

BIGS ESSENZ

Brandenburgisches Institut für **Gesellschaft** und **Sicherheit**



DER POLITISCH-ÖKONOMISCHE KONTEXT DER DEKARBONISIERUNG IM BEREICH DES RETTUNGSWESENS, DER FEUERWEHR UND DES KATASTROPHENSCHUTZES

Kurzstudie im Rahmen
des Power2Rescue-Projekts

Kai Beerlink

Die vorliegende Kurzstudie untersucht die politischen, ökonomischen und technologischen Rahmenbedingungen für die Dekarbonisierung im Rettungswesen, bei der Feuerwehr und im Katastrophenschutz. Im Zentrum stehen alternative Antriebe wie Wasserstoff, batterieelektrische Systeme und E-Fuels, die zur Reduktion von Emissionen beitragen können. Die Analyse zeigt, dass sich die Marktdurchdringung und praktische Nutzung der Antriebsformen im Bereich von Notfalleinsätzen stark unterscheiden.

Um die Einführung dieser Technologien zu beschleunigen, sind gezielte politische Maßnahmen, der Ausbau von Infrastrukturen und die Entwicklung nachhaltiger Förderprogramme notwendig. Die Region Lausitz steht dabei exemplarisch im Fokus der Studie, da die Ergebnisse als Grundlage für konkrete Handlungsempfehlungen und praxisorientierte Strategien dienen sollen. Insgesamt liefert die Studie wichtige Impulse und Praxiseinblicke für die Transformation hin zu klimaneutralen Technologien in essenziellen Bereichen der öffentlichen Sicherheit und des Katastrophenschutzes. Die vorliegende Kurzstudie wurde vom mFund-Förderprogramm des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr gefördert.

BIGS ESSENZ NR. 23 . Februar 2025



1 EINLEITUNG

In den letzten Jahren ist das Interesse an Alternativen zu fossilen Antriebstechnologien im Bereich der Mobilität erheblich gestiegen. Diese Entwicklung wird durch eine Vielzahl von Faktoren vorangetrieben, darunter die Notwendigkeit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen¹, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und die damit verbundenen geopolitischen Unsicherheiten² sowie die kontinuierliche technologische Weiterentwicklung im Bereich der erneuerbaren Energien.³ Insbesondere das Verbot der Neuzulassung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ab 2035, welches von der EU geplant wird, erhöht den Druck auf eine umfassende Dekarbonisierung des Straßenverkehrs.

Je nach Mobilitätssektor ergeben sich allerdings unterschiedliche Anforderungen und Herausforderungen an alternative Antriebstechnologien. Im Bereich Rettungsdienst, Feuerwehrwesen und Katastrophenschutz ist die Umstellung auf alternative Antriebstechnologien aufgrund der Kritikalität dieser Dienste mit besonderen Erfordernissen in der Verfügbarkeit, Verlässlichkeit und Sicherheit verbunden. Diese Faktoren wiederum werden gerade bei aufkommenden Technologien stark durch den ordnungspolitischen Rahmen und ökonomische Trends beeinflusst.⁴

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel dieser Kurzstudie, eine umfassende Analyse der aktuellen politischen, ökonomischen und technischen Entwicklungen im Bereich der alternativen Antriebsstoffe durchzuführen. Dabei liegt der Fokus auf drei relevanten Technologien: Elektroantrieb mit Wasserstoff⁵-Brennstoffzelle, batterieelektrischer Antrieb, sowie verbrennungstechnischer Antrieb mit E-Fuels. Im Kontext des Projekts Power2Rescue zielt diese Studie somit darauf ab, einen fundierten Überblick über die Entwicklungen der allgemeinen Rahmenbedingungen der genannten Antriebstechnologien sowie internationaler Anwendungsfälle zu geben, die für die praktische Einführung und Integration von alternativen Antriebstechnologien in Einsatzfahrzeuge des Rettungsdienstes, der Feuerwehr und des Katastrophenschutzes (insbesondere in der Region Lausitz, auf welche dieses Projekt einen besonderen Fokus legt) relevant sind. Die Ergebnisse der Kurzstudie werden in die Vorbereitung von Expertenworkshops und weitere Projektarbeit einfließen und somit die Entwicklung von praxisorientierten Konzepten und Handlungsempfehlungen unterstützen.

Für die Erstellung dieser Kurzstudie wurden wissenschaftliche und zeitaktuelle Publikationen sowie Berichte ausgewertet und Informationen zu Anwendungsfällen aus internationalen Projekten und Initiativen zusammengetragen. Die Relevanz und Aktualität der Quellen wurden dabei durch eine gezielte Auswahl und eine systematische Auswertung sichergestellt. Die inhaltliche Arbeit an der Studie erfolgte vor allem zwischen Juni und Oktober 2024, sodass politische und wirtschaftliche Entwicklung nach Oktober 2024 nur stellenweise berücksichtigt werden konnten.

