolgend vorgestellt. Die Linie verläuft von Fellbach über Waiblingen nach Korb und kann daher durch die Waiblinger Anlage mit Wasserstoff versorgt werden. Der genaue Streckenverlauf wird in Abbildung 7-1 aufgezeigt. Die Route beinhaltet verschiedene Start- und Endhaltestellen, die je nach Tageszeit angefahren werden. An Werktagen bedient der Bus die Strecke überwiegend im 15-Minuten-Takt, der morgens und abends auf einen 30-Minuten-Takt reduziert wird. An Wochenenden und Feiertagen verkehren die Busse im halbstündlichen oder stündlichen Takt [77]. Für die Bedienung der Strecke und die Einhaltung der Taktzeiten werden sieben Solobusse benötigt. Die Streckenlänge beträgt etwa 22 km und die Jahreskilometerleistung der eingesetzten Busse ca. 349.000 km.

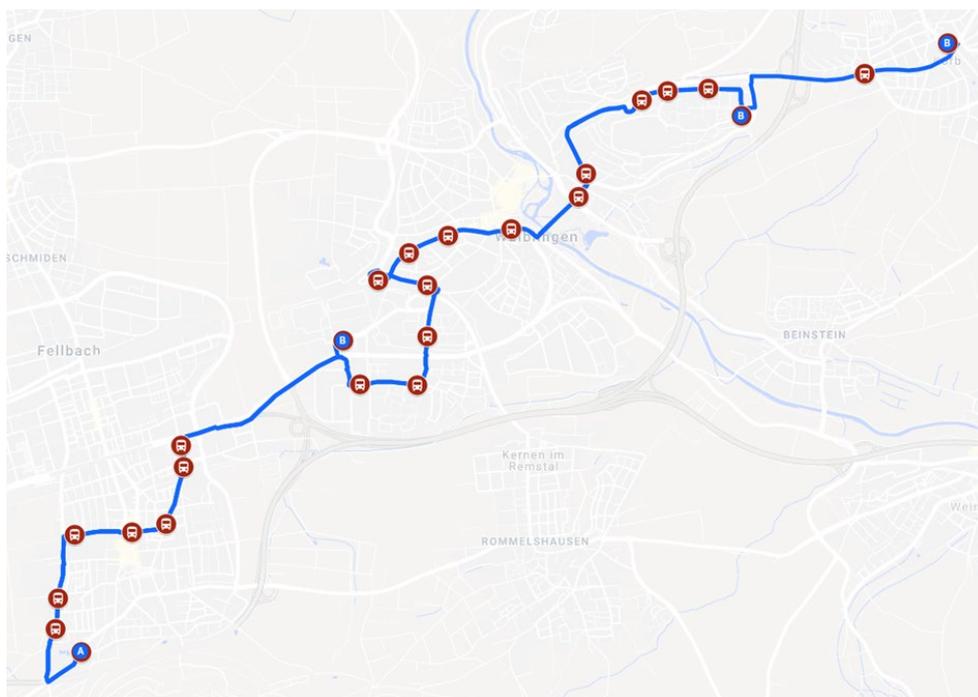


Abbildung 7-1: Streckenverlauf Linie 207

Auf Grundlage der in Kapitel 6 ausgeführten Technologiebewertung waren die an den oben geschilderten Auswahlprozessen bezüglich der zu betrachteten Buslinien Beteiligten zu dem Schluss gekommen, dass nicht für alle Antriebsalternativen eine Detailanalyse erforderlich sei. Vielmehr sollten weiterführende Technologie- und Total Cost of Ownership-Bewertungen auf die vielversprechendsten Nullemissionskonzepte brennstoffzellendominante BZ-Busse, BZ-REX-Busse und per Pantograf beladene Batteriebusse begrenzt werden.

Die Ergebnisse der in Anlehnung an Kunith [60] konzipierten TCO-Analysen für die genannten Antriebskonzepte, sowie für Dieselbusse als Referenz, werden in Abbildung 7-2 dargestellt. Der Analyse wird eine jährliche Fahrleistung von 349.000 km zugrunde gelegt. Als Kraftstoffkosten werden bei Diesel 1,14 €/Liter, bei Strom 17 ct/kWh und bei Wasserstoff 8,00 €/kg angenommen. Des Weiteren sind in den CAPEX-Kosten Infrastrukturkosten für eine Wasserstofftankstelle (FCEV und FC-REX) und Ladesäulen (BEV und FC-REX) auf den Betriebshöfen, sowie ein Pantograf zur Positionierung entlang der Strecke (BEV) enthalten. Da für Dieselbusse bereits eine flächendeckende Betankungsinfrastruktur besteht, wurden keine Kosten zur Kraftstoffversorgung von Dieselfahrzeugen berücksichtigt. Überdies wurde bei den Nullemissionskonzepten die Inanspruchnahme moderater staatlicher Fördermittel der Bundesregierung, unter Zugrundelegung üblicher und in Infobox 8-1 dargestellter, Konditionen für Busse und Infrastruktur unterstellt.

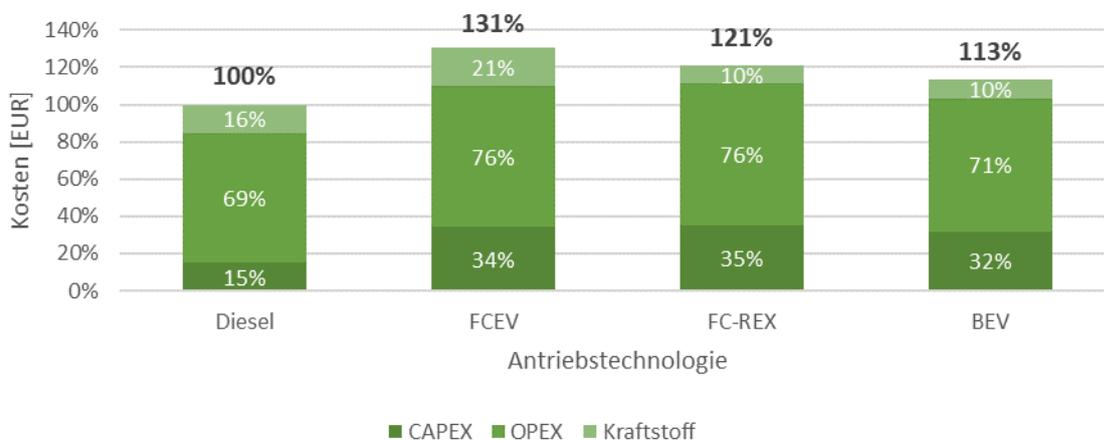


Abbildung 7-2: Total Cost of Ownership-Analyse der Buslinie 207

Bei allen Nullemissionskonzepten ergaben sich deutliche Mehrkosten gegenüber der Dieselreferenz von bis zu 31 Prozent. Ein eigenwirtschaftlich tragfähiger Betrieb war damit nicht darstellbar. Aufgrund der oben beschriebenen, zuvor erfolgten Vergabe der bis mindestens 2025 laufenden Konzession scheid ein Ausgleich des Kostendeltas durch zusätzliche Förderung seitens der öffentlichen Hand aus. Daher wurde ein wirtschaftlicher tragfähiger Betrieb als nicht realisierbar erachtet und von einer Bedienung der Linie durch Brennstoffzellen- oder Batteriebusse Abstand genommen.

### **Infobox 7-2: Brennstoffzellenbusse: Förderprojekte, Kommerzialisierung und Kostensenkung**

Während sich die Aktivitäten der Hersteller von BZ-Bussen bis heute überwiegend in Demonstrationsprojekten vollziehen, stehen die Zeichen inzwischen doch klar auf Kommerzialisierung [64, 67]. Die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung unterstützt die breite Markteinführung von Brennstoffzellenbussen und beabsichtigt, diese durch unter Infobox 8-1 besprochene Maßnahmen voranzutreiben.

Bisher wird die Kommerzialisierung vor allem auf EU-Ebene und in den Großprojekten *Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe* und *JIVE 2* vorangebracht. Bis 2023 sollen beide Projekte zusammen knapp 300 Busse in 22 Städten zum Einsatz bringen. Der Aufbau von Betankungsinfrastruktur erfolgt primär in dem flankierenden Vorhaben *Models for Economic Hydrogen Refuelling Infrastructure* (MEHRLIN) [50]. Im Rahmen eines weiteren EU-Vorhabens, dem im Förderprogramm *Connecting Europe Facility* angesiedelten *H2BusEurope*, sollen ab dem Jahr 2020 etwa 600 BZ-Busse nebst der erforderlichen Infrastruktur in Betrieb gehen. Die genannten Projekte bauen auf den Anfang 2018 etwa 60 in der EU betriebenen Bussen und dazugehörigen Betankungsanlagen auf und erhöhen die Gesamtzahl der Fahrzeuge auf etwa 1.000 [8].

In den JIVE-Projekten wird die Anschaffung von BZ-Bussen bei vorgegebenen technologischen Zielsetzungen und maximal zulässigen Kosten subventioniert. Die Verfügbarkeit der Busse soll über 90 Prozent und die Stack-Lebensdauer mindestens 20.000 Stunden erreichen. Ein 12-Meter-Bus darf höchstens 650.000 Euro kosten und wird von der EU mit 200.000 Euro bezuschusst. Zudem können nationale Fördermittel genutzt werden. Im deutschen NIP wurden 2017 Fördermittel von 160.000 Euro zur Reduzierung des Kostendeltas von 250.000 Euro gegenüber Dieseln angeboten und führten zu Anschaffungskosten von 290.000 Euro [78]. In JIVE 2 wurden die zulässigen Buskosten auf 625.000 Euro reduziert. Die im EU-Programm *H2BusEurope* zu beschaffenden Busse sollen nach Abzug der Förderung weniger als 375.000 Euro kosten [79].

In Deutschland werden ambitionierte Projekte zum früh-kommerziellen Einsatz von BZ-Bussen u. a. in zwei Regionen verfolgt: In Köln und Umgebung verkehren bereits heute 37 BZ-Busse und wird Ende 2021 die mit mindestens 52 Fahrzeugen größte Brennstoffzellenbusflotte Europas betrieben. Für die Kraftstoffversorgung stehen 4 Tankstellen zur Verfügung; weitere Anlagen sind geplant [11]. In Wuppertal gehen zunächst 10 BZ-Busse in Betrieb und tragen zum Aufbau einer Flotte von 45 BZ-Fahrzeugen, flankiert von der nötigen H<sub>2</sub>-Bereitstellungsinfrastruktur, bis 2021 bei [8]. Beide Projekte profitieren von Förderung der EU und des NIP.

Schließlich wurden Ende 2019 drei Regionen als Gewinner des Förderwettbewerbs *HyPerformer* der Bundesregierung bekanntgegeben, in denen zahlreiche BZ-Busse und Tankstellen betrieben werden sollen [6]. Im Rahmen des Projekts *H2 Rivers* werden auch die Busse und H<sub>2</sub>-Anlagen betrieben, deren Planung die vorliegende Studie unterstützt.

Technologische Fortschritte und Skaleneffekte stellen die weitere Annäherung an die Wettbewerbsfähigkeit sicher. Die Kosten für BZ-Stacks sind seit Aufbau der ersten Busse sehr stark gefallen und große weitere Kostensenkungspotenzialen liegen vor. Auch die Preise für BZ-Busse insgesamt sind stark gesunken und werden voraussichtlich vor 2030 auf 400.000 Euro fallen [64, 80]. Unternehmen wie Ballard und Solaris stellen schon seit einiger Zeit Beschaffungskosten von 450.000 Euro für 12-Meter-Busse bei Chargen von mindestens 100 Fahrzeugen in Aussicht [51].

Ohnehin werden bei Kostenbetrachtungen auf Basis von Total Costs of Ownership wesentlich günstigere Wettbewerbsbedingungen als bei reiner Betrachtung von Fahrzeug-Anschaffungskosten ermittelt: Bis 2030 geht eine Studie für BZ-Busse nur noch von einem TCO-Kostennachteil von 11 Prozent im Vergleich zu Dieseln aus und legt dabei ein konservatives Szenario unter Nutzung von Technologieoptimierungen und Skaleneffekten zugrunde [64]. Eine andere Studie ermittelt für BZ-Busse ungünstigere Relationen [69] und verdeutlicht die Notwendigkeit fallspezifischer TCO-Analysen, wie in der vorliegenden Studie vollzogen.

## 7.2. Expressbuslinie K3: Endersbach - Stuttgart

Als Alternative zu Linie 207 wurde die neu einzurichtende *Expressbuslinie K3* von Endersbach nach Stuttgart untersucht. Innerhalb dieser neu zu vergebenden Konzession besteht prinzipiell die Möglichkeit einer Förderung durch das Land Baden-Württemberg sowie durch den Landkreis Rems-Murr. Die Inbetriebnahme der Linie ist für das Jahr 2020/21 geplant. Die Buslinie soll emissionsfrei betrieben werden und eine Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr (Auto, Krafträder, etc.) auf den ÖPNV bewirken. Aufgrund der derzeit langen Lieferzeiten für emissionsfreie Busse wird ein Betriebsbeginn erst im ersten Quartal 2022 als realisierbar erachtet.

Die Expressbuslinie soll an Werktagen im 30-Minuten-Takt zwischen dem Bahnhof (Bf) Endersbach und dem Stuttgarter Hauptbahnhof (Hbf) verkehren. Für die Hauptverkehrszeit zwischen sechs und acht Uhr, sowie zwischen 16:00 und 18:30 Uhr ist ein 15-Minuten-Takt vorgesehen. Die geplante Streckenlänge beträgt ungefähr 23 km und übersteigt die der Linie 207 damit nur um 1 km; allerdings ist Jahreskilometerleistung der eingesetzten Busse mit 534.000 km rund 185.000 km höher. Einen Teil dieser Strecke bedient auch die S2, welche von Filderstadt über den HbF nach Schorndorf verkehrt. Der angedachte Streckenverlauf der Buslinie mit den Haltestellen (rot) ist in Abbildung 7-3 dargestellt.

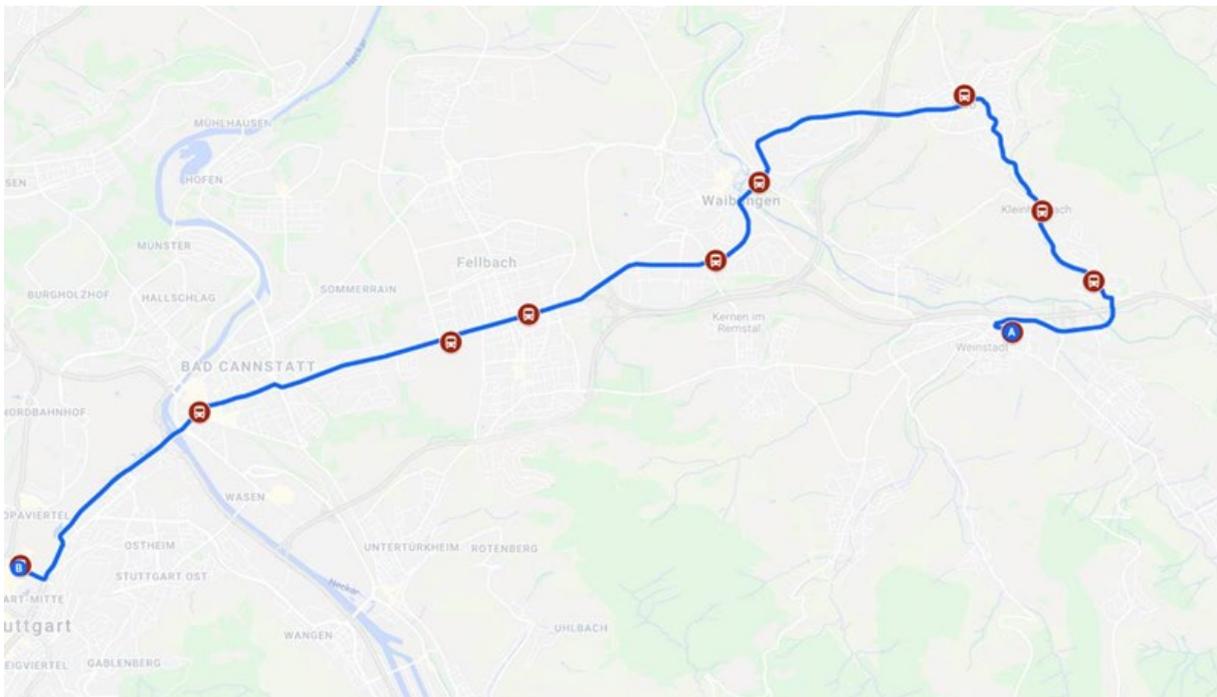


Abbildung 7-3: Streckenverlauf Expressbuslinie

Wie bereits erwähnt, wurden vier der in Kapitel 6 betrachteten sieben Antriebskonzepte von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen. Dies betraf die batterieelektrischen Busse mit den Stromversorgungstechnologien Übernachtladung, Ladung an Haltestellen mittels Induktion und Plug-In, Oberleitung, sowie Batteriewechsel. Die Gründe für den Ausschluss werden nachfolgend erläutert.

Als Ergebnis einer Analyse von Streckenlänge und dem vorgesehenen Umlaufplan wurde die Übernachtladung ausgeschlossen, da die einzusetzenden Busse jeweils eine Fahrleistung von 300 km am Tag erbringen müssen. Die Reichweite der untersuchten batterieelektrischen Busse genügt diesen Anforderungen nicht. Über die für die Personenbeförderung benötigten Kilometerleistungen hinaus sind

auch Betriebsfahrten und die daraus resultierenden Reichweitenanforderungen zu berücksichtigen. In jedem Fall sind auch Reichweitenreserven erforderlich, um Störungen im Betriebsablauf z. B. aufgrund von Baustellen und Umleitungen abfedern zu können.

Eine Entschärfung der Reichweitenproblematik durch Zwischenladung erwies sich ebenfalls als nicht möglich. Weder an der Endhaltestelle Stuttgart Hbf noch der Endhaltestelle Endersbach Bf war die Installation eines Pantografen darstellbar. In Stuttgart ist dies auf Platzmangel und die hohe Auslastung der Endhaltestelle zurückzuführen; in Endersbach wäre ein Betrieb aufgrund mangelnder Auslastung wirtschaftlich nicht realisierbar. Eine alternativ denkbare Induktionsladung wäre aufgrund vergleichbarer Problemlagen nicht umsetzbar. Dennoch wurde die Gelegenheitsladung per Pantograf als möglicherweise zukünftig realisierbare Option weiter untersucht.

Die Oberleitungsalternative schied insbesondere aufgrund der hohen Infrastrukturkosten aus. Bei einer beidseitigen Oberleitung ist von Investitionskosten über 350.000 Euro pro Kilometer Oberleitung auszugehen [81]. Im Falle der Expressbuslinie wäre ein Investitionsvolumen von mehr als 8 Millionen Euro zu erwarten. Auch die Option Batteriewechsel wurde aufgrund sehr hoher Kosten ausgeschlossen. Zudem konnte in der Nähe der Strecke und der Depots kein geeigneter Standort für eine Batteriewechselstation identifiziert werden.

Brennstoffzellenbusse hingegen profitieren vom geplanten Betrieb zweier, in Abbildung 7-4 verzeichneter, Wasserstofftankstellen für schwere BZ-Nutzfahrzeuge nahe der vorgesehenen Busroute. Beim Standort *Neckarwiesenstraße* wird die Inbetriebnahme bis zum zweiten Quartal 2021 avisiert, im Falle der Tankstelle *Maybachstraße* soll die Inbetriebnahme im dritten Quartal 2021 erfolgen. Bei letzterer Tankstelle handelt es sich um die in Kapitel 5.3 konzipierte Waiblinger Anlage, für welche bereits eine prinzipielle und von den lokalen politischen Gremien unterstützte Fördermittelzusage besteht [7].