1 Hüls (2022).

2 Umbach (2023).

3 Schiffer (2023).

4 Hille, Althammer & Diederich (2020).

5 Wasserstoff fungiert lediglich als Energieträger und speichert Energie aus primären Quellen wie erneuerbaren Energien („grüner“ Wasserstoff) oder fossilen Brennstoffen („grauer“ Wasserstoff). Angesichts der Bestrebungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen liegt der Fokus in dieser Kurzstudie auf grünem Wasserstoff. Andere „Farben“ werden an den passenden Stellen am Rande behandelt. Auch bei den anderen behandelten alternativen Antriebsstoffen liegt der Fokus auf emissionsfreien Erzeugungsförmern.

2 ORDNUNGSPOLITISCHER RAHMEN

Die Entwicklung und Einführung alternativer Antriebsstoffe ist eng mit politischen Rahmenbedingungen verknüpft. Dieses Kapitel untersucht die regulatorischen, rechtlichen und finanziellen Grundlagen, die den

Markt für alternative Antriebsstoffe in Deutschland und Europa prägen. Der Schwerpunkt liegt auf der Interaktion zwischen politischen Zielsetzungen und marktgetriebenen Entwicklungen.

2.1 Markt für alternative Antriebsstoffe

Der Markt für **Wasserstoff** ist derzeit von erheblichen Unsicherheiten und dynamischen Veränderungen geprägt. Das Angebot an grünem Wasserstoff in Deutschland ist aktuell noch sehr gering. Im Jahr 2020 lag die Produktion bei etwa 2,75 bis 3 Terawattstunden.⁶ Verschiedene Studien machen deutlich, dass Deutschland einen Großteil seines zukünftigen Wasserstoffbedarfs importieren muss.⁷ Prognosen zur langfristigen Wasserstoffnachfrage in einschlägigen Metastudien variieren erheblich: Während für das Jahr 2030 oft ein Bedarf von etwa 40 Terawattstunden genannt wird, könnten es bis zum Jahr 2050 bis zu 690 Terawattstunden werden.⁸ Kurz- bis mittelfristig, also bis zum Jahr 2030, wird allerdings oftmals geschätzt, dass Deutschland über 70 % seines Wasserstoffbedarfs durch Importe decken muss.⁹ Die Unsicherheiten hinsichtlich der Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff in potenziellen Exportregionen wie den Anrainerstaaten der Nord- und Ostsee, Südeuropa oder Nordafrika sowie die Konkurrenz mit anderen großen Abnehmern wie den USA, Japan oder Südkorea¹⁰ verdeutlichen, dass sich die Strukturen der Lieferketten und die Preisentwicklung von grünem Wasserstoff erst in den kommenden Jahren stabilisieren und zuverlässiger prognostiziert werden können. Auch blauer Wasserstoff, der oft als Übergangslösung bis zur breiten Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff gesehen wird, wird erst ab ca. 2030 in größeren Mengen verfügbar sein und stellt somit keine kurzfristige Lösung dar.¹¹ Grauer Wasserstoff, der hauptsächlich aus der Dampferformierung von Erdgas erzeugt wird und demnach signifikante CO₂-Emissionen verursacht, wird schon heute in erheblichen Mengen in bestimmten Industrien (Chemie,

Metallurgie, Glas, Halbleiter) genutzt. Ein substanzielles Wachsen des Markts ist hier allerdings aufgrund der politischen Fokussierung auf und Förderung von grünem Wasserstoff und steigender CO₂-Preise in Europa nicht zu erwarten.¹²

Bezüglich des Angebots von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen in Deutschland lässt sich konstatieren, dass die Auswahl derzeit auf eine geringe Anzahl von Modellen in Kleinserien beschränkt ist. Der Pkw-Markt wird dabei überwiegend von nicht-europäischen Herstellern wie Toyota und Hyundai dominiert.¹³ Das erste deutsche Fabrikat eines wasserstoffbetriebenen Pkw der Marke BMW soll frühestens 2027 verfügbar sein. Auch die Nachfrage ist noch sehr begrenzt: bis Juli 2024 wurden in Deutschland lediglich 73 neue wasserstoffbetriebene Pkw zugelassen, im Vergleich zu etwa 215.000 neu zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeugen im gleichen Zeitraum.¹⁴ Der Einsatz von wasserstoffbetriebenen Lkw nimmt in Europa und Deutschland zu, wobei Hersteller wie Daimler Truck, Volvo, Renault, DAF, Scania, Iveco und MAN Feldversuche mit Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Verbrennungsmotoren durchführen.¹⁵ Ein Vorreiter ist die DEVK-Tochter Hylane, die bereits 44 Brennstoffzellen-Lkw im Einsatz hat.¹⁶ MAN plant zudem für 2025 eine Kleinserie von 200 Wasserstoff-Lkw, die in ausgewählten Märkten getestet werden sollen.¹⁷ Dennoch bleibt die Anzahl der in Deutschland zugelassenen wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeuge mit 92 Anfang 2024 vergleichsweise niedrig.¹⁸ Das drückt sich auch in der kaum vorhandenen kommerziellen Verfügbarkeit von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen

6 Kruse & Wedemeir (2021: 27).

7 Wietschel et al. (2021: 43).

8 Bühler et al. (2023: 20).

9 Ebd.; Schwerz, Meub & Proeger (2022: 1).

10 Kaiser & Malanowski (2020: 32-33); Spitzner et al. (2020: 8-9); Küper (2021: 2); Pfennig et al. (2021: 14).

11 Clausen (2022: 13); Merten & Scholz (2023: 9).

12 Küper (2021: 1); Westphal et al. (2023a: 12).

13 NOW (2022a); Umweltbundesamt (2022).

14 Kraftfahrt-Bundesamt (2024a).

15 Verkehrsgrundschau (2024).

16 TTW (2023).

17 Hausmann (2024).

18 Bundestag (2024).

spezifisch für das Rettungswesen, die Feuerwehr und den Katastrophenschutz aus. Wie in Kapitel 5 ersichtlich wird, sind oft lediglich Unterstützungswagen oder spezielle Sonderanfertigungen auf Wasserstoff-Basis in diesen Bereichen im Einsatz.

Die derzeit gängigsten Varianten von **E-Fuels** basieren u.a. auf Wasserstoff, was bedeutet, dass deren Verfügbarkeit von den Marktbedingungen für Wasserstoff abhängt. Dies ist einer der Gründe, die zu erheblicher Unsicherheit und einem voraussichtlich sehr begrenzten Angebot an E-Fuels führen.¹⁹ Derzeit sind E-Fuels kaum kommerziell verfügbar, und es existieren weltweit nur wenige Produktionsanlagen.²⁰ Laut einer Prognose des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung könnte das weltweite Angebot an E-Fuels bis 2035 selbst in einem optimistischen Szenario nur etwa 10 % des deutschen Bedarfs decken.²¹ Die Hauptnachfrage wird hierbei vor allem aus der chemischen Industrie, der Luftfahrt und der Schifffahrt erwartet, da E-Fuels in diesen Bereichen aus Sicht vieler Experten am effizientesten eingesetzt werden können.²² Es bleibt abzuwarten, inwiefern politische Anreize und regulatorische Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle bei der weiteren Entwicklung spielen werden.²³

Der deutsche Markt für **batterieelektrische Fahrzeuge** hat sich in den letzten Jahren signifikant gewandelt, wobei Angebot und Nachfrage deutlichen Veränderungen unterworfen waren. Deutschland, einer der größten Märkte für Elektrofahrzeuge in Europa, verzeichnete Ende 2023 und insbesondere im Jahr 2024 einen erheblichen Rückgang der Neuzulassungen. Während im Gesamtjahr 2023 noch 524.219 Elektrofahrzeuge neu zugelassen wurden, sank die Zahl in der ersten Jahreshälfte 2024 auf nur noch 184.125.²⁴ Dieser Rückgang ist unter anderem auf das Auslaufen der staatlichen Förderung für Plug-in-Hybride und Elektrofahrzeuge Ende 2023 zurückzuführen.²⁵ Diese nationale Nachfrageschwäche steht im Gegensatz zu der weltweit steigenden Nachfrage nach Elektrofahrzeugen, die laut einer Prognose der

Internationalen Energieagentur (IEA) bis 2035 die Hälfte aller weltweit verkauften Fahrzeuge ausmachen könnten, unter Annahme der aktuellen politischen Vorgaben.²⁶ Ein starker Treiber dieser Entwicklung ist die Binnennachfrage in China, wo gemäß der Prognose 2030 fast jedes dritte Auto elektrisch sein wird, während es in den Vereinigten Staaten und der EU fast jedes fünfte Fahrzeug wäre.²⁷

Auf der Angebotsseite bleibt Deutschland trotz seiner bedeutenden Rolle in der Automobilindustrie stark von Importen abhängig. Insbesondere aufgrund der deutlich niedrigeren Produktionskosten für Lithium-Ionen-Batterien in China wird prognostiziert, dass im Jahr 2024 etwa ein Viertel der in der EU verkauften Elektrofahrzeuge aus China importiert werden.²⁸ Obwohl die Produktionskapazitäten in Deutschland und Europa in den kommenden Jahren erheblich ausgeweitet werden sollen, bleiben die Abhängigkeit von ausländischen Herstellern sowie die Verfügbarkeit von Rohstoffen für die Batterieherstellung kritische Faktoren für das Angebot an Elektrofahrzeugen.²⁹ Insgesamt zeigt sich, dass der internationale Markt für Elektromobilität eine dynamische und positive Entwicklung erfährt, während der nationale Markt stark durch politische Rahmenbedingungen und globale Lieferketten beeinflusst wird.

Dieser allgemeine Trend drückt sich auch in einer im Vergleich zu Wasserstoff deutlich breiteren Produktpalette an batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen für das Rettungswesen, die Feuerwehr und den Katastrophenschutz aus (siehe Kapitel 5 für Details). Nichtsdestotrotz ist der Markt in diesen speziellen Segmenten aus Sicht von Kommunen und Einsatzbehörden, mit denen das Projektteam Gespräche führen durfte, noch zu wenig standardisiert und zu sehr auf Sonderanforderungen einzelner Beschaffer zugeschnitten, was Preise steigen lässt und Beschaffungsprozesse erschwert.