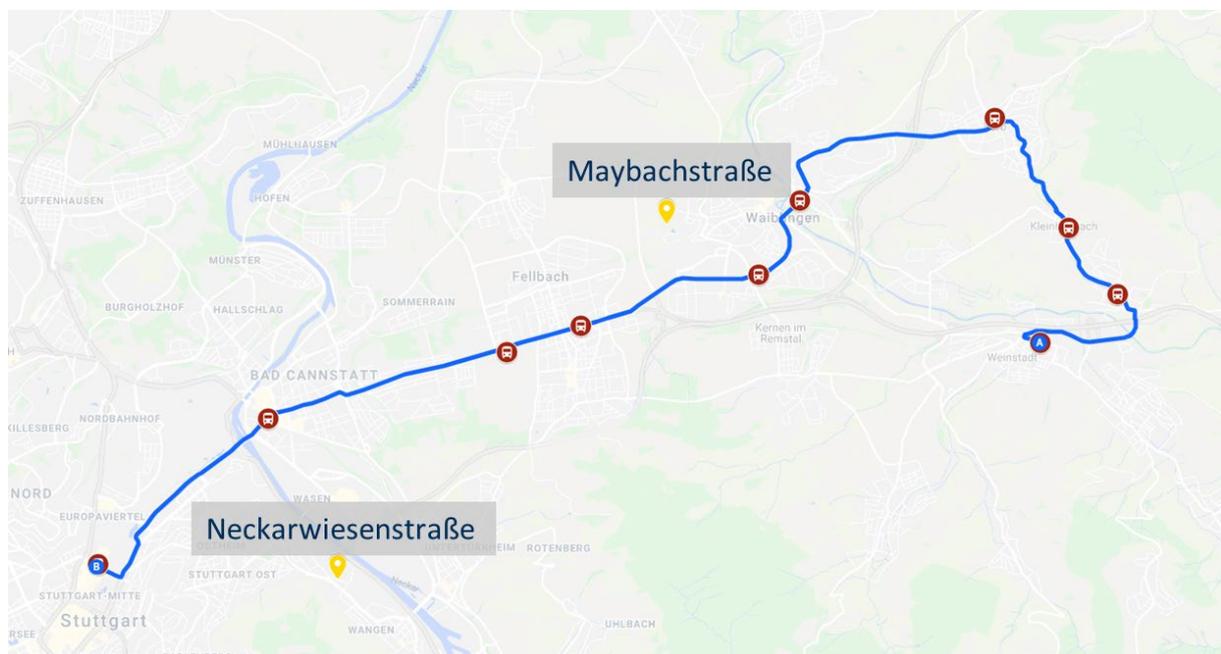


Abbildung 7-4: Wasserstofftankstellen im Umkreis der Expressbuslinie

Bei der Bewertung der Technologieoptionen zur Bedienung der Expressbuslinie spielten Beschleunigungsmaßnahmen angesichts des streckentypisch hohen Verkehrsaufkommens und der damit verbundenen Wahrscheinlichkeit von Verkehrsstörungen eine wichtige Rolle. Bei Umsetzung von Beschleunigungsmaßnahmen würde die Fahrzeit von Endersbach nach Stuttgart etwa 46 Minuten betragen. Ohne Beschleunigungsmaßnahmen wären erheblich verkehrsbedingte Verzögerungen und eine resultierende Nichteinhaltung der Taktzeiten zu erwarten. Bei Implementierung der empfohlenen Maßnahmen werden für eine fahrplangerechte Linienbedienung neun Busse benötigt. Vier Busse wären für die Gewährleistung des 30-Minuten-Takts erforderlich, vier weitere Fahrzeuge für die Verdichtung auf einen 15-Minuten-Takt nötig, eine neunter Bus wäre als Einsatzreserve vorzuhalten.

Zur wirtschaftlichen Bewertung der Expressbuslinie wurde eine TCO-Analyse durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 7-5 veranschaulicht werden. Der Analyse wird eine Fahrleistung von 534.000 km pro Jahr zugrunde gelegt. Als Kraftstoffkosten werden bei Diesel 1,14 €/Liter, bei Strom 17 ct/kWh und bei Wasserstoff 8,00 €/kg angenommen. Für Brennstoffzellenbusse mit Range-Extender bzw. FCEV-REX, sowie Batteriebusse mit Gelegenheitsladung bzw. BEV-OC, sind Ladesäulen auf dem Betriebshof eingerechnet; ein Pantograf wurde nur zur Beladung der batterieelektrischen Fahrzeuge in der Analyse berücksichtigt. Wasserstofftankstellen wurden nicht in die Kalkulation einbezogen, da angesichts der oben aufgezeigten entstehenden Betankungsmöglichkeiten keine Notwendigkeit zur Errichtung weiterer Anlagen z. B. auf Betriebshöfen besteht. Zudem wurde bei den Nullemissionskonzepten die Inanspruchnahme gegenüber Linie 207 ausgeweiteter Fördermittel des Bundes und des Landes Baden-Württemberg für Busse und Infrastruktur unterstellt.

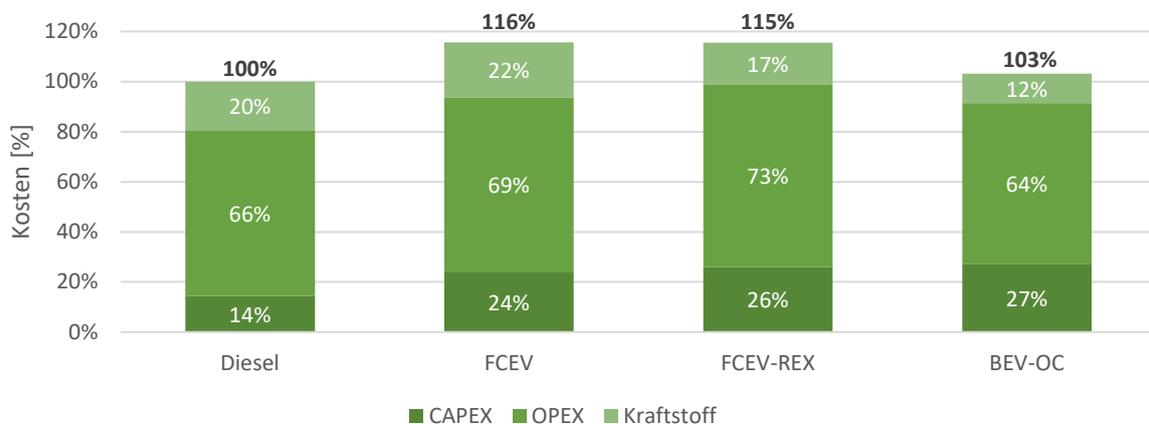


Abbildung 7-5: Total Cost of Ownership-Analyse der Expressbuslinie

Wie die Abbildung zeigt, sind mittels Pantograf beladene Batteriebusse nur 3 Prozent teurer als Dieselsebusse, während die Gesamtbetriebskosten von brennstoffzellendominanten bzw. BZ-REX-Bussen die TCO von Dieselsebusen um 16 bzw. 15 Prozent übersteigen. Dennoch kann aufgrund der infrastrukturellen Gegebenheiten bis auf Weiteres die kostengünstigste Lösung Batteriebusse nicht realisiert werden. Dies belegt eindrucksvoll, dass Kosten keineswegs allein für Technologieentscheidungen ausschlaggebend sind und dass immer eine ganzheitliche Abwägung aller aufgezeigten relevanten Einflussgrößen erfolgen sollte. Im Fall der Expressbuslinie verbleiben Brennstoffzellenbusse als die einzig umsetzbare Antriebsoption für einen emissionsfreien Busbetrieb.

Insbesondere die betriebliche Flexibilität erwies sich als entscheidend. Dabei berücksichtigte die Studie noch nicht einmal die Vorteile, die erhöhte betriebliche Flexibilität hinsichtlich der Bedienung wechselnder Linien durch Nullemissionsbusse mit sich bringt. Während z. B. Pantografen in vergleichsweise kurzen Abständen angefahren werden müssen und der Betrieb der zu ladenden Batteriebusse weitgehend routengebunden bleibt, ermöglichen die hohen Reichweiten von BZ-Bussen einen problemlosen Wechsel zwischen verschiedenen Routen.

Nichtsdestotrotz stellen die je nach Einsatzfall variieren Mehrkosten aller Nullemissionsfahrzeuge eine erhebliche Herausforderung für einen wirtschaftlich tragfähigen Busbetrieb dar. Selbst nach Inanspruchnahme von Fördermitteln des Bundes und Landes verbleibt im Fall der Expressbuslinie ein Kostendelta, das es durch Marktteilnehmer oder die Politik auszugleichen gilt. Im Falle des hier untersuchten Busbetriebs gelang es den für die Umsetzung verantwortlichen Akteuren, ergänzend zu einer vorläufigen Förderzusage im Rahmen des Großprojekts H2Rivers, die prinzipielle Bereitschaft der relevanten lokalpolitischen Gremien zum Ausgleich des Deltas zu erwirken [7]. Dennoch wird die Zukunft des vorgeschlagenen Vorhabens wesentlich von der Einhaltung der Kostenziele des noch weiter auszugestaltenden und letztlich umzusetzenden Projekts abhängen.

### 7.3. Gesamtübersicht Technologie- und Kostenwertungen Nullemissionsbusse

Auf Basis der grundsätzlichen Betrachtungen von Kapitel 6 und der beiden linienspezifischen TCO-Analysen oben werden abschließend die übergreifenden Ergebnisse der Gesamtbetriebskostenanalysen für vier ausgewählte Antriebskonzepte vereinfachend zusammengeführt. Wie bereits angemerkt, wurde im Projektverlauf zwischen den potenziellen Busbetreibern und den Studienerstellern entschieden, detaillierte TCO-Betrachtungen lediglich für ausgewählte Nullemissions-Technologieoptionen zu vollziehen. Als Referenz wurden jeweils Dieselbusse herangezogen.

Die übergreifenden Ergebnisse der Technologie- und Kostenwertungen werden vereinfachend in Tabelle 7-1 dargestellt. Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit ist anzumerken, dass der Fokus auf Tank-to-Wheel-Belastungen liegt, während die in Infobox 6-2 angesprochenen, im Zuge von Kraftstoffbereitstellung, sowie der Herstellung und Entsorgung von Fahrzeugen entstehenden Umweltbelastungen nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 7-1: Kostenvergleich

	<b>Diesel</b>	<b>BEV</b>	<b>FCEV</b>	<b>FC-REX</b>
<i>Anschaffungskosten Fahrzeug</i>	Niedrigste Kosten	Teurer als Diesel; günstiger als FCEV	Höchste Kosten	Teurer als Diesel; teilweise günstiger als FCEV
<i>Kraftstoff-/Energiekosten</i>	Abhängig vom Dieselpreis	Abhängig vom Strompreis	Abhängig vom H <sub>2</sub> -Preis	Abhängig vom Strom- und H <sub>2</sub> -Preis
<i>Wartungskosten</i>	Höher als BEV; geringer als FCEV-REX	Am geringsten	Zwischen Diesel und FCEV-REX	Höchste Kosten
<i>Umweltverträglichkeit</i>	Am schlechtesten; CO <sub>2</sub> , Stickoxide, Dieselpartikel, Feinstaub	Sehr gut; im Betrieb vor Ort keine Emissionen; leise	Sehr gut; im Betrieb vor Ort keine Emissionen; leise	Sehr gut; im Betrieb vor Ort keine Emissionen; leise
<i>Reichweite</i>	Am größten	Abhängig von Batteriekapazität	Geringer als Diesel; höher als BEV	Je nach Auslegung H <sub>2</sub> -Tank und Batterie

Wiederum zeigt auch die übergreifende Bewertung der Antriebskonzepte ein breites Feld an Vor- und Nachteilen der verschiedenen Ansätze. Angesichts der Unmöglichkeit, ein pauschal gültiges Ranking der Antriebskonzepte Brennstoffzelle und Batterie zu vollziehen, mag die Darstellung als Ausgangspunkt für die Durchführung unumgänglicher Detailanalysen dienen. Während Dieselsebusse zweifellos kostengünstiger als die verschiedenen Nullemissionskonzepte sind, können nur Letztere den geschilderten regulativen Auflagen entsprechen.

## 8. Potenziale für weitere H<sub>2</sub>-Anlagen und Elektrobusse in der Region

Die zuvor protokollierten Fallstudien ergaben, dass PtX-Anlagen für die Wasserstoffversorgung von Brennstoffzellenbussen am Standort Waiblingen, ebenso wie der Betrieb von Nullemissionsbussen auf ausgewählten Linien, unter Inkaufnahme von Mehrkosten gegenüber Technologiealternativen darstellbar und zur Erfüllung regulativer Vorgaben teilweise unabdingbar ist. Allerdings wurde jeweils klar, dass die Ergebnisse fallspezifischer Natur sind und nicht ohne weiteres auf größere Anwendungszusammenhänge übertragen werden können. Um diesbezügliche Aussagen zu ermöglichen, werden nachfolgende die infrastruktur- und fahrzeugseitigen Potenziale für die Ausweitung einer strombasier- ten Mobilität im Landkreis Rems-Murr und der Region Stuttgart analysiert. Zunächst wird das Potenzial für die H<sub>2</sub>-Produktion nutzbarer erneuerbarer Energien identifiziert. Dann werden regulative Anforderungen insbesondere der Clean Vehicles Directive in Beziehung zum aktuellen Busbestand gesetzt und legen einen dringenden Handlungsbedarf nahe. Angesichts der Notwendigkeit fallspezifischer Analysen werden die Schwierigkeiten einer Übertragung lokaler Ergebnisse auf Landkreis und Region thematisiert. Schließlich werden in einfachen, annahmenbasierten Szenarien zukünftig steigende Bedarfe an Wasserstoff und Elektrolyseuren im RMK und Region abgeleitet.

### 8.1. Potenzial erneuerbarer Energie zur Erzeugung grünen Wasserstoffs im Kreis

Der Landkreis Rems-Murr hat großes Potenzial für den Ausbau erneuerbarer Energien zur Produktion von grünem Wasserstoff. Im Rahmen der Potenzialanalyse werden die erneuerbaren Energiequellen Photovoltaik, Windkraft sowie Wasserkraft näher betrachtet. Einen wesentlichen Anteil an der Stromerzeugung in Baden-Württemberg wie auch im Landkreis Rems-Murr nimmt die Erzeugung mittels Photovoltaik-Anlagen ein [82]. Auch künftig wird dem Energieatlas der *Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg* zufolge im Ausbau der Solar- und Windenergie das größte Potenzial gesehen.

In Abbildung 8-1 sind die Photovoltaik-Dachflächen (links) und -Freiflächen (rechts) im Landkreis Rems-Murr dargestellt. Die Eignungsstufen werden für PV-Dachflächen wie folgt bewertet [83]:

- sehr gut: 95 bis 100 Prozent der maximal in der Region nutzbaren Einstrahlungsenergie,
- gut: 80 bis 94 Prozent der maximal in der Region nutzbaren Einstrahlungsenergie,
- bedingt: 75 bis 79 Prozent der maximal in der Region nutzbaren Einstrahlungsenergie,
- vor Ort zu prüfen: unter 75 Prozent maximal in der Region nutzbaren Einstrahlungsenergie.

In der Bewertung des Potenzials werden diverse Standortfaktoren wie z. B. Neigung, Verschattung, Ausrichtung und solare Einstrahlung berücksichtigt, welche über ein digitales Oberflächenmodell berechnet wurden [83]. Das Potenzial der PV-Freiflächenanlagen wird in *geeignet* und *bedingt geeignet* unterteilt. Bedingt geeignete Flächen sind mit weichen Restriktionen, welche z. B. innerhalb von Landschaftsschutzgebieten wirksam werden belegt [84].

Die Eignungsklasse der PV-Dachflächen im Kreis wird überwiegend als *gut* oder *sehr gut* eingeschätzt. Dabei konzentriert sich das Potenzial auf den Dachflächen auf die Ballungszentren Waiblingen, Schorndorf, Backnang und Winnenden, wohingegen das Potenzial der Freiflächenanlagen in den ländlichen Gebieten des Landkreises liegt [83, 84]. Die Potenziale der PV-Freiflächenanlagen werden überwiegend als *bedingt geeignet* für den Ausbau weiterer PV-Freiflächenanlagen eingestuft [84].

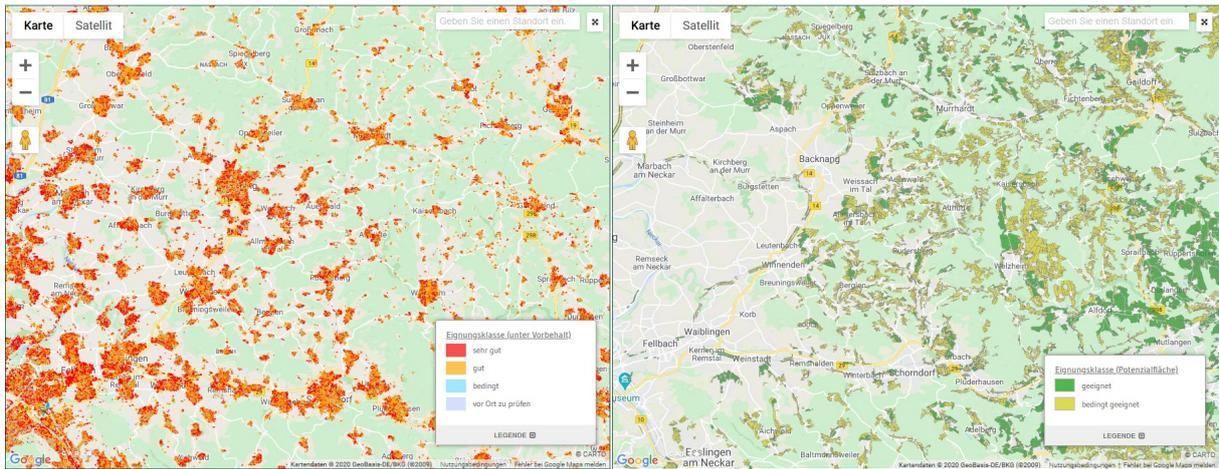


Abbildung 8-1: Potenzial von PV-Dachanlagen (links) und PV-Freiflächenanlagen (rechts) im Rems-Murr-Kreis [83, 84]

Zudem besteht ein eingeschränktes Potenzial für Windkraftanlagen im Landkreis Rems-Murr, welches in Abbildung 8-2 dargestellt wird. Die Einteilung in *geeignete* und *bedingt geeignete* Flächen erfolgt nach dem *Windatlas Baden-Württemberg* für windhöflich anzusehende Flächen sowie für Flächen, die mit Einschränkungen verbunden sind. Den geeigneten Flächen für Windkraftanlagen sind Standorte zuzurechnen, die eine mittlere gekappte Windleistungsdichte von mindestens  $215 \text{ W/m}^2$  in 160 m Höhe über Grund aufweisen. Bedingt geeignete Flächen sind durch eine mittlere gekappte Windleistungsdichte von  $215 \text{ W/m}^2$  in 160 m Höhe charakterisiert, dabei jedoch mit Flächenrestriktionen belegt, weshalb die Nutzungsmöglichkeit im Einzelfall zu prüfen ist [85]. Das Windpotenzial liegt vorwiegend im nördlichen, ländlichen Teil des RMK.