19 Wietschel et al. (2023b: 5).

20 Ueckerdt & Odenweller (2023).

21 Ebd.

22 Wietschel et al. (2023b: 5).

23 Neuling & Berks (2023: 33-34).

24 Kraftfahrt-Bundesamt (2024b).

25 Henkel (2023).

26 IEA (2024: 12).

27 Ebd.

28 T&E (2024).

29 Kampker et al. (2023).

2.2 Regulierung, Gesetzesrahmen und Normen

Die Produktion und Nutzung von **Wasserstoff** in Deutschland sind in ein komplexes Netz aus nationalen und europäischen Regularien, Gesetzen und Normen eingebunden. Eine Übersicht der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) listet 24 europäische und 27 nationale Verordnungen, Richtlinien und Beschlüsse, die sich auf Wasserstoff beziehen.³⁰

Im Hinblick auf die Klimaschutzziele ist insbesondere die Regulierung von grünem Wasserstoff von Bedeutung. Auf europäischer Ebene legt die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Renewable Energy Directive) Mindestanforderungen fest, die zusammen mit einem delegierten Rechtsakt bestimmen, unter welchen Bedingungen Wasserstoff als „grün“ gilt. In Deutschland definiert das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2023) grünen Wasserstoff als in einem elektrochemischen Verfahren durch erneuerbare Energien erzeugten Wasserstoff. Zudem macht das Gesetz zu Herkunftsnachweisen (HkNRG) eine Zertifizierung der nachhaltigen Produktion von Wasserstoff möglich.³¹ Allerdings sind diese rechtlichen Definitionen aus Sicht einiger Autoren aktuell noch fragmentiert und uneinheitlich, was zu Unsicherheit bei den Marktakteuren führt.³²

Ein wesentlicher Bestandteil der nationalen Wasserstoff-Infrastrukturstrategie ist die Entwicklung eines etwa 9.700 Kilometer langen Wasserstoff-Kernnetzes, über das alle Bundesländer miteinander verbunden werden sollen. Dieses Netz, dessen Inbetriebnahme bis 2032 geplant ist, wird über Netzentgelte finanziert und unterliegt der Aufsicht der Bundesnetzagentur als zentrale Regulierungsbehörde. Das geplante Wasserstofftransportnetz wird nicht bis zu jedem Endverbraucher ausgebaut. Vielmehr muss eine Abstimmung zwischen Wasserstoffnutzer und Fernleitungsnetzbetreibern stattfinden, um eine Anbindung an das Kernnetz zu gewährleisten. Auf regionaler und kommunaler Ebene sind dafür die Verteilernetzbetreiber von besonderer Bedeutung, da sie Wasserstoffkunden bündeln und diese mit dem überregionalen Kernnetz verbinden.³³

In diesem Zusammenhang ist auch die Anpassung des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) zu erwähnen, durch

die im Juli 2021 neue Regelungen für Wasserstoffnetze eingeführt wurden. Dadurch wurde ein Rahmen für die Nutzung sowie mögliche Erweiterung der bestehenden Gasinfrastruktur zum Wasserstofftransport geschaffen, der als Übergangslösung dienen soll, bis europaweit einheitliche Regelungen vorliegen.³⁴

Die Nutzung von Wasserstoff im Verkehr wird in Deutschland durch verschiedene Verordnungen geregelt, die insbesondere sicherheitstechnische Standards betreffen. Die Wasserstofftankstellenverordnung (WTV) definiert Sicherheitsvorschriften für öffentliche Wasserstofftankstellen.³⁵ Darüber hinaus stellen die Verordnung (EG) Nr. 79/2009 und ihr Nachfolger (EU) 2019/2144 grundlegende Anforderungen an die Zulassung von Wasserstofffahrzeugen und wasserstoffführende Komponenten in Fahrzeugen. Diese Verordnungen setzen strenge Sicherheitsstandards, die umfangreiche Tests wie Druck- und Feuersicherheitsprüfungen umfassen.

Aktuelle Debatten zur Regulierung von **E-Fuels** drehen sich hauptsächlich um deren Anerkennung und Rolle im Kontext des geplanten Auslaufens der Zulassung von Verbrennungsmotoren in der EU. Während die EU ursprünglich ab 2035 nur noch emissionsfreie Fahrzeuge zulassen wollte, plädieren einige Mitgliedstaaten und hochrangige EU-Politiker für Ausnahmen für Fahrzeuge, die mit E-Fuels betrieben werden. Die Diskussion konzentriert sich darauf, ob E-Fuels als klimaneutrale Lösung für bestehende Verbrennungsmotoren anerkannt werden können und inwieweit ihre Einführung technisch, wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll ist. Wie die Regulierung von E-Fuels auf europäischer Ebene letztlich ausgestaltet wird, bleibt derzeit noch offen.³⁶

In Deutschland definiert die 10. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (10. BIm-SchV) die Rahmenbedingungen für den Einsatz von E-Fuels im Straßenverkehr. Nach dieser Verordnung müssen Kraftstoffe bestimmte technische Standards erfüllen, um zugelassen zu werden. E-Fuels, die als Ersatz für Benzin verwendet werden, erfüllen bereits die Norm DIN EN 228. Für Diesel galten lange andere Normen, insbesondere DIN EN 590, nach welcher bis zu einer Konzentration von 26 % E-Fuels dem üblichen Diesel beigemischt

30 NOW (2023).

31 Hoffmann et al. (2021: 5-7); r2b (2023: 43-49).

32 Hoffmann et al. (2021: 7); Westphal et al. (2023b: 17).

33 BMWK (2024a); BMWK (2024b).

34 Kern et al. (2023: 13).

35 IKEM (2024).

36 Wolf (2024).

werden können. Kürzlich wurde durch eine Novelle der 10. BImSchV entschieden, dass bestimmte alternative Dieselkraftstoffe, darunter hydrierte Pflanzenöle und E-Fuels nach DIN EN 15940, in reiner Form an Tankstellen angeboten werden dürfen.³⁷

Die **Elektromobilität** ist, ähnlich wie die Wasserstofftechnologie, in ein komplexes Netz aus europäischen und nationalen Vorschriften eingebunden. Laut der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie gibt es auf europäischer Ebene acht und auf nationaler Ebene 26 relevante Verordnungen und Richtlinien, die diesen Bereich regulieren.³⁸ Die wichtigsten davon werden im Folgenden kurz dargestellt.

Die Typgenehmigung von Elektrofahrzeugen in der Europäischen Union wird durch die Verordnungen (EU) 2018/858 und (EU) 2019/2144 geregelt. Darüber hinaus finden sich relevante Regelungen zur Herstellung

und dem Recycling von Lithium-Ionen-Batterien in der EU-Batterieverordnung 2023/1542. Ergänzend dazu definiert die zentrale UNECE-Regelung Nr. 100 sicherheitstechnische Anforderungen für elektrisch betriebene Fahrzeuge, einschließlich der Sicherheit des Fahrers und der Batterietechnologie.

In Deutschland regelt die Ladesäulenverordnung (LSV) den Betrieb und die Nutzung öffentlich zugänglicher Ladepunkte für Elektrofahrzeuge, indem sie technische Standards und eine diskriminierungsfreie Nutzung vorschreibt. Verpflichtungen von Ladepunkten-Betreiber umfassen eine Registrierung und die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit, um eine zuverlässige und zugängliche Ladeinfrastruktur zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang spielt auch die Normenreihe ISO 15118 eine wichtige Rolle, weil sie die Schnittstelle zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation definiert. Diese Norm wird von vielen Akteuren der Branche unterstützt.³⁹



Foto © Stefan Dinse / Shutterstock

37 Köllner (2024).

38 NOW (2022b).

39 FFE (2023).

2.3 Förderungen und Subventionen

Die zentrale Grundlage für die Förderung von **Wasserstoff** in Deutschland ist die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS), die im Jahr 2020 ins Leben gerufen wurde und 38 Maßnahmen umfasst, welche dem Ziel dienen, Wasserstoff als Schlüsselfaktor der Energiewende zu etablieren.⁴⁰ Im Juli 2023 wurde die Strategie aktualisiert, um den gestiegenen Anforderungen der Klimaneutralität und den veränderten geopolitischen Rahmenbedingungen gerecht zu werden. Besonders hervorgehoben wird dabei die Bedeutung von Wasserstoff in der Industrie und im Schwerlastverkehr. Darüber hinaus wurde das Ziel für die Elektrolysekapazität bis 2030 von 5 auf 10 Gigawatt angehoben.⁴¹

Neben der NWS wird die Förderung von Wasserstofftechnologien durch eine Vielzahl von weiteren politischen Instrumenten unterstützt. Nach Kern⁴² lassen sich diese Instrumente seit 2016 in 57 regulatorische, finanzielle und „weiche“ Maßnahmen unterteilen. Mehr als die Hälfte dieser Instrumente sind finanzielle Förderprogramme⁴³, wie etwa das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II), das vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) mit 1,4 Milliarden Euro finanziert worden ist. Auf europäischer Ebene ist das 8 Milliarden Euro umfassende Important Projects of Common European Interest (IPCEI) ein besonders bedeutendes Förderprogramm, das die Finanzierung von 62 Wasserstoffprojekten entlang der gesamten Wertschöpfungskette unterstützt.⁴⁴ Insgesamt konzentriert sich die Förderung in Deutschland stark auf den Verkehrssektor, einschließlich Anwendungen im Straßenverkehr, Schienenverkehr, in der Schifffahrt und im Luftverkehr.⁴⁵