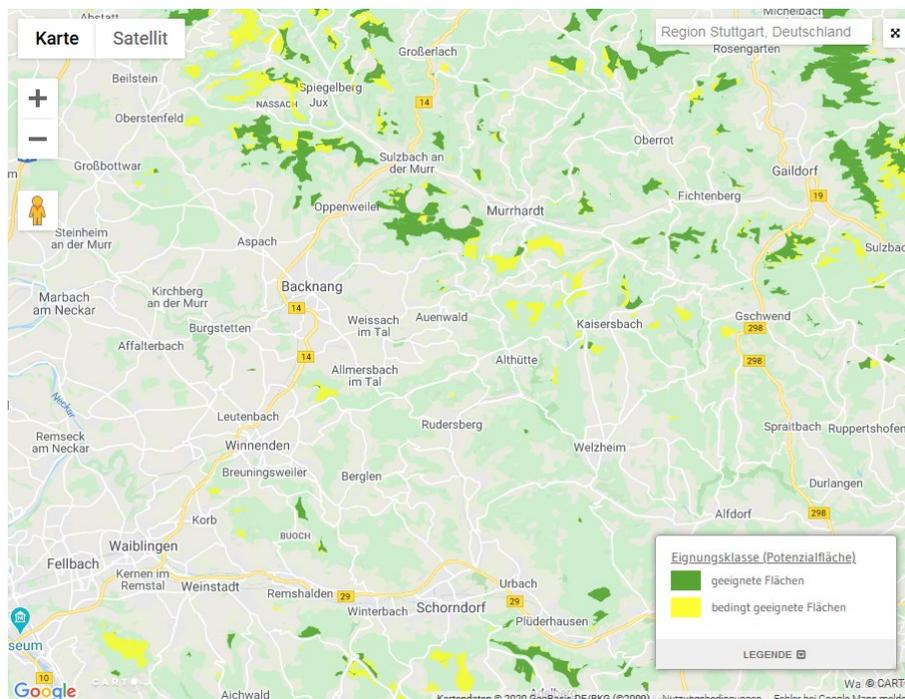


Abbildung 8-2: Potenzial von Windkraftanlagen im Rems-Murr-Kreis [85]

Das Aus- und Neubaupotenzial von Wasserkraftanlagen von höchstens einem MW im Landkreis wird in Abbildung 8-3 dargestellt. Die Einteilung erfolgt hierbei in *sehr gut*, *gut*, *mittelmäßig* und *grenzwertig* [86]. Dabei kann aus der Karte entnommen werden, dass überwiegend grenzwertiges Potenzial im Landkreis vorliegt, weshalb die Betrachtung an dieser Stelle abgebrochen wird.

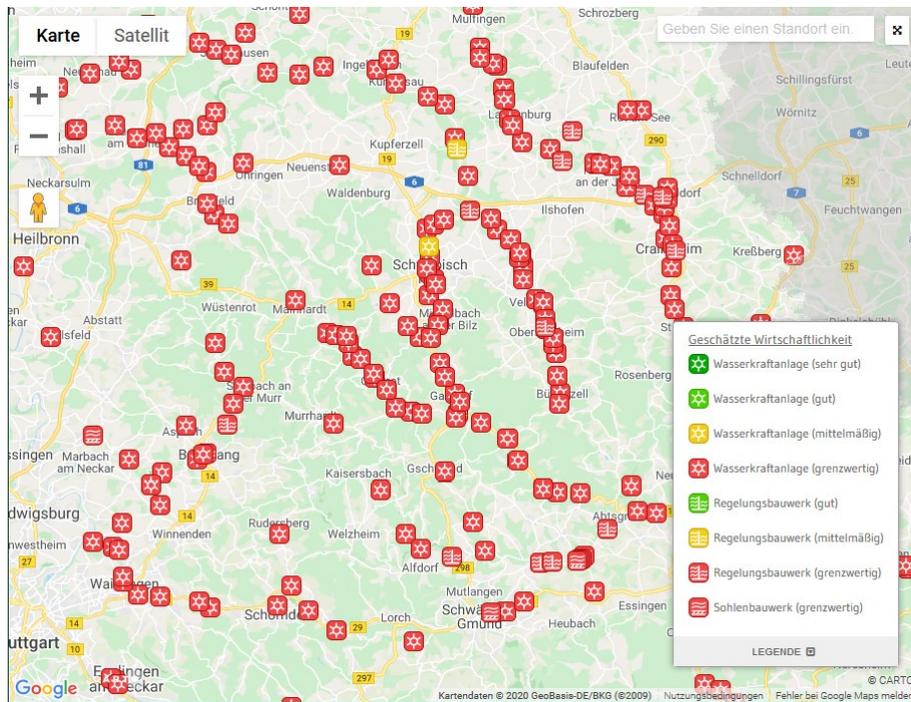


Abbildung 8-3: Potenzial von Wasserkraftanlagen im Rems-Murr-Kreis [86]

Wie die Potenzialkarten der Abbildung 8-1 bis Abbildung 8-3 zeigen, kann die Realisierung der Potenziale insbesondere für Photovoltaik- und Windkraftanlagen zusätzlichen EE-Strom für die Produktion von Wasserstoff zur Verfügung stellen. PtX-Anlagen sind bestens geeignet, fluktuierende und mangels verfügbarer Energiespeicher oft verlorengelassene EE in das Energiesystem zu integrieren und durch Verstärkung dem Verkehr und anderen Sektoren zur Verfügung zu stellen. Somit bietet sich die Erschließung und Nutzung der Photovoltaik- und Windstrompotenziale im RMK zur H<sub>2</sub>-Produktion an.

Dies gilt umso mehr, als dass die Logistikkosten des Transports von nicht lokal erzeugtem Wasserstoff erheblich zu den Gesamtkosten der H<sub>2</sub>-Bereitstellung beitragen und eine lokale H<sub>2</sub>-Herstellung auch deshalb von Vorteil sein kann. Wie im Falle Waiblingen kann die Wahl eines verkehrsgünstig gelegenen Standorts und die Inanspruchnahme hinsichtlich der Stromnebenkosten relevanter Privilegien die Attraktivität im Kreis gelegener PtX-Anlagen wesentlich steigern. Die Umsetzung des in dieser Studie entwickelten Konzepts kann wesentliche Erfahrungswerte für die Erschließung weiterer Potenziale im Rems-Murr-Kreis liefern.

Wie unten argumentiert, ist überdies insbesondere aufgrund der Beschaffungsvorgaben der Clean Vehicles Directive mit einem starken Zuwachs der Bestände an BZ-Bussen und damit auch der regionalen H<sub>2</sub>-Nachfrage zu rechnen. Überdies könnte den Analysen von Kapitel 9 zufolge aufgrund eines möglichen Einsatzes von BZ-Zügen auf der Wieslautalbahn ein zusätzlicher und vorzugsweise klimaneutral durch neue PtX-Anlagen zu befriedigender H<sub>2</sub>-Bedarf entstehen.

## 8.2. Steigender Bedarf an Nullemissionsbussen aufgrund Clean Vehicles Directive

Die bereits in Kapitel 2 vorgestellte CVD verpflichtet Mitgliedsstaaten und die darin ansässigen Behörden, einschließlich der öffentlich beauftragten Unternehmen, zur Beschaffung emissionsarmer und –freier Fahrzeuge. In Deutschland liegt das Mindestziel speziell für die Beschaffung emissionsarmer Busse ab August 2021 und bis Ende 2025 bei 45 Prozent. Ab 2026 und bis zum Jahr 2030 ist der Anteil auf 65 Prozent zu steigern [15].

Dabei sieht die Richtlinie eine Einschränkung vor: „Die Hälfte des Mindestziels für den Anteil sauberer Busse muss durch die Beschaffung von emissionsfreien Bussen [...] erfüllt werden. Diese Anforderung wird für den ersten Bezugszeitraum auf ein Viertel des Mindestziels gesenkt, wenn mehr als 80 Prozent aller Busse, die unter die in Artikel 3 genannten in diesem Zeitraum in einem Mitgliedstaat vergebenen Aufträge fallen, Doppeldeckerbusse sind“ [15].

Abbildung 8-4 stellt die Mindestziele der CVD grafisch dar. Ein Fahrzeug ist per Definition dann emissionsfrei, wenn es weniger als 1 g CO<sub>2</sub>/kWh oder km ausstößt. Ein sauberes Fahrzeug der Busklasse M3 gilt als sauber, wenn es mit alternativen Kraftstoffen wie Biobrennstoffen (Biomethan, Biodiesel etc.), synthetischen oder paraffinhaltigen Kraftstoffen, Erd- oder Flüssiggas betrieben wird [15, 27].

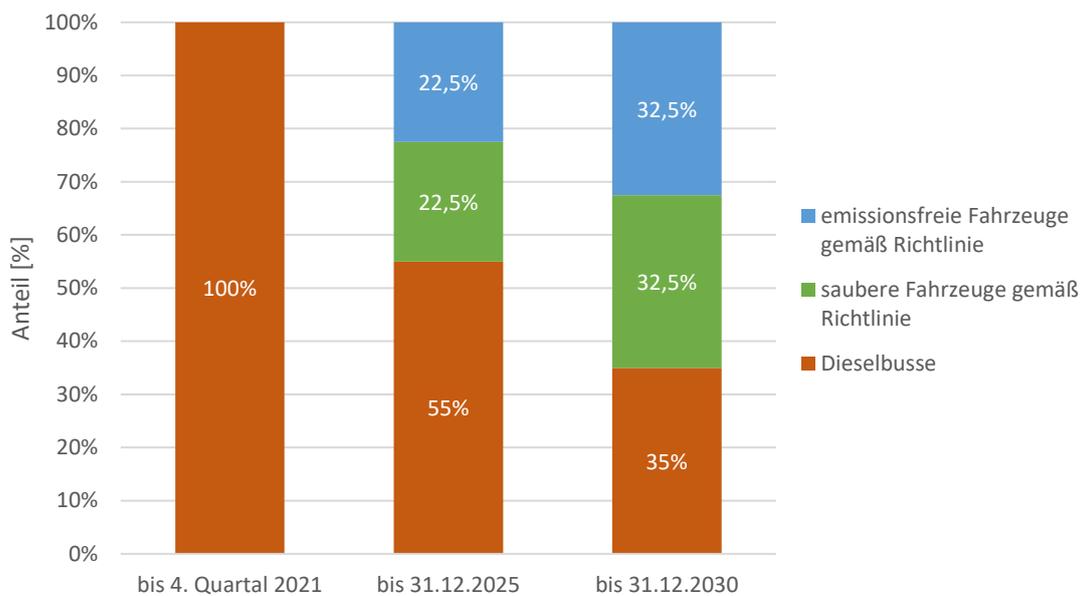


Abbildung 8-4: Anteile emissionsfreier und sauberer Fahrzeuge [87]

Für den Busbestand in Baden-Württemberg einschließlich der Region Stuttgart stehen damit ab Mitte 2021 erhebliche Veränderungen an. Wie bereits in Kapitel 2 dargelegt, können lediglich Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge gemäß CVD als emissionsfrei gelten und sind damit die einzigen für die Erfüllung der entsprechenden Beschaffungsquoten in Frage kommenden Antriebskonzepte.

Überdies wurden in Kapitel 2 verschiedene weitere EU-Regularien dargelegt, die gleichzeitig auf die Marktperspektiven von Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeugen einzahlen. So müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen bis 2025 um 15 und bis 2030 um 30 Prozent vermindert werden. Diese Vorgaben sind mit konventionellen Motoren kaum zu erfüllen und verlangen den Umstieg auf alternative Antriebe. Weiter verlangt die Renewable Energy Directive, dass 14 Prozent des Kraftstoff-

aufkommens bis 2030 erneuerbaren Ursprungs sein muss und stärkt damit weiter die Position elektrischer Fahrzeuge. Die Alternative Fuels Infrastructure Directive unterstützt den Ausbau von Lade- bzw. Betankungsinfrastrukturen auch für Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge. Nicht zuletzt verlangen immissionsrechtliche Vorgaben der EU eine deutliche Verbesserung der Luftqualität auch in Städten wie Stuttgart und steigern die Attraktivität von Nullemissionsfahrzeugen erheblich. Somit sind neben der CVD weitere mächtige Treiber einer breiteren Markteinführung von Elektrofahrzeugen zu Gange.

Dennoch ist es bis zur Erreichung nennenswerter Marktanteile alternativer Antriebe auch im Busbereich noch ein weiter Weg. Dies wird anhand von Abbildung 8-5 deutlich, welche die Veränderungen der Anteile verschiedener Kraftstoffarten an der Kraftstoffversorgung aller Busse in Baden-Württemberg zwischen 2015 und 2020 darstellt. Im Zeitverlauf ist der Anteil an Dieseln nur marginal von 98 auf 95 Prozent gesunken und der Anteil alternativer Antriebe entsprechend gering. Bei Letzteren erreichen nicht genau definierte Hybridtechnologien einem Marktanteil von lediglich 2 Prozent. Laut KBA handelt es sich bei den Hybriden überwiegend um Verbrenner mit zusätzlichem Elektroantrieb [21]. Batterie- und sonstige Busse erreichen zusammen einen Anteil von weniger als 1 Prozent.

Offenkundig wird es größter Anstrengungen bedürfen, angesichts des aktuell niedrigen Stands der Marktanteile alternativer Busantriebe innerhalb nur eines Jahres den Aufwuchs insbesondere von Nullemissions-Busflotten den Anforderungen der CVD entsprechend zu forcieren. Mitte 2021 muss die Erhöhung des Bestands von Batterie- und Brennstoffzellenbussen von unter 1 auf 22,5 Prozent beginnen und bis Ende 2025 abgeschlossen sein. Dem sind weder die heutigen Fahrzeugangebote noch die bestehenden Lade- bzw. Betankungsinfrastrukturen gewachsen. Da die Ausweitung von Produktionskapazitäten für Fahrzeuge und insbesondere der Aufbau von Infrastruktur einen mehrjährigen Vorlauf erfordern, kommen ggf. erst heute beginnende Vorbereitungen zur vollständigen Erfüllung der CVD in vielerlei Hinsicht um Jahre zu spät.

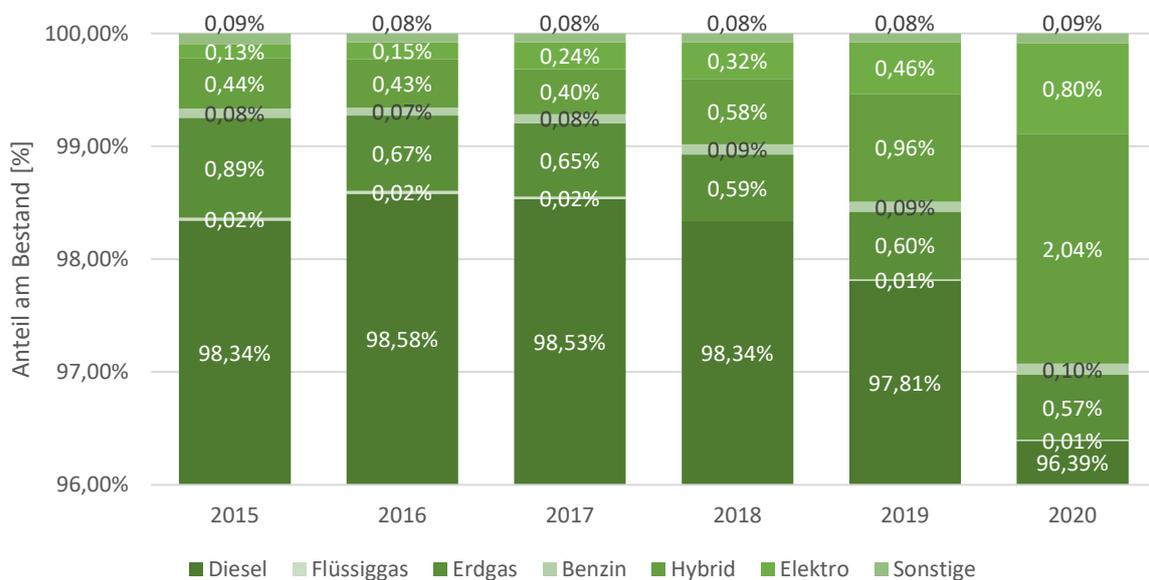


Abbildung 8-5: Anteil Kraftstoffarten in Baden-Württemberg (2015-2020) [59, 88–92]

### 8.3. Übertragung fallspezifischer Ergebnisse zu Bussen auf Landkreis und Region

In Abbildung 8-6 werden die in Kapitel 3.2.2 vorgestellten Buslinien im Rems-Murr-Kreis nach Länge gruppiert dargestellt. Da Brennstoffzellenbusse in aller Regel höhere Reichweiten als batterieelektrische Busse realisieren können, ermöglicht die Darstellung eine erste und vorläufige Ermittlung der für die verschiedenen Antriebskonzepte geeigneten Busrouten.

Es kann jedoch keine konkrete Aussage zur Eignung der jeweiligen Fahrzeugkonzepte für einzelne Linien getroffen werden, ohne diese genauer z. B. anhand der in Kapitel 6.2 vorgestellten KPIs zu betrachten. Wenn beispielsweise eine Buslinie aufgrund ihrer geringen Umlauflänge im Prinzip für batterieelektrische Busse geeignet erscheint, entlang der Strecke jedoch nicht die räumlichen und zeitlichen Voraussetzungen für die Ladung der Fahrzeuge bestehen, könnten sich andere Konzepte einschließlich von BZ-Bussen als die bessere Alternative erweisen. Im Falle der untersuchten Expressbuslinie schloss u. a. das Fehlen einer für die Aufstellung eines Pantografen geeigneten Fläche den Einsatz ansonsten geeigneter Batteriebusse zugunsten eines BZ-Fahrzeugs aus.

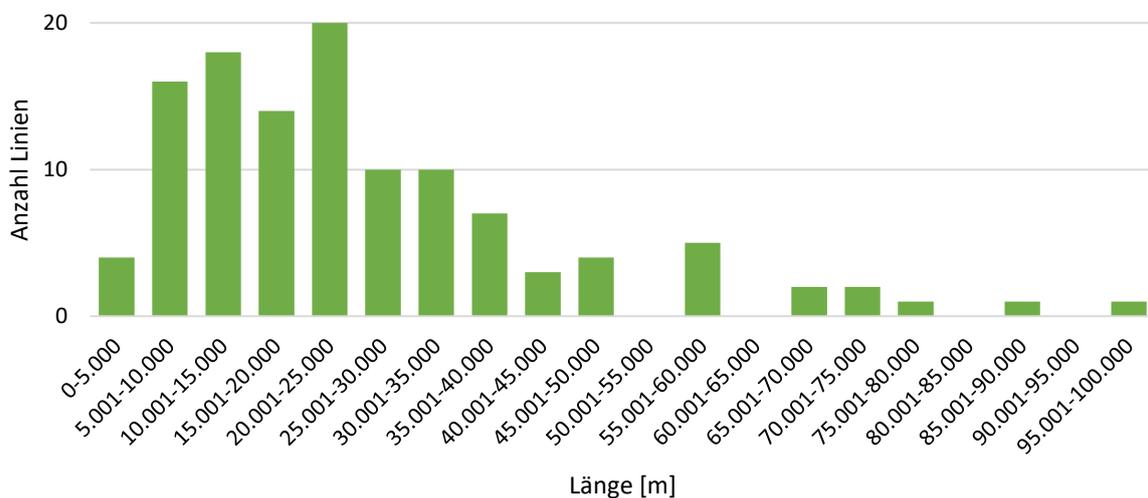


Abbildung 8-6: Anzahl Linien nach Länge im RMK [33]

Die bereits in den Kapiteln 6 und 7 aufgezeigte Vielfalt der Antriebskonzepte sowie ihrer Vor- und Nachteile wird nachfolgend mit Fokus auf die Reichweite weiter illustriert. Damit wird unterstrichen, dass Technologieentscheidungen für Busbeschaffungen keineswegs auf Basis einfacher Faustregeln erfolgen können, da selbst das wohl unterscheidungskräftigste Kriterium Reichweite in vielerlei Hinsicht relativierbar ist:

- Aufgrund der Reichweitenbeschränkung batterieelektrischer Bussen sind für die Bedienung längerer Linien prinzipiell eher brennstoffzellelektrische Fahrzeuge geeignet. Sehen die Umlaufplanungen jedoch für eine Nachladung hinlängliche zeitliche Puffer an den relevanten Haltestellen vor, ist auch der Einsatz batterieelektrischer Busse möglich.
- Die Reichweite von Elektrobussen ist abhängig von der individuellen Auslegung von Wasserstofftanks bzw. Batterie. Die Investitionskosten der generell teureren BZ-Fahrzeugen können jedoch durch die Verringerung des H<sub>2</sub>-Tankvolumens reduziert werden, sodass sowohl hinsichtlich Kosten wie auch Reichweiten eine Annäherung an Batteriebusse erfolgt. Umgekehrt geht eine Reichweitenerhöhung bei Batteriebussen mit Kostensteigerungen einher.

Als Fazit kann bestätigt werden, dass zur Feststellung der Eignung von Nullemissionsfahrzeugen für die Erfüllung gesetzter Anforderungen fallspezifische Technologiebewertungen einschließlich von TCO-Analysen nahezu unerlässlich sind. Im Hinblick auf die im vorliegenden Kapitel angestrebte Potenzialanalyse bedeutet dies, dass die Möglichkeit einer einfachen Übertragung der Ergebnisse individueller Fallstudien auf einen größeren Betrachtungsraum auszuschließen ist. Zwar lässt sich die Eignung von Brennstoffzellen- und Batteriebussen zur Bedienung ausgewählter Linien belastbar bestimmen, jedoch können daraus keine Schlussfolgerungen zur Eignung für eine größere Anzahl an Buslinien im Landkreis Rems-Murr und der Region Stuttgart abgeleitet werden.

Abbildung 8-7 illustriert abschließend die Relationen zwischen Fahrleistungen und Einsatzbereichen brennstoffzellen- sowie batterieelektrischer Fahrzeuge. Die Abbildung spiegelt die Einschätzung des auf europäischer Ebene angesiedelten *Hydrogen Council* zur Eignung der beiden Antriebskonzepte zur Bedienung bestimmter Streckenlängen und Kilometerleistungen wider [40]. Demzufolge sind für kürzere Strecken von unter 100 km Batteriefahrzeuge besser geeignet als ihre Brennstoffzellenpendants. Bei Streckenlängen über 100 km hingegen sind BZ-Fahrzeuge den Autoren zufolge die bessere Wahl. Natürlich kann auch diese plakative Einschätzung nur eine grobe Orientierung bieten.

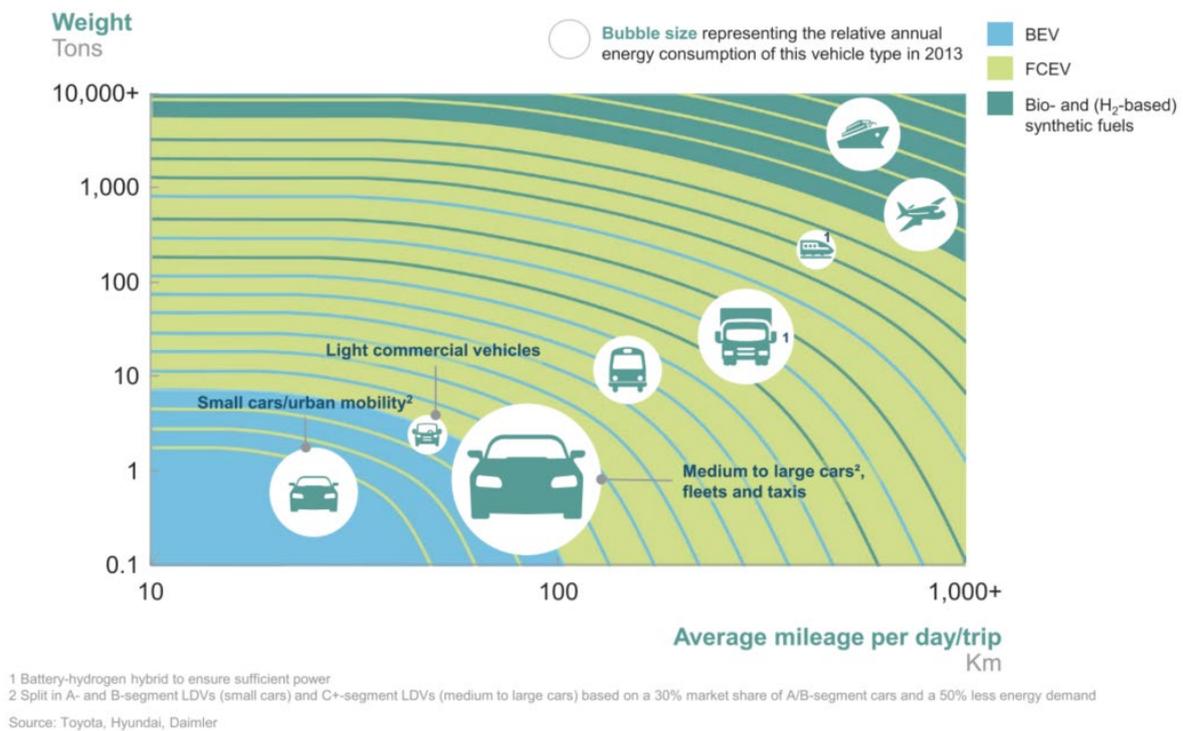


Abbildung 8-7: Projizierte wirtschaftliche Attraktivität [40]

## 8.4. Ableitung zukünftiger Bedarfe an Wasserstoff und Elektrolyseuren

Während sich die Anzahl zukünftig zum Einsatz kommender Brennstoffzellen- und Batteriebusse nicht allgemeingültig ableiten lässt, sind auf Grundlage von Annahmen zum künftigen Busbestand immerhin grobe Abschätzungen zu entstehenden Wasserstoffbedarfen und zusätzlich benötigten Wasserelektrolysekapazitäten möglich. Wie bereits während der Vorstellung des geografischen Untersuchungsraums dieser Studie in Abbildung 3-3 deutlich wurde, beträgt der aktuelle Bestand an Solobussen im Landkreis Rems-Murr 194 und in der gesamten Region Stuttgart 964. Da brennstoffzellen- und batteriebetriebene Busse weit überwiegend Solobusse sind, können Letztere zur Bestimmung des Marktpotenzials für die beiden Arten von Elektrobussen herangezogen werden.

Angesichts der Anforderungen des Clean Vehicles Directive und anderer Regularien kann von einer kurzfristig anziehenden und mittelfristig stark wachsenden Nachfrage nach Nullemissionsbussen ausgegangen werden. Sicherlich werden neben Batteriebussen auch BZ-Busse einen signifikanten Marktanteil erreichen, welcher mit 20 Prozent der heute in Kreis und Region verkehrenden Solobusse angesetzt werden kann. Auf Grundlage dieser frei gewählten, aber plausiblen Annahme, kann der durch den Betrieb von BZ-Bussen entstehende H<sub>2</sub>-Bedarf ermittelt werden. Unter Rückgriff auf die zuvor vollzogenen Analysen werden ausschließlich brennstoffzellendominante Busse mit einem Verbrauch von 9,5 kg H<sub>2</sub> pro 100 km herangezogen, welche eine 28 km langen Linie zehn Mal am Tag bedienen. Auch seitens der Wasserstoffproduktion wird auf die vorab vollzogenen Untersuchungen dieser Studie zurückgegriffen und dabei eine 80-prozentige Auslastung der Wasserelektrolyseanlagen unterstellt.

Abbildung 8-8 stellt die gemäß dem beschriebenen Szenario ermittelten, zukünftig pro Tag im Rems-Murr-Kreis zu erwartenden Wasserstoffbedarfe dar. Aufgrund des Ersatzes von 20 Prozent des heute 194 Fahrzeuge umfassenden Solobusbestands durch brennstoffzellendominante Busse ist mit einem erheblichen Zuwachs der täglichen H<sub>2</sub>-Nachfrage auf etwa eine Tonne zu rechnen. Daraus resultiert ein Bedarf an 2,8 MW zusätzlicher Elektrolysekapazität im Kreis.

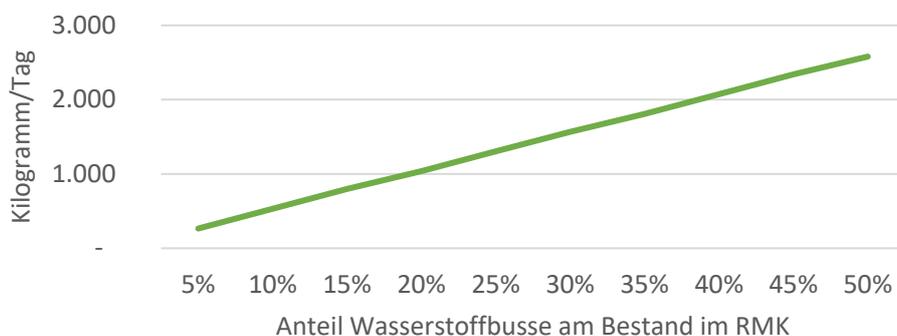


Abbildung 8-8: Wasserstoffbedarfe im Rems-Murr-Kreis

Abbildung 8-9 stellt die gemäß Szenario errechneten, zukünftig täglich anfallenden Wasserstoffbedarfe der Region Stuttgart vor. Aufgrund des Ersatzes von 20 Prozent des heute 964 Fahrzeuge umfassenden Solobusbestands durch brennstoffzellendominante Busse ist ein deutlicher Zuwachs der täglich nachgefragten H<sub>2</sub>-Menge auf ungefähr fünf Tonnen zu erwarten. Daraus ergibt sich ein Bedarf an etwa 14,3 MW zusätzlicher Elektrolysekapazität in der Region.

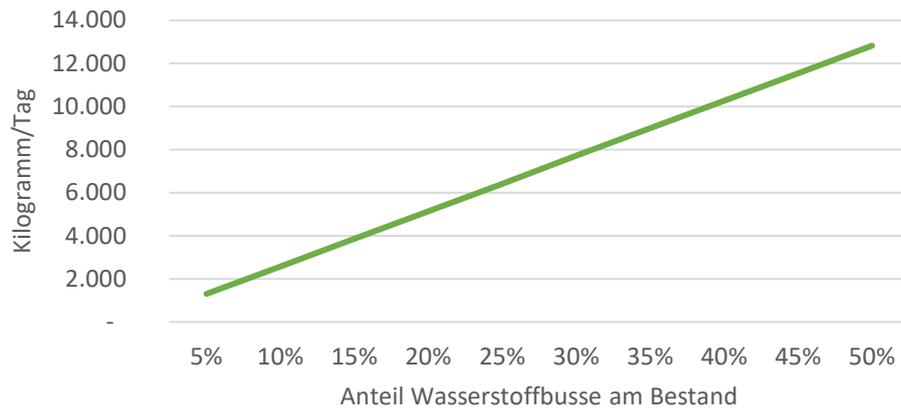


Abbildung 8-9: Wasserstoffbedarfe in der Region Stuttgart

Akzeptiert man die Annahme, dass künftig 20 Prozent des heutigen Solobusbestands durch brennstoffzellendominante Busse ersetzt werden, schlägt sich dies in den folgenden Zahlen nieder: Im Landkreis Rems-Murr kämen 39 und in der gesamten Region Stuttgart 193 BZ-Busse zum Einsatz.

Zur Befriedung der stark wachsenden Wasserstoffnachfrage wäre ein erheblicher Zubau an PtX-Anlagen zu realisieren, welche u. a. auf die in Kapitel 8.1 für den Rems-Murr-Kreis dargestellten EE-Potenziale zurückgreifen und diese einer sinnvollen Nutzung zuführen könnten. Das in der vorliegenden Studie konzipierte Waiblinger System könnte wertvolle Erfahrungswerte zu Wasserstoffproduktion und -abgabe liefern. Die Planung potenzieller H<sub>2</sub>-Produktionsstätten sollte von vornherein die Standorte von EE-Erzeugungsanlagen, die Linienführung von BZ-Bussen und BZ-Zügen, sowie die damit verbundene Positionierung von H<sub>2</sub>-Tankstellen gleichzeitig in einem strategisch abgestimmten Gesamtkonzept berücksichtigen.

### Infobox 8-1: Förderoptionen für Busse und Infrastruktur: EU, Bund und Land BW

Angesichts der noch nicht wettbewerbsfähigen Kosten bedürfen Brennstoffzellenbusse sowie Anlagen zur klimafreundlichen Herstellung und Abgabe von Wasserstoff staatlicher Förderung. Fahrzeuge wie Anlagen sind das Produkt langjähriger F&E- und Demonstrationsaktivitäten und haben erst in den letzten Jahren die Schwelle zur Marktfähigkeit erreicht. Die Politik fördert die Technologien auf Ebene der EU, der Bundesrepublik Deutschland und der Bundesländer. Während weiterhin auch die eigentliche technische Entwicklung gefördert wird, hat sich der Schwerpunkt der Förderung auf Maßnahmen der Marktaktivierung verlagert. Angesichts der erreichten relativ hohen technischen Reife bei weiterhin noch nicht marktfähigen Kosten wird nun primär die Beschaffung und teils auch den Betrieb von H<sub>2</sub> und BZ-Technologien unterstützt [8].

Wie bereits in Infobox 7-1 dargelegt, werden F&E, Demonstration und Kommerzialisierung von BZ-Bussen und dazugehöriger H<sub>2</sub>-Infrastruktur staatlicherseits vor allem auf EU-Ebene und in Großprojekten gefördert. Dabei erfolgt eine enge Abstimmung mit den Mitgliedsstaaten und deren Regionen bzw. im Falle Deutschlands Ländern, die eine sinnvolle Ergänzung der Fördermaßnahmen aller Ebenen gewährleisten soll. Die Kumulierung von europäischen, nationalen und regionalen Fördermitteln ist in der Regel zulässig und erwünscht. So profitieren z. B. die geschilderten Aktivitäten in Köln und Umgebung fahrzeug- und infrastrukturseitig von anteiliger Förderung der EU, des Bundes und des Landes Nordrhein-Westfalen. Ansprechpartner für EU-Förderung ist das *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* [93], das vorrangig durch jährliche Förderaufrufe bzw. *Calls* neue Förderoptionen auch für BZ-Busse und Infrastruktur bekannt gibt.

Die Bundesrepublik fördert insbesondere im *Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie* (NIP) seit langem die namensgebenden Technologien. So wurden z. B. BZ-Busse, Wasserelektrolyseure und 350 bar H<sub>2</sub>-Nutzfahrzeugtankstellen in der Clean Energy Partnership erprobt [48]. Die *Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie* (NOW) fungiert als Anlaufstelle für Interessenten im Förderbereich F&E und Demonstration und ist jederzeit für Projektvorschläge offen. NOW koordiniert auch Förderaufrufe im mittlerweile zentralen Bereich der Marktaktivierung [39]. So wurde in verschiedenen Aufrufen der Kauf von BZ-Bussen, sowie der Aufbau von H<sub>2</sub>- Tankstellen einschließlich von Elektrolyseuren bezuschusst. Die zugrundeliegende Förderrichtlinie sieht eine Übernahme von bis zu 40 Prozent der Investitionsmehrkosten gegenüber konventionellen Referenztechnologien vor [94]. Für die Zukunft sind weitere Förderaufrufe sowie eine Verbesserung der Förderoptionen vorgesehen. Derzeit ist die Veröffentlichung einer neuen Richtlinie geplant, welche eine 80-prozentige Förderung der Investitionsmehrkosten von BZ-Bussen und anderen Technologien ermöglichen soll.

Deutschland fördert die H<sub>2</sub>-Mobilität aber nicht nur durch das NIP, sondern auch andere Initiativen. Aktuell sticht die Verabschiedung der nationalen Wasserstoffstrategie heraus, welche erstmals eine Gesamtstrategie der Bundesregierung präsentiert und die bereits zuvor stark ausgeweiteten Aktivitäten einzelner Ministerien bündelt. Insbesondere kündigt die Strategie die Bereitstellung von mehr als 10 Milliarden Euro zusätzlicher Fördermittel für H<sub>2</sub>- und BZ-Technologien an. Zur Umsetzung werden neue Förderrichtlinien geschaffen, auf deren Grundlage ab 2020 regelmäßige Aufrufe zur Einreichung von Förderanträgen erfolgen sollen [3].

Auch das Land Baden-Württemberg fördert H<sub>2</sub> und BZ seit langem. Verschiedene Ministerien finanzieren z. B. Demonstrationsprojekte zur Herstellung von EE-H<sub>2</sub> mittels Elektrolyse und bezuschussen den Betrieb emissionsarmer Busse. Die Innovationsagentur *e-mobil BW* fungiert als zentrale Anlaufstelle auch für Belange der H<sub>2</sub>-Mobilität. Unter den aktuellen Fördermaßnahmen sticht die Kofinanzierung des Großprojekts H2Rivers heraus, das auch die Förderung der Beschaffung der in der vorliegenden Studie untersuchten H<sub>2</sub>-Anlagen und BZ-Busse beinhaltet. Überdies beauftragt das Land regelmäßig einschlägige Forschungsarbeiten und entwickelt eine Wasserstoff-Roadmap, die auch den verstärkten Einsatz von BZ-Bussen zum Gegenstand hat [4].

## 9. Einsatz von Nullemissionstriebwagen auf der Wieslaufalbahn

Angesichts der in den Kapiteln 5 und 7 dargestellten mangelnden Wirtschaftlichkeit der Waiblinger Wasserstoffanlage wie auch des Betriebs von Brennstoffzellenbussen kam im Projektverlauf der Gedanke auf, durch Einbeziehung eines weiteren Verbrauchers die Auslastung der H<sub>2</sub>-Produktion zu erhöhen und dadurch die Gesamtbetriebskosten zu reduzieren. Dafür bot sich die nahe im Landkreis Rems-Murr gelegene Wieslaufalbahn an, die zwischen den Städten Rudersberg und Schorndorf verkehrt und vom Zweckverband Verkehrsverband Wieslaufalbahn (ZVVW) getragen wird.

### 9.1. Hintergrund einer möglichen Elektrifizierung der Wieslaufalbahn

Die heute dort eingesetzten Dieseltriebzüge sind veraltet und müssen in den nächsten Jahren ersetzt werden. Gemäß den Zielsetzungen des Zweckverbands, dem auch der Rems-Murr-Kreis angehört, ist der Betrieb künftig emissionsfrei zu gestalten. Dafür bieten sich heute früh-kommerziell verfügbare Brennstoffzellentriebzüge als technologisch robuste Alternative an. Insbesondere weisen BZ-Züge einen hohen und regelmäßig anfallenden H<sub>2</sub>-Bedarf auf, was der angestrebten Verbesserung der Auslastung der Waiblinger Anlage sehr entgegenkommt.

#### Infobox 9-1: Reichweiten von Nullemissions- und Dieselzügen

Abbildung 9-4 zeigt die typischen Reichweiten verschiedener Antriebskonzepte im Schienenbereich auf. Es zeigt sich, dass Batterietriebzüge kurze Oberleitungslücken zwischen 40 und 100 km überwinden können, die Reichweite jedoch bei weitem nicht an die üblichen von Dieselzügen erbrachten täglichen Fahrleistungen heranreicht. BZ-Züge können einen Großteil der aktuellen Fahrzeugumläufe ohne Zwischenbetankung absolvieren, ziehen bei den Reichweiten aber noch nicht mit Dieselfahrzeugen gleich [95].