Im Vergleich dazu ist die Förderung von **E-Fuels** in Deutschland weniger umfangreich, was u.a. auf die unklare Rolle von E-Fuels im Kontext der Klimawende zurückzuführen ist. Trotzdem wurden in den letzten Jahren verschiedene Initiativen gestartet. Im Jahr 2023 förderte die Bundesregierung nach eigenen Angaben über 426 Projekte im Zusammenhang mit E-Fuels mit einem Gesamtvolumen von 369 Millionen Euro.⁴⁶ Mit ihrer „Wachstumsinitiative“ hat die Bundesregierung rückwirkend ab dem 1. Juli 2024 zudem eine „Sonderabschreibung für neu zugelassene vollelektrische und vergleichbare Nullemissionsfahrzeuge“ angekündigt, die bis Ende 2028 gelten soll. Darü-

ber hinaus sollen Kraftfahrzeuge, die ausschließlich mit E-Fuels betrieben werden, steuerlich den Elektroautos gleichgestellt werden, insbesondere in Bezug auf die Kfz-Steuer und die Dienstwagen-Besteuerung.⁴⁷ Ein prominentes Leuchtturmprojekt für die Förderung von E-Fuels ist die Errichtung eines Forschungszentrums für synthetische Kraftstoffe durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Leuna. Diese Anlage, die als die weltweit größte Forschungsanlage für E-Fuels gilt, wird mit über 400 Millionen Euro gefördert.⁴⁸

Die Förderung der **Elektromobilität** in Deutschland umfasst mehrere Instrumente und Strategien und hat sich in den letzten Jahren erheblich verändert. Besonders hervorzuheben ist der sogenannte Umweltbonus, der seit 2016 den Kauf oder das Leasing von Elektroautos und Plug-in-Hybriden subventionierte. Dieser Bonus wurde jedoch im Dezember 2023 vorzeitig eingestellt. Insgesamt wurden durch den Umweltbonus 2,23 Millionen Elektrofahrzeuge mit einem Volumen von über 10 Milliarden Euro gefördert.⁴⁹

Trotz des Endes dieser Maßnahme gibt es weiterhin verschiedene Vorteile für Besitzer von Elektrofahrzeugen, die ein E-Kennzeichen führen. So ermöglicht das E-Kennzeichen in diversen Städten kostenloses Parken sowie die Nutzung von Bus- und Sonderspuren. Außerdem ist es häufig Voraussetzung, um an speziellen Ladesäulen parken zu dürfen. Dieses Kennzeichen wird an rein elektrische Fahrzeuge und Plug-in-Hybride mit einer elektrischen Reichweite von mindestens 40 Kilometern oder einem CO₂-Ausstoß von weniger als 50 g/km vergeben.⁵⁰ Zudem profitieren die Besitzer von Elektrofahrzeugen weiterhin steuerlich: Fahrzeuge, die bis zum 31. Dezember 2030 die Erstzulassung erhalten, sind für zehn Jahre von der Kfz-Steuer befreit. Danach zahlen sie nur die Hälfte des regulären Steuersatzes.⁵¹

Die Bundesregierung investiert außerdem in den Ausbau der Ladeinfrastruktur. Durch das Projekt „Deutschlandnetz“ sollen bis 2025 über 9000 Schnellladepunkte an zentralen Verkehrspunkten entstehen, sodass ein umfassendes Netz entsteht, durch welches durchschnittlich alle zehn bis 15 Kilometer eine Möglichkeit zum Laden besteht.⁵²

40 BMWK (2020).

41 Heilmaier (2023).

42 Kern et al. (2023: 9).

43 Ebd. (12).

44 BMWK (2024c).

45 Kern et al. (2023: 16).

46 Bundestag (2023).

47 Bundesfinanzministerium (2024).

48 Neubert et al. (2024).

49 Gerhäuser & Kroher (2024).

50 BMWK (2024d).

51 Paulsen (2024).

52 Freiwah (2024).

3. GEGENWÄRTIGE INFRASTRUKTUREN UND VERSORGUNGSKETTEN

Alternative Antriebsstoffe und Technologien erfordern robuste Infrastrukturen und funktionierende Versorgungsketten. In diesem Kapitel werden bestehende Strukturen analysiert, einschließlich der Herausforderungen

und Potenziale in Bezug auf Produktion, Transport und Distribution von Wasserstoff, E-Fuels und Strom. Zudem wird die Bedeutung internationaler Zulieferungsketten hervorgehoben.

3.1 Versorgungsketten und internationale Zulieferungsketten

Der Aufbau und die Skalierung von Versorgungsketten für **Wasserstoff** stellen zentrale Herausforderung für die Energiewende dar, insbesondere für den angestrebten Übergang zu grünem Wasserstoff. Die Etablierung einer umfassenden Wasserstoffinfrastruktur setzt neben dem Ausbau der erneuerbaren Energiequellen auch die Entwicklung von Elektrolysekapazitäten und die Einrichtung entsprechender Transport- und Speichernetzwerke voraus. Bei diesem alle Stufen der Wertschöpfungskette umfassenden Unterfangen ergeben sich zahlreiche technische und organisatorische Herausforderungen.⁵³

Da noch weitestgehend unsicher ist, wo sich Produktionsstandorte für Elektrolyseanlagen konzentrieren werden und wie sich deren Umweltverträglichkeit ausgestalten wird, sind langfristige Planungen äußerst schwierig. Die bestehenden Produktionsanlagen in Deutschland wurden bisher überwiegend aus politischen oder forschungsseitigen Gründen gewählt, was eine Bewertung ihrer kommerziellen Eignung und der Umweltauswirkungen erschwert.⁵⁴ Schwerz, Meub & Proeger sprechen dazu passend von Wasserstoff-„Inseln“, womit sie fragmentierte Produktionsstandorte meinen, die primär lokale Abnehmer bedienen und kaum darüber hinaus integriert sind.⁵⁵ Verschiedene Transport- und Nutzungsmöglichkeiten für Wasserstoff und seine Derivate erfordern zudem angepasste Technologien, die teilweise erst noch entwickelt und standardisiert werden müssen.⁵⁶

Der Transport von Wasserstoff über längere Distanzen jenseits der genannten „Inseln“ ist eine weitere Herausforderung. Hierbei stehen verschiedene Optionen zur Verfügung, wie der Transport per Pipeline oder Schiff. Pipelines sind technisch erprobt und werden bereits

regional, etwa im Ruhrgebiet, eingesetzt.⁵⁷ Der Seeverkehr, insbesondere für den Transport von verflüssigtem Wasserstoff, stellt eine alternative Methode dar, und könnte nach Experteneinschätzungen bei Transportdistanzen von über 2.000 Kilometern kostengünstiger als Pipelines sein.⁵⁸

In Deutschland wird das bereits im vorigen Kapitel erläuterte Wasserstoff-Kernnetz, welches bis 2032 alle Bundesländer miteinander verbinden soll, eine zentrale Rolle für den Transport spielen. Auf lokaler Ebene wird die Region Lausitz nach aktuellen Planungen jedoch nur schrittweise an das Wasserstoffkernnetz angeschlossen. Es wird laut dem Versorger „Sachsennetze“ bis 2044 dauern, bis eine Pipeline in der sächsischen Lausitz verlegt ist. Im Gegensatz dazu soll in Brandenburg bis 2032 eine neue Wasserstoffleitung vom Süden Berlins bis zum Industriepark Schwarze Pumpe in der Oberlausitz verlegt werden.⁵⁹ Der Fernleitungsnetzbetreiber Ontras plant darüber hinaus ein Wasserstoff-Kernnetz in Mitteldeutschland, das etwa 600 km umfassen soll und größtenteils auf bestehenden Erdgasleitungen aufbaut, die auf Wasserstoff umgestellt werden. Dieses Netz soll den Raum Leipzig, das mitteldeutsche Chemiedreieck, Sachsen-Anhalt, Niedersachsen, den Berliner Raum und den Industriebogen Meißen verbinden.⁶⁰ Die Etablierung eines europäischen Wasserstoffnetzes, das ebenso wie das deutsche Kernnetz teilweise auf bestehenden Erdgasleitungen aufbauen könnte, soll einen großflächigen Transport von Wasserstoff innerhalb Europas ermöglichen. Erste Pläne für solch ein umfassendes Pipeline-Netzwerk wurden bereits entworfen, etwa das European Hydrogen Backbone (EHB), das die europäischen Wasserstoffmärkte miteinander verbinden soll.⁶¹

53 Badelt (2024: 99-100).

54 Ebd. (102).

55 Schwerz, Meub & Proeger (2022: 1).

56 Westphal et al. (2023: 3-4).

57 Niepelt et al. (2021: 45).

58 Ebd. (45-46).

59 Kunoth (2024).

60 Ebd.

61 Graf et al. (2023: 2-6).

Die internationale Produktion und Transport auch über Europa hinaus sind angesichts der im vorigen Kapitel dargestellten starken Importabhängigkeit Deutschlands besonders relevant. Regionen mit hohem Potenzial für erneuerbare Energien, wie Teile Südamerikas, Afrikas oder die MENA-Region, könnten in Zukunft wichtige Exporteure von grünem Wasserstoff werden. Allerdings muss dabei sichergestellt werden, dass die Erzeugung nicht in Konflikt mit der lokalen Wasserversorgung oder dem Schutz empfindlicher Ökosysteme gerät, und hinreichend politische, rechtliche sowie soziale Stabilität für eine verlässliche Produktion gegeben sind.⁶²

Wie bereits im vorigen Kapitel angedeutet, sind die Versorgungs- und Produktionsketten von **E-Fuels** noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium, sodass synthetische Kraftstoffe bislang kaum kommerziell verfügbar sind. Gegenwärtig existieren nur wenige Anlagen weltweit zu Forschungs- und Demonstrationszwecken.⁶³ Prominentere Beispiele sind etwa das Energy Lab 2.0 des Karlsruher Instituts für Technologie, oder die Anlage „Haru Oni“ im chilenischen Patagonien mit einer äußerst geringen Produktionskapazität von bis zu 350 Litern E-Fuels täglich.⁶⁴

Nach Ueckerdt & Odenweller sind bis 2035 weltweit ca. 60 neue Projekte zur E-Fuels-Produktion im industriellen Maßstab angekündigt.⁶⁵ Jedoch haben zum Zeitpunkt ihrer Studie nur rund 1 Prozent dieser Projekte eine finale Investitionsentscheidung erzielen können, was die starken Unsicherheiten, die die Entwicklung von Versorgungs- und Produktionsketten hemmen, demonstriert.⁶⁶

Insofern die Produktion von E-Fuels in der Zukunft ansteigt, sind in der Logistik und dem Transport ähnliche Herausforderungen wie beim Wasserstoff zu erwarten. Die geografische Verteilung der E-Fuels-Produktionsanlagen, oft in abgelegenen Regionen mit günstigen Produktionsbedingungen wie etwa Patagonien, erfordert den Aufbau effizienter Transportinfrastrukturen, um die produzierten E-Fuels zu den Verbrauchermärkten zu bringen. Lösungen für diese logistischen Herausforderungen beinhalten die Entwicklung von spezialisierten Transportnetzen sowie die Integration der E-Fuels in bestehende Versorgungssysteme. Die wirtschaftliche und

technologische Machbarkeit dieser Maßnahmen bleibt jedoch ein kritischer Punkt.