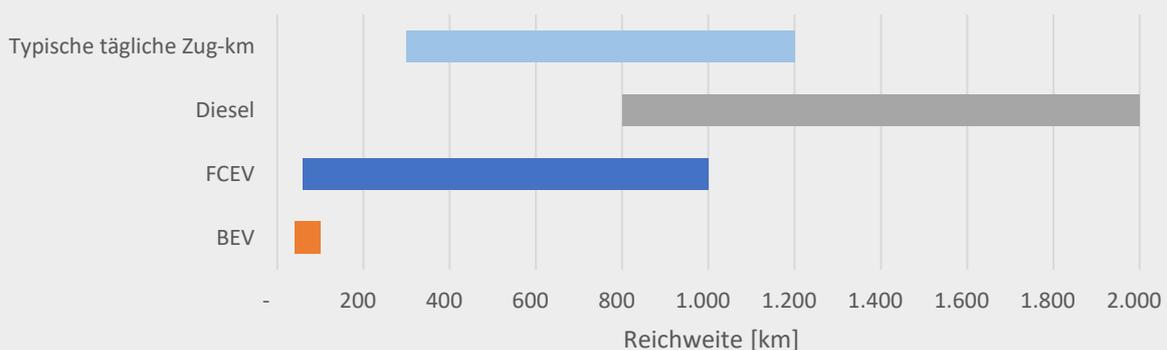


Abbildung 9-1: Reichweiten verschiedener Antriebskonzepte ohne Nachladen/Nachtanken [95]

Wie schon in Kapitel 3.2.3 dargestellt, ist die Wieslaufalbahn in den Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart integriert. Die Position der Wieslaufalbahn innerhalb des deutschen Schienennetzes mit seiner Gesamtlänge von ca. 34.000 Kilometern ist in Abbildung 9-1 rot markiert. Im Landkreis Rems-Murr beträgt die Länge des Schienennetzes insgesamt 84 km. Die Wieslaufalbahn erreicht eine Länge von 11,5 km und damit einen Anteil von 13,5 Prozent der Gesamtlänge des Schienennetzes im Kreis [96],

[97]. Wie unter 3.2.3 dargelegt, wird der Schienenpersonenverkehr im RMK hauptsächlich von den elektrifizierten S-Bahn-Linien S2, S3 und S4 getragen. Die zur Ergänzung durchaus wichtige Wieslaufalbahn hingegen fährt immer noch dieselbetrieben. Während politisch eine vollständige Elektrifizierung des schienengebundenen ÖPNV angestrebt wird, beträgt der Elektrifizierungsgrad der Bahnstrecken im Rems-Murr-Kreis (ohne Berücksichtigung von Regionalzügen) aktuell maximal 86 Prozent. Als einzige noch nicht elektrifizierte Strecke kommt nur die Wieslaufalbahn als Gegenstand einer zusätzlichen Elektrifizierung in Frage. Bei Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien könnte der gesamte Schienenverkehr im Kreis CO<sub>2</sub>-neutral betrieben werden.

Da der Bau einer Oberleitung für die vergleichsweise wenig genutzte Strecke bereits 2014 als wirtschaftlich nicht tragbar ausgeschlossen wurde [98], kommen für eine Elektrifizierung des Bahnbetriebs nur batterie- oder brennstoffzellenbetriebene Triebzüge in Frage. Vor diesem Hintergrund wurden die Analysen der vorliegenden Studie um eine Untersuchung der Machbarkeit und Konditionen des Einsatzes der genannten Nullemissions-Zugkonzepte, auch im Vergleich zu modernen Dieseltriebwagen, auf der Wieslaufalbahn erweitert. Aufgrund des Bezugs zu der Waiblinger Anlage wurde der Schwerpunkt jedoch auf Wasserstoff gelegt.

## 9.2. Technologie- und Kostenanalyse einer möglichen Elektrifizierung

Da die Markteinführung batterie- ebenso wie brennstoffzellenbetriebener Züge gerade erst begonnen hat, stehen nur wenige belastbare Daten zu Technik und Kosten öffentlich zur Verfügung, weshalb verstärkt auf aggregierte Herstellerangaben zurückgegriffen werden musste. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Technologiebewertung auch anhand einer TCO-Analyse präsentiert.

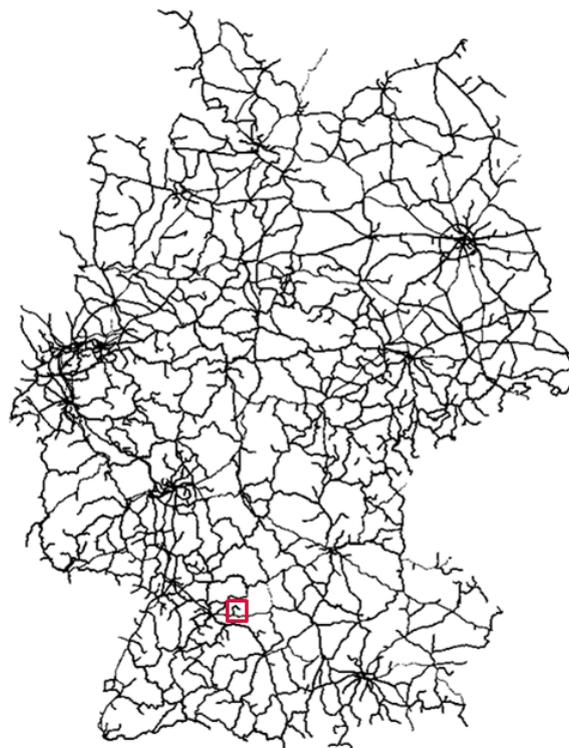


Abbildung 9-2: Bahnstreckennetz Deutschland mit regionaler Einordnung der Wieslaufalbahn (rot markiert) [99]

Die Wieslaufalbahn verkehrt an Werktagen auf einer 11,5 km langen Strecke zwischen Schorndorf und Oberndorf im 30 Minuten Takt. An Samstagen fährt die Bahn einmal pro Stunde [77, 100]. Die Laufleistung liegt bei ungefähr 220.000 km im Jahr. Abbildung 9-2 stellt den Streckenverlauf der Wieslaufalbahn sowie die Zwischenhalte dar.

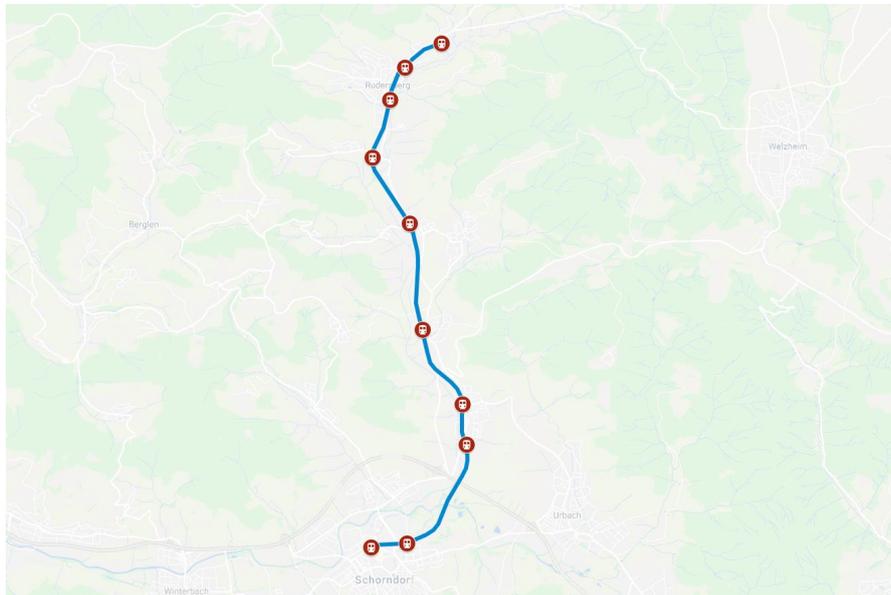


Abbildung 9-3: Streckenverlauf Wieslaufalbahn

Zur Hauptverkehrszeit werden auf der Wieslaufalbahn zeitweise über 400 Personen zeitgleich in eine Richtung befördert. Aktuell werden auf der Strecke zwei *Regio Shuttle* sowie vier Fahrzeuge des Typs *NE 81* mit einer Beförderungskapazität von 178 bzw. 188 Personen eingesetzt [101]. Mit neueren Fahrzeugen, welche je nach Konfiguration über eine größere Beförderungskapazität verfügen, könnte die Anzahl der Fahrzeuge ggf. von sechs auf vier reduziert werden.

In Abbildung 9-3 werden die Ergebnisse der Gesamtbetriebskostenanalyse der Wieslaufalbahn dargestellt. Ein Dieselfahrzeug wurde als Referenzfahrzeug mit 100 Prozent angegeben. Die TCO batterieelektrischer Triebzüge liegen moderate 13 Prozent über der Dieselfferenz, die Mehrkosten brennstoffzellenelektrischer Fahrzeuge erreichen jedoch signifikante 35 Prozent. Während das Elektrifizierungsziel mit Dieselmotoren nicht erreicht werden kann, sind nach bisherigen Erkenntnissen Batteriezüge die kostengünstigere Nullemissionsalternative.

Die Mehrkosten beider Arten von Elektrozügen sind im Wesentlichen auf die hohen Anschaffungskosten zurückzuführen: Während bei einem Dieselfahrzeug 59 Prozent der Kilometerkosten auf die Anschaffung entfallen, sind es bei einem FCEV 69 und bei einem BEV 80 Prozent. Im Vergleich zu Diesel- und Oberleitungstriebzügen sind für batterie- oder brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge Beschaffungsmehrkosten über 1,5 bis 2,5 Millionen Euro zu veranschlagen. Während bei mit Diesel oder via Oberleitung bezogenem Strom betriebene Züge zwischen vier und fünf Millionen Euro kosten, sind für die batterie- oder BZ-elektrischen Alternativen 5,5 bis 6,5 Millionen Euro zu veranschlagen [95].

Dem dargestellten Szenario wird eine Abschreibungsdauer von 25 Jahren und jährliche Fahrleistungen von 35.000 km pro Zug zugrunde gelegt. Als Kraftstoffkosten werden bei Diesel 1,30 Euro/Liter, bei Strom 13 ct/kWh und bei Wasserstoff 8,20 €/kg angenommen. Überdies wurde die Inanspruchnahme staatlicher Mittel der Technologieförderung gemäß gängiger Konditionen berücksichtigt.

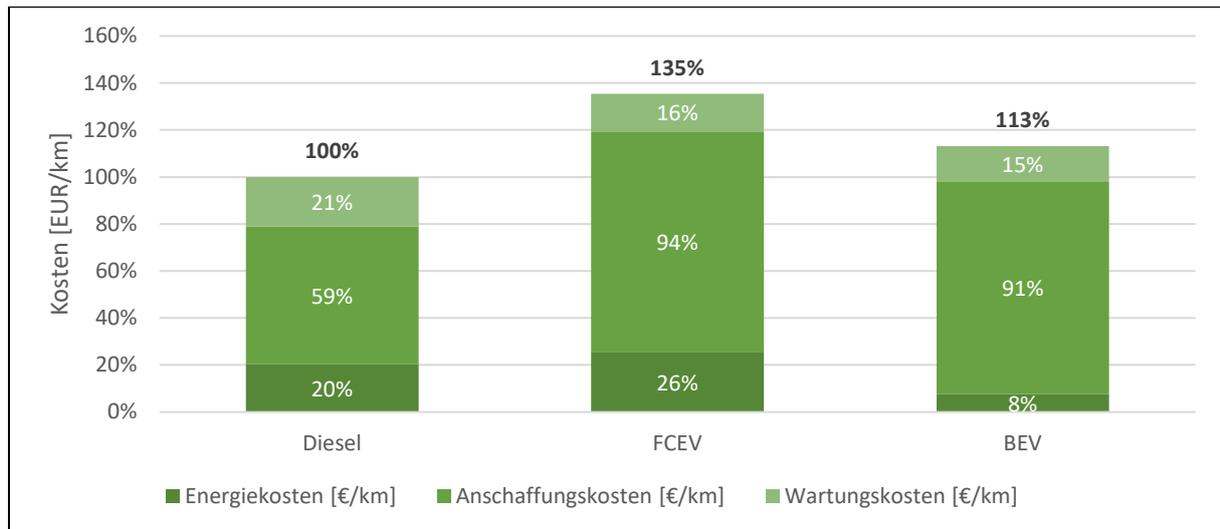


Abbildung 9-4: Total Cost of Ownership-Analyse der Wieslaufalbahn [102]

Die oben berichteten Ergebnisse der vorliegenden Studie wurden dem Zweckverband Verkehrsverband Wieslaufalbahn im Dezember 2019 vorgestellt. Angesichts der Mehrkosten beider Arten von Elektrozügen und insbesondere von Brennstoffzellentriebzügen wurde die Notwendigkeit zusätzlicher Untersuchungen klar. Aus wissenschaftlicher Sicht erscheint die bisherige Datenverfügbarkeit unbefriedigend, da mangels öffentlich zugänglicher Quellen teils nicht gänzlich nachvollziehbare aggregierte Herstellerangaben genutzt werden mussten.

Überdies konnte im Rahmen der vorliegenden Studie die technische Machbarkeit der beiden Antriebskonzepte nur ansatzweise untersucht werden. So wurde beispielsweise klar, dass eine zumindest weitgehende Deckung der H<sub>2</sub>-Nachfrage von BZ-Zügen durch die Waiblinger Wasserstoffanlage möglich ist, ggf. jedoch zur vollständigen Nachfragedeckung der Aufbau weiterer PtX-Anlagen erforderlich werden könnte. Während die Realisierung beider Konzepte auch infrastrukturseitig machbar erscheint, können belastbare diesbezügliche Aussagen erst nach weitergehenden Analysen getätigt werden [96].

Wie die Erfahrung mit Bussen lehrt, können situationsspezifisch nicht immer alle in Frage kommenden Technologien realisiert werden und andere als die kostengünstigsten Optionen zum Zuge kommen. Überdies können sich Kostenverhältnisse je nach Kombination mit weiteren Anwendungen ändern, z. B. indem durch die Bündelung von H<sub>2</sub>-Nachfragen der Betrieb größerer und kostengünstiger PtX-Anlagen wirtschaftlich tragfähig erscheint und entsprechende Investitionen getätigt werden.

Vor diesem Hintergrund beschloss der ZVVW, die Hochschule Esslingen mit der Durchführung einer weiterführenden Studie zur Elektrifizierung der Wieslaufalbahn zu beauftragen [103]. Die Untersuchung mit dem Arbeitstitel *Studie zu emissionsfreien ÖV-Konzepten im RMK* wird u. a. eine Marktanalyse verfügbarer Antriebssysteme, die Evaluierung baulicher Gegebenheiten, sowie eine Kosten-Nutzenanalyse enthalten und soll Ende 2020 abgeschlossen werden. Erst auf Grundlage der Studie können fallspezifisch belastbare Aussagen zu den Vor- und Nachteilen des Einsatzes der beiden elektrischen Antriebsalternativen auf der Wieslaufalbahn getätigt werden.

### Infobox 9-2: Brennstoffzellenzüge: Marktperspektiven, Anbieter und Projekte

Bereits 2016 stellte eine Studie zum Einsatz von Brennstoffzellentriebwagen in Deutschland fest, dass BZ-betriebene Regionalzüge Dieselzüge ohne operationelle Einschränkungen ersetzen können, da diese die Anforderungen hinsichtlich Antriebsleistung und Reichweite erfüllen. Dabei fallen die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen positiv aus: Obwohl die Anschaffung von BZ-Zügen deutlich teurer ist als die von Dieselfahrzeugen, kann aufgrund niedrigerer laufender Kosten und bei Anrechnung von Subventionen für BZ-Züge ein Kostenvorteil von bis zu 23 Prozent entstehen [104].

Eine 2019 vorgestellte EU-Studie untersuchte über Triebwagen hinaus auch BZ-basierte Rangier- und Universallokomotiven. Trotz methodischer Unterschiede bekräftigt sie die Erkenntnisse der vorausgegangenen Studie und ermittelt in einem optimistischen Szenario bereits für 2022 TCO-Kostenvorteile von bis zu 10 Prozent für BZ-Triebwagen und Rangierlokomotiven. Selbst in einem pessimistischen Szenario werden für 2030 Marktanteile von gemittelt 11 Prozent für alle untersuchten Schienenfahrzeuge erwartet, während im Standardszenario mit Anteilen von 20 und im optimistischen Szenario von sogar 41 Prozent gerechnet wird [105].

Dementsprechend läuft die Kommerzialisierung von BZ-Schienenfahrzeugen bereits an. So entwickelte der französische Schienenfahrzeugbauer *Alstom* eine neue Generation von Triebzügen mit BZ-Antrieb für den kommerziellen Einsatz zunächst in Deutschland. Der *Coradia iLint* ist mit zwei BZ-Systemen ausgestattet, kann bis zu 1.000 km mit einer Tankfüllung H<sub>2</sub> zurücklegen und erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h.

2017 bestellte das Bundesland Niedersachsen 14 Coradia-iLint-Züge für ein Verkehrsunternehmen und übernahm auch einen Großteil der Kosten von 85 Millionen Euro. Die Kaufverträge schließen eine 30-jährige Instandhaltung und Energieversorgung ein. Zwei Prototypen nahmen im September 2018 den Pilotbetrieb zwischen Cuxhaven und Buxtehude auf und wurden mit positiven Ergebnissen erprobt. Eine vom Gaseunternehmen Linde errichtete Tankstelle wird täglich bis zu 1.600 kg H<sub>2</sub> mit 350 bar an die Züge abgeben. Die Kosten von etwa 10 Millionen Euro werden teils durch das NIP übernommen [37]. Der reguläre Bahnbetrieb soll 2022 beginnen und auch noch auszuliefernden 12 Triebzüge einbeziehen; der derzeit noch graue Industriewasserstoff soll in den nächsten Jahren durch elektrolytisch hergestellten EE-H<sub>2</sub> ersetzt werden [106].

Überdies wurde im Mai 2019 ein weiterer Markterfolg des Coradia iLint bekannt: Ab 2022 werden 27 der BZ-Züge alte Dieseltriebwagen auf vier Regionalzuglinien im Taunus ersetzen. Das Vorhaben beinhaltet auch die Versorgung mit Wasserstoff, die Instandhaltung und das Vorhalten von Reservekapazitäten für die nächsten 25 Jahre. Die Beschaffung der Züge wird vom NIP 2 mit knapp 15 Millionen Euro und der Bau einer H<sub>2</sub>-Tankstelle mit gut 9,5 Millionen Euro gefördert [107].

Auch *Siemens Mobility* entwickelt in Zusammenarbeit mit Ballard einen Zug mit einem modularen Brennstoffzellen-Batterie-Traktionssystem, welcher über eine 200-kW-BZ verfügen und eine Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h erreichen soll [108]. Der Triebzug *Mireo Plus H* ist entweder als 2-Teiler mit 120 Sitzplätzen und einer Reichweite von bis zu 600 km, oder als 3-Teiler mit 160 Sitzplätzen und einer Reichweite von bis zu 1.000 km ausgelegt. Interessant ist der Vergleich zum mit Stromabnehmer und Batterie ausgestatteten Pendant *Mireo Plus B*, dass auf nicht elektrifizierten Strecken im Batteriebetrieb Reichweiten von höchstens 80 km bei einem 2-teiligem Zug bzw. maximal 120 km bei einem 3-teiligem Zug erzielt [8]. Genaue Angaben zu technischen Details und Verkaufsbeginn der BZ-Treibzüge wurden noch nicht kommuniziert.

## 10. Studienergebnisse und Schlussfolgerungen

Das Kapitel fasst die Studieninhalte zusammen und stellt die zentralen Ergebnisse anhand der Beantwortung der eingangs gestellten Leitfragen vor. Darüber hinaus werden übergreifende Schlussfolgerungen zu Zukunftsperspektiven der untersuchten Technologien und Handlungsoptionen im Hinblick auf eine Unterstützung des Markthochlaufs entwickelt.

Die Studie untersucht die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff, dessen Abgabe an einer Tankstelle und den Betrieb einer Flotte von neun BZ-Bussen im Raum Waiblingen. Eine Potenzialanalyse ermittelt, inwieweit sich die Ergebnisse aus Waiblingen auf die Region übertragen lassen und welche Perspektiven für den Aufbau weiterer PtX-Anlagen und den Betrieb zusätzlicher Busse resultieren. Zudem wird der Einsatz von BZ-Triebzügen auf der nahe gelegenen Wieslaufalbahn betrachtet.

Die Untersuchung verfolgt einerseits das Ziel, die für die geplante Umsetzung des Waiblinger Vorhabens Verantwortlichen, ebenso wie weitere potentielle Betreiber relevanter Technologien, insbesondere hinsichtlich technischer Machbarkeit und wirtschaftlicher Konditionen zu informieren und bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen. Andererseits leistet die Studie einen wissenschaftlichen Beitrag zur Schließung der erheblichen Wissenslücken im erforschten Technologiebereich.

### 10.1. Vorstellung zentraler Studienergebnisse

Die zentralen Studienergebnisse werden nachfolgend anhand der Beantwortung der vier in Kapitel 1 vorgestellten Leitfragen zusammengefasst.

- (1) Welche technische Auslegung einer Anlage zur Produktion und Abgabe von EE-H<sub>2</sub> für die Versorgung einer kleinen Flotte von Brennstoffzellenbussen empfiehlt sich im Anwendungsfall Waiblingen und welche Gesamtbetriebskosten entstehen?

Die vielfältigen Auslegungsoptionen von Power-t-X Anlagen wurden in Kapitel 4 vorgestellt; die Auslegung speziell der Waiblinger Anlage zur Produktion und Abgabe von EE-H<sub>2</sub> für die Versorgung einer kleinen Flotte von BZ-Bussen erfolgte in Kapitel 5. Der Standort war einerseits aufgrund des Umsetzungsinteresses lokaler Akteure gesetzt und empfahl sich durch das Vorhandensein günstiger Konditionen, wie z. B. der Möglichkeit zur Nutzung des Eigenstromprivilegs. Aufgrund derartiger Besonderheiten, einschließlich des vielfältigen Angebots untersuchungsrelevanter Buslinien im Umland, erwies sich der Standort aber auch aus wissenschaftlicher Sicht als hochinteressant.

Für den Technologie- und Zukunftspark Waiblingen wurde eine PtX-Anlage konzipiert, die auf Dachflächen hergestellten Solarstrom mittels eines Wasserelektrolyseurs mit einer Leistung von 1,25 MW in Wasserstoff wandelt. Daneben wurden bedarfsgerecht ausgelegte H<sub>2</sub>-Druckspeicher, Kompressoren und Akkumulatoren in das System integriert. Eine 350-bar-Betankungsanlage für die BZ-Busse sowie eine Abfüllanlage für H<sub>2</sub>-Trailer vervollständigen die Anlage. Alle Auslegungsarbeiten erfolgten in enger Abstimmung mit den vorgesehenen Betreibern sowie erfahrener Anlagenplaner wie z. B. dem ZSW und berücksichtigten genehmigungsrechtliche Bedingungen. Somit konnte ein den lokalen Anforderungen entsprechendes und technisch robustes System ausgelegt werden, das die zuverlässige Versorgung einer Flotte von neun BZ-Bussen gewährleisten kann.

Die Entwicklung des technischen Anlagenkonzepts wurde von kontinuierlich laufenden Modellierungen zweier Betriebsszenarien informiert. Hierbei wurde einerseits ein Inselnetzbetrieb ohne Möglichkeit eines externen Strombezugs und andererseits ein Anschluss der Anlage an das öffentliche Strom-

netz zugrunde gelegt. Die Ergebnisse beeinflussten den Verlauf der Auslegungsarbeiten z. B. hinsichtlich der Dimensionierung des Elektrolyseurs sowie der Beurteilung der Notwendigkeit eines Netzan schlusses wesentlich und wurden kontinuierlich zwischen den Partnern abgestimmt. Zudem wurden regelmäßig neue Informationen z. B. hinsichtlich verfügbarer Flächen bekannt und trugen zu einer sich stetig veränderten Erkenntnislage bei.

Dies verdeutlicht, dass die Waiblinger Anlage für einen spezifischen Anwendungszusammenhang und als Resultat einer ständigen Abwägung verfügbarer Optionen konzipiert wurde. Damit wird klar, dass das System nicht als Standardfall auf andere potenzielle Standorte übertragen werden kann, sondern dass stets individuelle und situationspezifische Analysen erforderlich sind.

In einer Total-Cost-of-Ownership-Analyse wurden sowohl die Investitions- wie auch die Betriebskosten der PtX-Anlage, wiederum in enger Abstimmung mit den potenziellen Betreibern und anderen Experten ermittelt. Hierbei wurden die beiden oben genannten Basisszenarien für das Anlagenkonzept weiterentwickelt und insbesondere um das Element der Betankungsanlage erweitert. Die im Zentrum der Analyse stehende Ermittlung der Gesamtbetriebskosten erfolgte anhand der vier Szenarien Inselnetz mit Tankstelle, Inselnetz ohne Tankstelle, Netzanschluss mit Tankstelle, sowie Netzanschluss ohne Tankstelle. Während die Kosten naturgemäß als absolute Zahlen ermittelt wurden, lassen Vertraulichkeitsvorbehalte nur eine Darstellung in relativen Werten zu, bei der die Mehr- bzw. Minderkosten der Betriebszenarien gegenüber den am Markt erzielbaren Erlösen für Wasserstoff ermittelt werden.

Dabei erweist sich das Szenario Netzanschluss ohne Tankstelle als die günstigste Variante und kann sogar einen Gewinn erwirtschaften. Allerdings kann auf den Tankstellenbetrieb im Falle Waiblingen nicht verzichtet werden, weshalb das Szenario Netzanschluss mit Tankstelle herangezogen werden sollte, dass mit moderaten Mehrkosten zu Buche schlägt. Überdies wird in allen vier Szenarien eine Nichtberücksichtigung der EEG-Umlagen zugrunde gelegt, was im Falle der Inselnetze geltendem Recht entspricht und in den Fällen mit Netzanschluss angesichts erwarteter regulativer Änderungen als plausible Annahme gelten kann. Nichtsdestotrotz wäre bei den letzteren Fällen eine Realisierung des avisierten Verzichts auf Umlagen die Voraussetzung für einen zumindest annähernd wirtschaftlich tragfähigen Betrieb der Waiblinger Anlage.

Während dieses Fazit auch für andere PtX-Anlagen ähnlichen Aufbaus relevant ist, sind die spezifischen Ergebnisse nur für den untersuchten Fall gültig und können eigenständige TCO-Bewertungen für andere Anwendungsfälle nicht ersetzen.

- (2) Welches der beiden Antriebskonzepte Brennstoffzelle oder Batterie ist für die Bedienung zweier gesetzten Linien im Landkreis Rems-Murr besonders geeignet und welche Kostendifferenz zum Dieselantrieb besteht?

Wie bereits in Kapitel 2 dargelegt, stellen EU-Regularien insbesondere zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Beschaffung von Nullemissionsfahrzeugen wesentliche Treiber für den breiten Markteintritt von Brennstoffzellen- wie auch Batteriebusen dar, da sie den Einsatz beider Antriebskonzepte begünstigen und teilweise zwingend erfordern. Vor diesem Hintergrund untersuchte Kapitel 6 sieben mögliche Auslegungsoptionen beider Arten von Elektrofahrzeugen, welche als Nullemissionsbusse die Vorgaben gleichermaßen erfüllen können. Die differenzierte Betrachtung zeigte u. a., dass BZ-Busse in den Varianten brennstoffzellendominante Systeme und Range-Extender-Systeme verfügbar sind und im Allgemeinen eine höhere Reichweite als Batteriebusse aufweisen. Allerdings wurde zugleich klar, dass die Reichweitenproblematik auch bei Batteriebusen entschärft werden kann und dass beide Antriebskonzepte vielfältige Einsatzherausforderungen bewältigen können.

Daher verdeutlicht das Kapitel, dass Auswahlentscheidungen zur Beschaffung von Nullemissionsbussen keinen einfachen Regeln folgen können und vielmehr eine umfassende Analyse relevanter Faktoren erfolgen sollte. Eine Reihe von Key Performance Indicators wurde vorgestellt, die neben der Reichweite auch Alltags- bzw. Betriebstauglichkeit, Kosten für Kraftstoff und Infrastruktur, sowie Lade- bzw. Betankungsdauer beinhalten. Auch das Linienprofil der für den Busbetrieb in Frage kommenden Linien ist von hoher Relevanz und in Wechselwirkung mit den KPIs zu analysieren. Vereinfachend kann zwischen Überlandlinien und innerstädtischer Linien differenziert werden, die sich z. B. durch Länge und Verkehrsfluss unterscheiden. Unter enger Abstimmung mit im Rems-Murr-Kreis tätigen Busbetreibern wurden die KPIs der zuvor skizzierten sieben Typen von Brennstoffzellen- und Batteriebussen ermittelt. Die Ergebnisse wurden in einer Tabelle mit 35 Einzelbewertungen dargestellt und zeichnen ein insgesamt sehr differenziertes Bild, welches wiederum keine pauschale Bewertung zur Vor- oder Nachteilhaftigkeit eines bestimmten Antriebskonzepts zulässt.

Zur Beratung der potenziellen Betreiber von Nullemissionsbussen im Raum Waiblingen, ebenso wie zur Verdeutlichung der wissenschaftlich notwendigen Analyseschritte, erwies sich eine in Kapitel 7 vollzogene Detailanalyse ausgewählter Buslinien als unerlässlich. In enger Abstimmung mit dem Landkreis, welcher als Vergabestelle von Konzessionen für den Busbetrieb fungiert, sowie den eigentlichen Busunternehmern wurden zwei Linien identifiziert, um mithilfe einer linienspezifischen TCO-Analyse die Eignung und Konditionen einer Bedienung mit Brennstoffzellen- oder Batteriebussen unter Berücksichtigung vorhandener oder neu zu errichtender Infrastruktur festzustellen. Hierbei wurden Linien ausgewählt, die auch aufgrund von Vorerfahrungen mit kleineren Batteriebussen als prinzipiell geeignet für eine Elektrifizierung durch BZ-Busse erschienen.

Zunächst wurde Buslinie 207 betrachtet, welche von Fellbach über Waiblingen nach Korb verläuft. Die TCO-Analyse ergab, dass trotz moderater Förderung durch die öffentliche Hand alle untersuchten Alternativen zum Dieselbus deutliche Mehrkosten von bis zu 31 Prozent zeitigten. Daher wurde ein wirtschaftlicher tragfähiger Betrieb als nicht realisierbar erachtet und von einer Bedienung der Linie durch Brennstoffzellen- oder Batteriebusse Abstand genommen. Als weitere Option wurde die neu einzurichtende Expressbuslinie K3 von Endersbach nach Stuttgart untersucht. Obgleich die Linienlänge vergleichbar zu Linie 207 ist, erreicht die Expressbuslinie eine deutlich höhere jährliche Laufleistung. Aufgrund der untersuchten betrieblichen Anforderungen und restriktiven infrastrukturellen Bedingungen erwiesen sich alle Batteriekonzepte als ungeeignet, z. B. da über Nacht geladene Busse den Reichweitenanforderungen nicht genügen und sich die Investitionen für den Aufbau von Oberleitungen als inakzeptabel hoch erwiesen. Einzig die Gelegenheitsladung per Pantograf verblieb als möglicherweise zukünftig realisierbare Option, wobei bis auf Weiteres keine geeigneten Aufstellungsflächen für Pantografen zur Verfügung stehen. Somit verblieben in diesem Fall Brennstoffzellenbusse als die einzig geeignete Antriebsoption. Wohlgedermt war dies auf einen Mix von Faktoren zurückzuführen, wobei sich die insgesamt höhere betriebliche Flexibilität als entscheidend erwies. Bei gegenüber Linie 207 verbesserten Förderkonditionen wären mittels Pantograf beladene Batteriebusse nur 3 Prozent teurer als Dieselbusse, während die Gesamtbetriebskosten von brennstoffzellendominanten bzw. BZ-REX-Bussen die TCO von Dieselbussen um 16 bzw. 15 Prozent übersteigen.

Auf Basis der grundsätzlichen Betrachtungen von Kapitel 6 und der beiden linienspezifischen TCO-Analysen von Kapitel 7 wurden die übergreifenden Ergebnisse von Gesamtbetriebskostenanalysen für vier ausgewählte Antriebsoptionen vereinfachend zusammengeführt. Wiederum zeigt die Bewertung von Dieselbussen, brennstoffzellendominanten BZ-Bussen, BZ-REX-Bussen und Batteriebussen ein breites Feld an Vor- und Nachteilen der verschiedenen Konzepte. Angesichts der Unmöglichkeit, ein pauschal gültiges Ranking der Antriebsoptionen Brennstoffzelle und Batterie zu vollziehen, mag die Darstellung als Ausgangspunkt für die Durchführung unumgänglicher Detailanalysen dienen. Während Dieselbusse

zweifellos kostengünstiger als die beiden Nullemissionskonzepte sind, können nur Letztere den geschilderten regulativen Auflagen entsprechen.

- (3) Inwieweit sind die Ergebnisse auf den Rems-Murr-Kreis und den Großraum Stuttgart übertragbar und welche Schlussfolgerungen ergeben sich hinsichtlich der Potenziale für den Einsatz von Wasserstoffanlagen und BZ-Bussen?

Die Potenzialanalyse des Kapitels 8 widmet sich zunächst der Frage, inwieweit die Ergebnisse der vorausgegangenen Analysen für die im Raum Waiblingen untersuchten Wasserstoffanlagen und Nullemissionsbusse auf den Rems-Murr-Kreis insgesamt sowie den Großraum Stuttgart übertragen werden können. Die Antwort wurde jedoch größtenteils bereits in der vorausgegangenen Ergebnisinterpretation gegeben: Wie oben argumentiert, wurde zwar erfolgreich ein für Waiblingen geeignetes Anlagenkonzept entwickelt und hinsichtlich seiner wirtschaftlichen Tragfähigkeit bewertet. Keineswegs lässt sich das System aber als Standardfall auf andere potenzielle Standorte übertragen, sondern sind stets situationsspezifische Analysen erforderlich. Analog ließ sich zwar die Eignung von Brennstoffzellen- und Batteriebusen zur Bedienung ausgewählter Linien belastbar bestimmen, die Möglichkeit einer einfachen Ergebnisübertragung auf andere Fälle wurde aber ausgeschlossen. Sowohl bei Entscheidungen zur Konzipierung von PtX-Anlagen wie auch der Beschaffung von Nullemissionsfahrzeugen sind stets fallspezifische Technologiebewertungen einschließlich von TCO-Analysen zu empfehlen.

Angesichts dessen können die Schlussfolgerungen hinsichtlich der Potenziale für den Einsatz von Wasserstoffanlagen und BZ-Bussen im Landkreis Rems-Murr und im Großraum Stuttgart nur qualitativ ausfallen und eine Quantifizierung nur ansatzweise vollziehen.

Zunächst wurde eine Bewertung der Potenziale erneuerbarer Energie zur Erzeugung grünen Wasserstoffs im Kreis vorgenommen. Insbesondere bei Photovoltaik und Windkraft bestehen noch erhebliche Ausbaupotenziale, deren Realisierung zusätzlichen EE-Strom für die elektrolytische Produktion von Wasserstoff zur Verfügung stellen würde. Der Einsatz von PtX-Anlagen ermöglicht die Nutzbarmachung fluktuierender und oftmals verlorengelassener EE und bietet sich zur Deckung einer zukünftig erwarteten und unten beschriebenen Wasserstoffnachfrage durch Brennstoffzellenbusse an.

Insbesondere aufgrund der Vorgaben der Clean Vehicles Directive ist mit einem Zuwachs an Nullemissionsbussen zu rechnen. In Deutschland müssen ab August 2021 mindestens 45 Prozent der von der öffentlichen Hand, sowie beauftragten Verkehrsunternehmen, beschafften Busse emissionsarm sein; wobei die Quote ab 2026 auf 65 Prozent steigt. Überdies ist die Hälfte der Beschaffungsziele *de facto* durch Brennstoffzellen- oder Batteriebusse zu erfüllen. Demgegenüber liegt der aktuelle Marktanteil von Nullemissionsfahrzeugen in Baden-Württemberg bei deutlich unter 1 Prozent. Offenkundig wird es größter Anstrengungen bedürfen, innerhalb nur eines Jahres den Ausbau von Nullemissions-Busflotten den Anforderungen der CVD entsprechend zu forcieren. Mitte 2021 muss die Erhöhung des Bestands auf 22,5 Prozent beginnen und bis Ende 2025 abgeschlossen sein. Dem sind weder die derzeitigen Fahrzeugangebote noch die bestehenden Lade- bzw. Betankungsinfrastrukturen gewachsen. Da die Ausweitung von Produktionskapazitäten für Fahrzeuge und insbesondere der Aufbau von Infrastruktur einen mehrjährigen Vorlauf erfordern, kommen ggf. erst heute beginnende Vorbereitungen zur vollständigen Erfüllung der CVD in mancherlei Hinsicht um Jahre zu spät.

Obleich sich die Anzahl zukünftig zum Einsatz kommender Brennstoffzellen- und Batteriebusse nicht seriös prognostizieren lässt, sind doch zumindest grobe Abschätzungen zu entstehenden Wasserstoffbedarfen möglich. Unter der frei gewählten Annahme, dass 20 Prozent der aktuell 194 Solobusse im Rems-Murr-Kreis künftig brennstoffzellendominante BZ-Busse sein werden, ist auf Grundlage der in dieser Studie durchgeführten Analysen mit einem Bedarf an 2,8 MW zusätzlicher Elektrolysekapazität im Kreis zu rechnen. Angesichts der 964 in der gesamten Region Stuttgart eingesetzten Solobusse wäre

analog ein Zubau von etwa 14,3 MW Elektrolysekapazität erforderlich. Die Realisierung der oben skizzierten EE-Potenziale könnte zur Stromversorgung der PtX-Anlagen beitragen und das Waiblinger System wertvolle Erfahrungswerte zu Wasserstoffproduktion und -abgabe liefern.

(4) Inwieweit und zu welchen Gesamtbetriebskosten ist der Betrieb von elektrischen und insbesondere Brennstoffzellen-Triebzügen im gegebenen Fall Wieslauftalbahn realisierbar?

Kapitel 9 beginnt mit der Feststellung, dass durch den Einsatz von Brennstoffzellentriebzügen auf der nahe gelegenen Wieslauftalbahn die Auslastung und Wirtschaftlichkeit der Waiblinger Wasserstoffanlage ggf. maßgeblich verbessert werden könnte. So entstand der Auftrag, einen Austausch der in die Jahre gekommenen bislang eingesetzten Dieseltriebzüge durch brennstoffzellen- oder auch batterieelektrische Triebzüge zu prüfen.

Die Ergebnisse einer Gesamtbetriebskostenanalyse der Wieslauftalbahn zeigen, dass die TCO batterieelektrischer Triebzüge um vergleichsweise moderate 13 Prozent über den TCO von Dieselfahrzeugen liegen, wohingegen die Mehrkosten brennstoffzellenelektrische Triebzüge signifikante 35 Prozent erreichen. Während das von den politischen Verantwortlichen gesetzte Ziel eines zukünftig vollständig elektrifizierten Bahnbetriebs mit Dieseltzügen nicht erreicht werden kann, sind nach bisherigen Erkenntnissen Batteriezüge die kostengünstigere der beiden Nullemissionsalternativen.

Allerdings konnte im Rahmen der Studie die technische Machbarkeit der elektrischen Antriebskonzepte nur ansatzweise untersucht werden. So wurde klar, dass eine zumindest weitgehende Deckung der H<sub>2</sub>-Nachfrage von BZ-Zügen durch die Waiblinger Wasserstoffanlage möglich ist, ggf. jedoch zur vollständigen Nachfragedeckung der Aufbau weiterer PtX-Anlagen erforderlich werden könnte. Während die Realisierung beider Konzepte auch infrastrukturseitig machbar erscheint, können belastbare Aussagen erst nach weitergehenden Untersuchungen getätigt werden.

Wie die Erfahrung mit Bussen lehrt, können situationsspezifisch nicht immer alle in Frage kommenden Technologien realisiert werden und andere als die kostengünstigsten Optionen zum Zuge kommen. Überdies können sich Kostenverhältnisse je nach Kombination mit weiteren Anwendungen ändern, z. B. indem durch die Bündelung von H<sub>2</sub>-Nachfragen der Betrieb größerer und kostengünstiger PtX-Anlagen wirtschaftlich tragfähig erscheint und entsprechende Investitionen rechtfertigt.

Vor diesem Hintergrund beschlossen die zuständigen Entscheidungsträger, die Hochschule Esslingen mit der Durchführung einer weiterführenden Studie zur Elektrifizierung der Wieslauftalbahn zu beauftragen. Die Untersuchung wird u. a. eine Marktanalyse verfügbarer Antriebssysteme, die Evaluierung baulicher Gegebenheiten, sowie eine Kosten-Nutzenanalyse enthalten. Erst auf Grundlage der Studie können fallspezifisch belastbare Aussagen zu den Vor- und Nachteilen des Einsatzes der beiden elektrischen Antriebsalternativen auf der Wieslauftalbahn getätigt werden.

## 10.2. Schlussfolgerungen und Zukunftsperspektiven

Abschließend werden einige übergreifende Schlussfolgerungen aus dem Gelernten gezogen. Zunächst ist festzustellen, dass die Studie auf beide angestrebten Ziele einzahlen konnte. Die vorläufige Förderzusage für das Waiblinger Projekt im Rahmen von H<sub>2</sub> Rivers, ebenso wie die Beschlüsse lokaler politischer Gremien zur Unterstützung des Vorhabens, ist ein großer Erfolg der für die Umsetzung des oben skizzierten Konzepts verantwortlichen Akteure. Im Hintergrund unterstützten die Analysen dieser Studie Projektplanung und trugen somit wie angestrebt zur zielführenden Beratung von Anwendern bei. Angesichts der umfassenden, sowohl mit Praktikern abgestimmten wie auch im Kontext der Literatur verorteten Analysen wurde auch ein wissenschaftlich relevanter Beitrag geleistet.

Inhaltlich sticht bei allen untersuchten Anwendungsfällen die mangelnde Wirtschaftlichkeit technisch durchaus einsatzfähiger Technologien heraus. Trotz Anrechnung von Fördermitteln konnten weder die Waiblinger Wasserstoffanlagen noch die untersuchten Nullemissionsbusse- und Züge eine Kostendeckung erreichen. Allerdings sind die Mehrkosten gegenüber konventionellen Technologien zumindest teilweise moderat. Während Batteriefahrzeuge tendenziell kostengünstiger sind, können teils nur Brennstoffzellenfahrzeuge die betrieblichen Anforderungen erfüllen.

Da andererseits klimapolitische Zielsetzungen und regulative Vorgaben die breite Markteinführung von CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffen und Nullemissionsfahrzeugen erfordern, wird weiterhin eine staatliche Förderung der relevanten Technologien notwendig sein. Angesichts des bislang trotz Förderung bestehenden Kostendeltas ist, im Einklang mit der nationalen Wasserstoffstrategie, eine zeitlich befristete Ausweitung des Förderangebots auch für PtX-Anlagen, H<sub>2</sub>-Tankstellen und BZ-Busse zu begrüßen. Die Beteiligung von Städten und Kommunen an den Mehrkosten kann einen weiteren Beitrag zur gemeinschaftlichen Bewältigung des Deltas liefern.

Nichtsdestotrotz ist eine Reduzierung der eigentlichen Technologiekosten v. a. im Bereich Wasserstoff unumgänglich und kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden: Zum einen ist seit langem eine durch viele Untersuchungen belegte kontinuierliche Kostensenkung insbesondere aufgrund bei Innovationsprozessen üblichen Lernkurven und Skaleneffekten zu verzeichnen. Zum anderen tragen international und insbesondere in Asien zu beobachtende stark zunehmende Kommerzialisierungsaktivitäten im Bereich der Wasserstoffmobilität wesentlich zur Kostensenkung bei [8]. Daher ist in den nächsten Jahren ein deutlicher Rückgang der Technologiekosten zu erwarten.

Methodisch und inhaltlich wurde klar, dass keines der beiden Antriebskonzepte Batterie oder Brennstoffzelle eine pauschale Überlegenheit für sich reklamieren kann. Wie bei der Auslegung der Waiblinger Anlage können jeweils nur situationsspezifische und nur ansatzweise auf andere Fälle übertragbare Aussagen getroffen werden. Damit sind beide Konzepte als komplementäre Technologien mit individuellen Vor- und Nachteilen zu verstehen, deren Eignung für bestimmte Anwendungen nur auf Grundlage kontextspezifischer Analysen bestimmt werden kann.

Die nationale Wasserstoffstrategie bietet auf „globaler“ Ebene einen vielversprechenden Rahmen für die weitere Unterstützung der für diese Studie zentralen Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien. Unter den konkreten von der Strategie vorgeschlagenen Maßnahmen ist neben der Ausweitung des Förderangebots insbesondere die avisierte Abschaffung der EEG-Umlage für PtX-Anlagen zu begrüßen. Ebenso sind die Fördermaßnahmen des Landes Baden-Württemberg, wie z. B. in der Kofinanzierung des Projekts H2Rivers von großem Wert für die weitere Technologieentwicklung.

Erst angesichts der festgestellten zentralen Bedeutung situationsspezifischer Analysen wird auch der ganze Mehrwert der vom Land angebotenen Beratungsgutscheine zum Umstieg auf Elektrobusse deutlich, der sich in einer maßgeschneiderten Information potentieller Betreiber von Nullemissionsbussen niederschlägt [109]. Auf „lokaler“ Ebene ist auch darauf zu achten, bei künftigen Ausschreibungen die mit der Anschaffung von Elektrobussen verbundenen Mehrkosten zu berücksichtigen.

Der Schlüssel zu einer ausgewogenen Elektrifizierung des Busverkehrs scheint in einer Kombination von Technologieförderung auf höherer politischer Ebene und spezifischen Analysen des lokalen Bedarfs zu liegen. So können die jeweils geeignetsten Antriebsoptionen identifiziert und zur Anwendung gebracht werden. ‚Promote global, apply local‘ – so könnte dieser Ansatz in Anlehnung an ein zentrales Credo des Nachhaltigkeitsdenkens auf den Punkt gebracht werden.

## 11. Danksagung

Die vorliegende Studie wurde von der Landesregierung Baden-Württemberg im Rahmen des *Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung* finanziert. Überdies wurde die Studiererstellung vom *Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft* des Landes sowie dem *Projekträger Karlsruhe* konstruktiv begleitet und mit hilfreichen Hinweisen zur Ausgestaltung versehen.

Der Landkreis Rems-Murr, vertreten durch den Landrat und das Landratsamt, unterstützte das Vorhaben mit Nachdruck und steuerte wertvolles Wissen insbesondere zum Thema emissionsfreier Busbetrieb bei. Die Stadt Waiblingen, vertreten durch den Oberbürgermeister und die Stadtwerke, setzte sich gleichfalls für die erfolgreiche Studiererstellung ein und unterstützte die Arbeiten mit Informationen zur Auslegung der Wasserstoffproduktions- und abgabeanlagen. Die Gemeinde Rudersberg, vertreten durch ihren Bürgermeister, trug ebenfalls zum Gelingen der Arbeit insbesondere durch Wissensbeiträge zum Schienenverkehr bei.

Auch eine Reihe von Unternehmen, Instituten und Organisationen unterstützte die Studiererstellung maßgeblich. Beispielsweise steuerten die Firmen *Kazenmaier*, *GP Joule*, *Siemens Mobility*, sowie verschiedene regionale Busunternehmen wertvolles Wissen und Hinweise zur realitätsnahen Gestaltung der Analysen zu Wasserstoffanlagen und Fahrzeugen bei. Das *Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg* leistete einen wichtigen Beitrag bei der Auslegung der H<sub>2</sub>-Anlagen und die *Württembergische Eisenbahn-Gesellschaft* brachte Kenntnisse zur Wieslaufalbahn ein.

All den oben genannten Akteuren, sowie weiteren, ungenannt gebliebenen Beteiligten, gebührt der ausdrückliche Dank der Autoren der vorliegenden Studie. Ohne die tatkräftige Unterstützung aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft wäre die Arbeit nicht in gleicher Qualität zu leisten gewesen.

## 12. Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Energie auf neuen Wegen“. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/energie-auf-neuen-wegen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/energie-auf-neuen-wegen.pdf?__blob=publicationFile)
- [2] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, *Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg*. [Online]. Verfügbar unter: <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/klima/klimaschutz-in-baden-wuerttemberg/klimaschutzgesetz>. Zugriff am: 11. August 2020.
- [3] BMWi, *Nationales Reformprogramm 2020 - Die Nationale Wasserstoffstrategie*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmbf.de/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>. Zugriff am: 11. August 2020.
- [4] Staatsministerium Baden-Württemberg, *Eine Wasserstoff-Roadmap für Baden-Württemberg*. Zugriff am: 11. August 2020.
- [5] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V., *VDV-Statistik 2018*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdv.de/vdv-statistik-2018.pdf>. Zugriff am: 22. August 2020.
- [6] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, *Deutschland wird Wasserstoff-Land: Weitere 16 Regionen erhalten Unterstützung für H2-Projekte, 2019*.
- [7] F. Rodenhausen, „Modellprojekt HyPerformer: Rems-Murr-Kreis setzt auf Wasserstofftechnologie“, *Stuttgarter Nachrichten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.modellprojekt-hyperformer-rem-s-murr-kreis-setzt-auf-wasserstofftechnologie.5829eb8b-a73c-4366-ab08-ce0a972000bf.html>. Zugriff am: 22. August 2020.
- [8] O. Ehret, „Wasserstoffmobilität: Stand, Trends, Perspektiven - Langfassung“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201910-abschlussbericht-h2-mobilitaet.pdf>. Zugriff am: 11. August 2020.
- [9] European Commission, *Renewable energy directive*. [Online]. Verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/energy/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive/overview\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive/overview_en). Zugriff am: 11. August 2020.
- [10] T. Smolinka et al., *Studie IndWEDe: Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/indwede-studie\\_v04.1.pdf](https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/indwede-studie_v04.1.pdf). Zugriff am: 11. August 2020.
- [11] O. Ehret et al., „H2R – Wasserstoff Rheinland: Feinkonzept zum Wettbewerb Modellregion Wasserstoff-Mobilität NRW“, Köln, In Erscheinung.
- [12] European Commission, *Alternative Fuels: Member State Country Fiches*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/alternative-fuels-ms-country-fiches.pdf>. Zugriff am: 11. August 2020.
- [13] BMBF, *Eine kleine Wasserstoff-Farbenlehre*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html>. Zugriff am: 5. August 2020.
- [14] European Commission, *Reducing CO2 emissions from heavy-duty vehicles*. [Online]. Verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_en). Zugriff am: 11. August 2020.
- [15] *Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge*.
- [16] Reuters, „Scheuer will jetzt eine Pkw-Maut für die ganze EU“, *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 22. Juli 2020, 2020. Zugriff am: 14. August 2020.

- [17] Region Stuttgart, *Die Region Stuttgart*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.region-stuttgart.de/>. Zugriff am: 3. August 2020.
- [18] Region Stuttgart, *Öffentlicher Nahverkehr in der Region Stuttgart*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.region-stuttgart.de/die-region-stuttgart/transport-verkehr/oeffentlicher-nahverkehr.html>. Zugriff am: 4. August 2020.
- [19] Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart GmbH, *Über den VVS*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vvs.de/presse/ueber-den-vvs/>. Zugriff am: 3. August 2020.
- [20] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken“, 2019. Zugriff am: 4. August 2020.
- [21] Kraftfahrt-Bundesamt, „Glossar: Stand: 15.05.2020“, Flensburg, 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.kba.de/DE/Service/Glossar/glossar\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=28](https://www.kba.de/DE/Service/Glossar/glossar_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=28). Zugriff am: 10. August 2020.
- [22] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Halter, Wirtschaftszweigen: 1. Januar 2019“, Flensburg, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz25\\_2019\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz25_2019_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=8). Zugriff am: 4. August 2020.
- [23] Europäische Kommission, *NACE Rev. 2: Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft*. Luxemburg: Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften, 2008.
- [24] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten), 1. Januar 2019, FZ 25: 1. Januar 2019“, Flensburg, 2019. Zugriff am: 4. August 2020.
- [25] Rems-Murr-Kreis, *Daten und Fakten: Rems-Murr-Kreis*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rems-murr-kreis.de/landratsamt-politik/landkreis/kreisportraet/daten-und-fakten/>. Zugriff am: 31. Juli 2020.
- [26] Rems-Murr-Kreis, „Zu Hause.: Jeder hat seine Geschichte - Das ist unsere“, 2018.
- [27] *Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe: 2014/94/EU*.
- [28] erdgas.info, *Erdgas-Tankstellen in Ihrer Nähe oder auf Ihrer Route*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/erdgas-tankstellen/tankstellenfinder/>. Zugriff am: 3. August 2020.
- [29] TOTAL, *Fünfte Wasserstoff-Tankstelle in Baden-Württemberg eröffnet*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.total.com/de/fuenfte-wasserstoff-tankstelle-baden-wuerttemberg-eroeffnet>. Zugriff am: 4. August 2020.
- [30] NOW GmbH, „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV: Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte“, 2018.
- [31] H2Tankstellen, *Live-Karte mit Wasserstofftankstellen*. [Online]. Verfügbar unter: <http://h2tankstellen.cleanenergypartnership.de/>. Zugriff am: 3. August 2020.
- [32] R. Sigel, "Ihre Anfrage zur Schaffung eines barrierefreien öffentlichen Personennahverkehrs bis 2022", Brief, Mrz. 2020.
- [33] S. Grotz, „Linien\_RMK“, 22. Juni 2020.
- [34] Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart GmbH, *Liniennetz*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vvs.de/karten-plaene/liniennetz/>. Zugriff am: 11. August 2020.
- [35] Rems-Murr-Kreis, *Busse und Bahnen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rems-murr-kreis.de/bauen-umwelt-verkehr/oepnv/oepnv-im-rems-murr-kreis/busse-und-bahnen/>. Zugriff am: 4. August 2020.

- [36] Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart GmbH, „Verbund-Schienenetz“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.vvs.de/download/Verbund\\_Schienenetz.pdf](https://www.vvs.de/download/Verbund_Schienenetz.pdf). Zugriff am: 4. August 2020.
- [37] O. Ehret, *Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/180502\\_dossier-wasserstoff-und-brennstoffzellen\\_de\\_web.pdf](https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/180502_dossier-wasserstoff-und-brennstoffzellen_de_web.pdf). Zugriff am: 11. August 2020.
- [38] U. Weichenhain *et al.*, „Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg“, 2020. Zugriff am: 11. August 2020.
- [39] O. Ehret und K. Bonhoff, „Hydrogen as a fuel and energy storage: Success factors for the German Energiewende“, *International Journal of Hydrogen Energy*, S. 5526–5533, 2015.
- [40] Hydrogen Council, „How hydrogen empowers the energy transition“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf>. Zugriff am: 13. August 2020.
- [41] M. Sterner und I. Stadler, *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [42] RWE AG, *Wie geht es mit Power-to-X weiter?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.en-former.com/wie-geht-es-mit-power-to-x-weiter/>. Zugriff am: 18. August 2020.
- [43] BDEW, *Zusammensetzung des Strompreises für die Industrie in Deutschland in den Jahren 2019 und 2020*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168571/umfrage/strompreis-fuer-die-industrie-in-deutschland-seit-1998/>. Zugriff am: 14. August 2020.
- [44] J. Meereis *et al.*, „Potenzialstudie Wasserstoffwirtschaft“, 2019.
- [45] e-mobilBW, „Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität“, 2013.
- [46] S. Joest *et al.*, „Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050“, 2009. Zugriff am: 14. August 2020.
- [47] M. Klell, H. Eichseder und A. Trattner, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [48] O. Ehret und M. Dignum, „Introducing hydrogen and fuel cell vehicles in Germany“, *Automobility in Transition? A Socio-Technical Analysis of Sustainable Transport*, S. 229–249, 2012.
- [49] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, *Clean Hydrogen In European Cities: 2010 – 2016: Fuel Cell Electric Buses: A Proven Zero-Emission Solution: Key Facts, Results, Recommendations*. [Online]. Verfügbar unter: <https://fuelcellbuses.eu/public-transport-hydrogen/fuel-cell-electric-buses-proven-zero-emission-solution>. Zugriff am: 11. August 2020.
- [50] Fuel Cell Electric Buses knowledge base, *Towards clean public transport with hydrogen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fuelcellbuses.eu/>. Zugriff am: 12. August 2020.
- [51] B. Reuter und M. Faltenbacher, „Betankung von BZ-Busflotten: NewBusFuel - Wirtschaftliche Versorgung mit Wasserstoff“, *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, Nr. 1, S. 28–29, 2018.
- [52] L. Langenbucher *et al.*, „Sustainable Concept and Economic Evaluation of a Solar-Powered Hydrogen Generation Unit“, Institute of Sustainable Energy Engineering and Mobility, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vbripress.com/aml/pdf/1466>. Zugriff am: 19. Dezember 2019.
- [53] Greenfield Development, Hg., „Baubauungsplan Energyhub im "Technologie- und Zukunftspark" Waiblingen“, 2018.
- [54] D. Kreyenberg, „Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität“. Dissertation.
- [55] L. M. Ellram und S. P. Siferd, „Purchasing: The Cornerstone of the Total Cost of Ownership Concept“, *Journal of Business Logistics*, Jg. 14, Nr. 1, S. 163–184, 1993.

- [56] M. Bremen, „Total Cost of Ownership: Kostenanalyse bei der globalen Beschaffung direkter Güter in produzierenden Unternehmen“. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2010.
- [57] H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG, *H2live - Häufigste Fragen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://h2.live/>. Zugriff am: 15. August 2020.
- [58] VDA, „Antriebe und Kraftstoffe der Zukunft“, 2009.
- [59] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. 1. Januar 2019“, Flensburg, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz13\\_2019\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=11](https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz13_2019_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=11). Zugriff am: 7. August 2020.
- [60] A. W. Kunith, *Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs: Technologiebewertung für den kosteneffizienten Betrieb emissionsfreier Bussysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [61] A. Huss und M. Corneille, „Brennstoffzellen im öffentlichen Personennahverkehr: Elektrobusse verbessern die Lebensqualität in den Städten“, 2015.
- [62] Starterset Elektromobilität, *Öffentlicher Personen-Nahverkehr (ÖPNV): Zurück auf Strom – Elektrische Antriebe für Stadtbusse*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.xn--starterset-elektromobilitaet-4hc.de/Bausteine/OEPNV>. Zugriff am: 13. August 2020.
- [63] W. Reinhardt, *Geschichte des öffentlichen Personenverkehrs von den Anfängen bis 2014: Mobilität in Deutschland mit Eisenbahn, U-Bahn, Straßenbahn und Bus*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-658-06628-4.pdf>
- [64] Roland Berger, „Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe: A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking“, Munich, 2015. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/150909\\_FINAL\\_Bus\\_Study\\_Report\\_OUT\\_0.PDF](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/150909_FINAL_Bus_Study_Report_OUT_0.PDF). Zugriff am: 11. August 2020.
- [65] J. Adolf *et al.*, „Shell Wasserstoff-Studie: Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>“, Hamburg, 2017. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study/\\_jcr\\_content/par/toptasks\\_e705.stream/1497968981764/1086fe80e1b5960848a92310091498ed5c3d8424/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf](https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study/_jcr_content/par/toptasks_e705.stream/1497968981764/1086fe80e1b5960848a92310091498ed5c3d8424/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf). Zugriff am: 11. August 2020.
- [66] S. Geitmann, „Daimler baut BZ-Technik in Nutzfahrzeuge ein: Brennstoffzellenbusse frühestens ab 2022“, *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, Nr. 4, S. 35–36, 2018.
- [67] Element Energy Limited, *Strategies for joint procurement of fuel cell buses: A study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Strategies\\_%20for\\_joint\\_procurement\\_of\\_FCbuses\\_final\\_report.pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Strategies_%20for_joint_procurement_of_FCbuses_final_report.pdf). Zugriff am: 11. August 2020.
- [68] D. Schneider, L. Langenbucher, L. Brodecki, M. Blesl und R. Wörner, „Analysis of an emission-free public transport (xEV)“, Oregon, Portland, 2020.
- [69] M. Henneka, W. Köppel, K. Kröger und D. Gerstein, „Bewertung von Gasbussen für den öffentlichen Personennahverkehr und Vergleich mit Alternativkonzepten: (Busstudie)“, Karlsruhe, 2019.
- [70] J. Wind, „Well-to-Wheel Vergleich der Treibhausgasemissionen und Energieverbräuche verschiedener PKW“, Okt. 2019.
- [71] A. Sternberg, C. Hank und C. Hebling, *Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km: Studie im Auftrag der H2 Mobility*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE\\_Ergebnisse\\_Studie\\_Treibhausgasemissionen.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf). Zugriff am: 11. August 2020.

- [72] *Personenbeförderungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 8. August 1990 (BGBl. I S. 1690), das zuletzt durch Artikel 329 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.*
- [73] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V., *Eigenwirtschaftlichkeit*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mobi-wissen.de/Finanzierung/Eigenwirtschaftlichkeit>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [74] Rems-Murr-Kreis, *Landratsamt schlägt Elektrobusse für Waiblingen vor*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.rems-murr-kreis.de/bauen-umwelt-verkehr/aktuelles/?tx\\_hwnnews\\_hwnnews%5BnewsartikelId%5D=641&tx\\_hwnnews\\_hwnnews%5Baction%5D=show&tx\\_hwnnews\\_hwnnews%5Bcontroller%5D=Newsartikel&cHash=bdda47e4445f34763fe38185c1199e1f](https://www.rems-murr-kreis.de/bauen-umwelt-verkehr/aktuelles/?tx_hwnnews_hwnnews%5BnewsartikelId%5D=641&tx_hwnnews_hwnnews%5Baction%5D=show&tx_hwnnews_hwnnews%5Bcontroller%5D=Newsartikel&cHash=bdda47e4445f34763fe38185c1199e1f). Zugriff am: 12. August 2020.
- [75] Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart GmbH, *Ab 1. Januar 2020: Fahrplanangebot im Raum Waiblingen legt deutlich zu*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vvs.de/linienbuendel/vvs-news-ab-1-januar-2020-fahrplanangebot-im-raum-waiblingen-legt-deutlich-zu/>. Zugriff am: 21. August 2020.
- [76] A. Fechter, „Emissionsfrei durch Waiblingens Innenstadt“, *Backnanger Kreiszeitung*, 4. Feb. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bkz.de/nachrichten/emissionsfrei-durch-waiblingens-innenstadt-62232.html>. Zugriff am: 12. August 2020.
- [77] Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart GmbH, „Fahrplan Linie 207“, 7. März 2019.
- [78] F. Koch und M. Dolman, „A European Approach for the Commercialization of Fuel Cell Buses in Public Transport“. Stuttgart, 9. Okt. 2017.
- [79] S. Schaal, *H2Bus: Neues Konsortium für Brennstoffzellen-Busse*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.electrive.net/2019/06/04/h2bus-neues-konsortium-fuer-brennstoffzellen-busse/>. Zugriff am: 12. August 2020.
- [80] EMCEL GmbH, *Wie entwickeln sich die Preise für Brennstoffzellenbusse?* [Online]. Verfügbar unter: <https://emcel.com/de/preise-fuer-brennstoffzellenbusse/>. Zugriff am: 12. August 2020.
- [81] F. Bergk, U. Lambrecht, R. Pütz und H. Landinger, „Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV“, Heidelberg, Landshut, München, 2015.
- [82] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, *Energieatlas Baden-Württemberg*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energieatlas-bw.de/energieatlas>. Zugriff am: 14. August 2020.
- [83] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, *Ermitteltes Solarpotenzial auf Dachflächen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflaechen/potenzial-dachflaechenanlagen>. Zugriff am: 12. August 2020.
- [84] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, *Ermitteltes PV-Freiflächenpotenzial*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energieatlas-bw.de/sonne/freiflaechen/potenzial-freiflaechenanlage>. Zugriff am: 14. August 2020.
- [85] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, *Ermittelte Windpotenzialflächen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energieatlas-bw.de/wind/ermittelte-windpotenzialflaechen>. Zugriff am: 12. August 2020.
- [86] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, *Ermitteltes Wasserkraftpotenzial*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energieatlas-bw.de/wasser/ermitteltes-wasserkraftpotenzial>. Zugriff am: 13. August 2020.
- [87] M. Schmitz, „Fahrzeuge und Infrastruktur - Aktuelle Entwicklung im ÖPNV: Vor welchen Herausforderungen stellt die Elektromobilität Verkehrsunternehmen? Welche Maßnahmen müssen ergriffen werden?“. Hamburg, 20. Mai 2019.

- [88] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. 1. Januar 2015“, Flensburg, 2015. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz13\\_2015\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz13_2015_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=5). Zugriff am: 10. August 2020.
- [89] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. 1. Januar 2016“, Flensburg, 2016. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2016/fz13\\_2016\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2016/fz13_2016_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=5). Zugriff am: 10. August 2020.
- [90] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. 1. Januar 2017“, Flensburg, 2017. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2018/fz13\\_2018\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2018/fz13_2018_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3). Zugriff am: 10. August 2020.
- [91] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. 1. Januar 2018“, Flensburg, 2018. Zugriff am: 10. August 2020.
- [92] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, 1. Januar 2020“, Flensburg, 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2020/fz13\\_2020\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2020/fz13_2020_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=6). Zugriff am: 10. August 2020.
- [93] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fch.europa.eu/>. Zugriff am: 12. August 2020.
- [94] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, *Förderrichtlinien/ Förderaufrufe*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.now-gmbh.de/de/bundesfoerderung-wasserstoff-und-brennstoffzelle/foerderrichtlinien>. Zugriff am: 12. August 2020.
- [95] J. Pagenkopf, M. Böhm und S. Herwartz, „Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20200331-hohes-marktpotenzial-alternativer-antriebe-im-schienenverkehr/now\\_marktanalyse-schienenverkehr.pdf](https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20200331-hohes-marktpotenzial-alternativer-antriebe-im-schienenverkehr/now_marktanalyse-schienenverkehr.pdf)
- [96] W. Klebsch, Patrick Heining und Jonas Martin, „Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2019/06/190524\\_vde\\_studie-alternativen-zu-dieseltriebzc3bcgen-im-spnv.pdf?utm\\_source=Newsletter&utm\\_medium=Email&utm\\_campaign=Newsletter](https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2019/06/190524_vde_studie-alternativen-zu-dieseltriebzc3bcgen-im-spnv.pdf?utm_source=Newsletter&utm_medium=Email&utm_campaign=Newsletter). Zugriff am: 5. August 2020.
- [97] Deutsche Bahn AG, *Ein Blick in die Vergangenheit: 40 Jahre S-Bahn Stuttgart*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.s-bahn-stuttgart.de/s-stuttgart/ueber\\_uns/Ein-Blick-in-die-Vergangenheit-4384124](https://www.s-bahn-stuttgart.de/s-stuttgart/ueber_uns/Ein-Blick-in-die-Vergangenheit-4384124). Zugriff am: 11. August 2020.
- [98] O. Hillinger, „Das Wiesel muss vorerst weiter Sprit tanken“, *Stuttgarter Zeitung*, 10. Nov. 2014, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.schorndorf-rudersberg-das-wiesel-muss-vorerst-weiter-sprit-tanken.8eb6dc12-0945-4df3-b3b7-e0233e2e4abf.html>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [99] DB Netze, *Infrastrukturregister*. [Online]. Verfügbar unter: <https://geovdbn.deutschebahn.com/isr>. Zugriff am: 5. August 2020.
- [100] Rems-Murr-Kreis, „Streckendaten zur Wieslaftalbahn“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rems-murr-kreis.de/bauen-umwelt-verkehr/oepnv/zweckverband-verkehrsverband-wieslaftalbahn/>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [101] Württembergische Eisenbahn-Gesellschaft mbH, „Fahrzeuge“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.weg-bahn.de/de/ueber-uns/fahrzeuge>. Zugriff am: 19. Dezember 2019.
- [102] J. Steinbauer, "AW: Wieslaftalbahn: 4 statt 6 Fahrzeug bei TCO-Berechnung", E-Mail, Dez. 2019.

- [103] F. Rodenhausen, „Wasserstoff für Wiesel im Visier“, *Stuttgarter Zeitung*, 22. Juli 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.zweckverband-wieslauftal-bahn-wasserstoff-fuer-wiesel-im-visier.0ecd8dde-16a8-463e-b095-970bd76aa021.html>. Zugriff am: 18. August 2020.
- [104] R. Scholz, N. Gläser, D. Paluch und T. Schmidt, „Auf dem Weg zur Emissionsfreiheit im Zugverkehr: Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene: Fahrplan für den Einsatz von Brennstoffzellen-triebwagen in Deutschland“, Berlin, 2016.
- [105] Roland Berger, *Study on the use of Fuel Cells and Hydrogen in the Railway Environment*. [Online]. Verfügbar unter: [https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/05/Study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment\\_final.pdf](https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/05/Study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment_final.pdf). Zugriff am: 12. August 2020.
- [106] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, *Spatenstich in Bremervörde: Weltweit erste Wasserstofftankstelle für Passagierzüge*, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/spatenstich-in-bremervoerde-weltweit-erste-wasserstofftankstelle-fuer-passagierzuege>
- [107] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, *Weltweit größte Brennstoffzellenzug-Flotte für den Taunus geplant*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/weltweit-groesste-brennstoffzellenzug-flotte-fuer-den-taunus-geplant>
- [108] S. Geitmann, „Auf der Schiene geht’s voran: Großes Interesse an Brennstoffzellenzügen“, *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, Nr. 1, S. 34–35, 2018.
- [109] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, *Wir fördern Ihren E-Bus*. [Online]. Verfügbar unter: <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/politik-zukunft/elektromobilitaet/foerderung-elektromobilitaet/e-bus/>. Zugriff am: 22. August 2020.

## Abkürzungsverzeichnis

A	AbLa	Abschaltbare Lasten	
	AFID	Alternative Fuels Infrastructure Directive	
	AEL	Alkalischer Elektrolyseur	
B	BC	Battery Changing	
	BEV	Battery Electric Vehicle	
	BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft	
	Bf	Bahnhof	
	BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz	
	BZ	Brennstoffzelle	
BW		Baden-Württemberg	
C	CAPEX	Capital Expenditure	
	CCS	Carbon Capture Storage	
	CNG	Compressed Natural Gas	
	CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	
	ct	Cent	
	CVD	Clean Vehicles Directive	
D	d	Tag/Tage	
	DB	Deutsche Bahn	
E	EE	Erneuerbare Energien	
	EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz	
	EnWG	Energiewirtschaftsgesetz	
	EU	Europäische Union	
F	FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle	
	FC-REX	Brennstoffzellen-Range Extender	
	F&E	Forschung und Entwicklung	
G	g	Gramm	
	GWh	Gigawattstunde	
H	H <sub>2</sub>	Wasserstoff	
	Hbf	Hauptbahnhof	
	HTEL	Hochtemperaturelektrolyseur	
J	JIVE	Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe	
K	KBA	Kraftfahrt-Bundesamt	
	kg	Kilogramm	
	km	Kilometer	
	km/h	Kilometer pro Stunde	
	KPI	Key Performance Indicator	
	kW	Kilowatt	
	kWh	Kilowattstunden	
	KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	
	KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz	
	L	Lkw	Lastkraftwagen
	M	M2	Fahrzeugklasse M2 (Kraftfahrzeuge zur Beförderung von mehr als neun Personen; bis fünf Tonnen zulässige Gesamtmasse)
M3		Fahrzeugklasse M3 (Kraftfahrzeuge zur Beförderung von mehr als neun Personen; über fünf Tonnen zulässige Gesamtmasse)	
m <sup>2</sup>		Quadratmeter	
MEHRLIN		Models for Economic Hydrogen Refuelling	
MIV		Motorisierter Individualverkehr	
MW		Megawatt	
O	MWp	Megawatt Peak	
	OC	Opportunity Charging	

	ON	Overnight Charging
	OPEX	Operational Expenditure
	ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
P	PEM	Proton Exchange Membrane
	PEMEL	Proton Exchange Membrane Elektrolyseur
	Pkw	Personenkraftwagen
	PO	Partielle Oberleitung
	PtG	Power-to-Gas
	PtH	Power-to-Heat
	PtL	Power-to-Liquid
	PtX	Power-to-X
	PV	Photovoltaik
R	RED	Renewable Energy Directive
	RMK	Rems-Murr-Kreis
S	SSB	Stuttgarter Straßenbahnen AG
	StromNEV	Stromnetzentgeltverordnung
T	TCO	Total Cost of Ownership
	THG	Treibhausgas
	tkm	Tonnenkilometer
V	VVS	Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart
W	WEG	Württembergische Eisenbahngesellschaft
	WN	Waiblingen

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Region Stuttgart [17] .....	11
Abbildung 3-2: Bestand Kraftomnibusse in der Region Stuttgart nach Zulassungsbezirk und Haltergruppe [20, 22] .....	12
Abbildung 3-3: Bestand Solobusse in der Region Stuttgart nach Zulassungsbezirk [20, 24] .....	12
Abbildung 3-4: Darstellung Rems-Murr-Kreis [26] .....	13
Abbildung 3-5: Tankmöglichkeiten alternativer Kraftstoffe [28, 31] .....	14
Abbildung 3-6: Busliniennetz im Rems-Murr-Kreis [34] .....	14
Abbildung 3-7: VVS-Schienennetz [36] .....	15
Abbildung 4-1: Die Schlüsselrolle von Wasserstoff im Energiesystem der Zukunft [38, 40] .....	17
Abbildung 4-2: Sektorenkoppelnde Energiespeicher nach [41] .....	18
Abbildung 4-3: Exemplarische Darstellung saisonaler Schwankungen von Photovoltaik-Erträgen .....	21
Abbildung 4-4: Schema einer On-site-Erzeugung durch Elektrolyse [45] .....	23
Abbildung 4-5: Schema einer gasförmigen Belieferung von Wasserstoff an eine Tankstelle [45] .....	24
Abbildung 5-1: Übersicht des <i>Technologie- und Zukunftsparks</i> in Waiblingen (Stand 2019) .....	26
Abbildung 5-2: Geplante Photovoltaik-Flächen im Technologie- und Zukunftspark in Waiblingen (Angelehnt an [53]) .....	27
Abbildung 5-3: Darstellung der Photovoltaik-Erträge gegenüber der Elektrolyseurauslastung in Jahresansicht .....	28
Abbildung 5-4: Prognose der Volllaststunden mit etwa 80 Prozent Auslastung (blau) und Auslastung durch Photovoltaik-Strom (rot) des Elektrolyseurs .....	29
Abbildung 5-5: Prognose der Elektrolyseur-Nutzung (rot) beispielhaft für eine Winterwoche .....	29
Abbildung 5-6: Prognose der Elektrolyseur-Nutzung (rot) beispielhaft für eine Sommerwoche .....	30
Abbildung 5-7: Geplante Fläche für erneuerbar gespeiste Wasserstoffherzeugung sowie Wasserstofftankstelle im Technologie- und Zukunftspark, Stand 2019 (Quelle: ZSW) .....	31
Abbildung 5-8: Darstellung des voraussichtlichen Tankstellensystems, Stand: November 2019 adaptiert nach [45] .....	32
Abbildung 5-9: Inputdaten TCO .....	33
Abbildung 5-10: Betrachtungszeitraum in Abhängigkeit der Wasserstoffgestehungskosten verglichen mit dem derzeitigen Marktpreis .....	34
Abbildung 6-1: Fächerstrategie der deutschen Automobilindustrie [58] .....	36
Abbildung 6-2: Kraftstoffarten ohne Diesel bei Bussen in Baden-Württemberg [59] .....	37
Abbildung 6-3: Übersicht innovativer Technologietypen zur Elektrifizierung des Busverkehrs [60] .....	37
Abbildung 6-4: Depotladung .....	38
Abbildung 6-5: Gelegenheitsladung .....	38
Abbildung 6-6: Partielle Oberleitung .....	39
Abbildung 6-7: Batteriewechselsystem .....	39
Abbildung 6-8: Brennstoffzellenbus .....	40
Abbildung 6-9: Brennstoffzellenbus mit REX .....	40
Abbildung 6-10: Key Performance Indikatoren [68] .....	42
Abbildung 7-1: Streckenverlauf Linie 207 .....	46
Abbildung 7-2: Total Cost of Ownership-Analyse der Buslinie 207 .....	47
Abbildung 7-3: Streckenverlauf Expressbuslinie .....	49
Abbildung 7-4: Wasserstofftankstellen im Umkreis der Expressbuslinie .....	50
Abbildung 7-5: Total Cost of Ownership-Analyse der Expressbuslinie .....	51
Abbildung 8-1: Potenzial von PV-Dachanlagen (links) und PV-Freiflächenanlagen (rechts) im Rems-Murr-Kreis [83, 84] .....	55
Abbildung 8-2: Potenzial von Windkraftanlagen im Rems-Murr-Kreis [85] .....	55

Abbildung 8-3: Potenzial von Wasserkraftanlagen im Rems-Murr-Kreis [86] .....	56
Abbildung 8-4: Anteile emissionsfreier und sauberer Fahrzeuge [87].....	57
Abbildung 8-5: Anteil Kraftstoffarten in Baden-Württemberg (2015-2020) [59, 88–92] .....	58
Abbildung 8-6: Anzahl Linien nach Länge im RMK [33].....	59
Abbildung 8-7: Projizierte wirtschaftliche Attraktivität [40] .....	60
Abbildung 8-8: Wasserstoffbedarfe im Rems-Murr-Kreis.....	61
Abbildung 8-9: Wasserstoffbedarfe in der Region Stuttgart.....	62
Abbildung 9-4: Reichweiten verschiedener Antriebskonzepte ohne Nachladen/Nachtanken [95] .....	64
Abbildung 9-1: Bahnstreckennetz Deutschland mit regionaler Einordnung der Wieslaufalbahn (rot markiert) [99].....	65
Abbildung 9-2: Streckenverlauf Wieslaufalbahn .....	66
Abbildung 9-3: Total Cost of Ownership-Analyse der Wieslaufalbahn [102] .....	67

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Regularien zur Reduzierung oder vollständiger Streichung von Stromumlagen .....	20
Tabelle 5-1: Übersicht der Bewertungskriterien am Fallbeispiel des <i>Technologie- und Zukunftsparks</i> in Waiblingen.....	35
Tabelle 6-1: Übersicht der Bewertungskriterien innovativer Antriebe zur Elektrifizierung des Busverkehrs .....	43
Tabelle 7-1: Kostenvergleich .....	53