Der Übergang zur **Elektromobilität** bringt signifikante Veränderungen in Produktion und Logistik der Automobilindustrie mit sich. Hinsichtlich der Wahl von Produktionsstandorten wird die Nähe zu wachsenden Märkten und Rohstoffquellen wichtiger. Neben der aufwendigen Modernisierung bestehender Standorte zum Zweck der Produktion von Elektrofahrzeugen setzen Hersteller auch vermehrt auf spezialisierte Greenfield-Werke, wie etwa die „Factory 56“ von Mercedes-Benz und das Projekt Trinity von Volkswagen.⁶⁷

Ähnlich wie bei den Produktionsstandorten verändert sich auch die Art und Weise, wie Fahrzeuge konzipiert werden, wesentlich. Während anfangs das „Conversion Design“ dominierte, das bestehende Fahrzeugarchitekturen für Elektroantriebe anpasste, setzt sich zunehmend das „Purpose Design“ durch, das Fahrzeuge von Grund auf für den elektrischen Antrieb entwickelt. Dies erfordert neue Produktionsprozesse und größere Investitionen, eröffnet aber auch mehr Innovationspotenzial.⁶⁸

Besonders die Herstellung von Batterien entwickelt sich dynamisch, was kontinuierliche Anpassungen der Produktionsprozesse erfordert. Um die Abhängigkeit von asiatischen Zulieferern zu verringern, treiben europäische Hersteller ihre lokale Batteriezellproduktionen voran. Diese Entwicklung könnte bis 2030 bis zu 100.000 neue Arbeitsplätze schaffen, was den durch Elektromobilität verursachten Rückgang in der konventionellen Fahrzeugproduktion teilweise kompensieren würde.⁶⁹

Der Rohstoffbedarf für Elektrofahrzeuge, insbesondere für Batterien, unterscheidet sich wesentlich von herkömmlichen Fahrzeugen. Dies führt zu Verschiebungen in den Strukturen globaler Lieferketten, wobei Länder mit großen Vorkommen an Lithium, Kobalt, Nickel und Grafit wirtschaftlich an Bedeutung gewinnen. Der Wettbewerb um diese Rohstoffe ist intensiv, und die Erschließung der Ressourcen nimmt konstant zu.⁷⁰ Ihr Abbau führt oft zu erheblichen ökologischen und sozialen Herausforderungen, insbesondere in Entwicklungsländern wie der Demokratischen Republik Kongo.⁷¹

62 Niepelt et al. (2021: 43).

63 Neuling & Berks (2023: 23).

64 Ueckerdt & Odenweller (2023: 1).

65 Ebd. (3).

66 Ebd.

67 Grimm & Pfaff (2022: 22-23).

68 Heimes et al. (2024: 35-37).

69 Beutler et al. (2021: 9).

70 Brunnengräber (2020: 279-281).

71 Fritz et al. (2023: 6-7).

3.2 Infrastruktur für alternative Antriebsstoffe

Die **Wasserstofftankinfrastruktur** in Deutschland befindet sich in einem Spannungsfeld zwischen ambitionierten Zielen und der Realität des Marktes. Trotz der Vorteile vieler Brennstoffzellenfahrzeuge, wie der hohen Reichweite und der schnellen Betankung, steht deren Verbreitung insbesondere aufgrund der begrenzten Anzahl von Wasserstofftankstellen vor erheblichen Herausforderungen.⁷²

Laut der umfassenden und regelmäßig aktualisierten Übersicht von H2stations.org gab es Ende 2023 weltweit 921 Wasserstofftankstellen, von denen sich 105 in Deutschland befinden.⁷³ Diese Zahl ist im Vergleich zur parallelen Entwicklung der Elektromobilität und deren Infrastruktur relativ niedrig. Besonders problematisch ist die fehlende Wirtschaftlichkeit vieler Wasserstoff-Tankstellen, die dazu führt, dass bestehende Infrastrukturen teilweise wieder abgebaut werden. So wurden in Deutschland 2024 mehrere Tankstellen, darunter in Koblenz und Wuppertal, geschlossen, da der Betrieb nicht mehr rentabel war. Dies führt zu einer weiteren Ausdünnung des ohnehin schon schwachen Netzes.⁷⁴ Dieser negative Trend beschränkt sich aber nicht nur auf Deutschland: auch bspw. in den USA und Großbritannien werden Wasserstofftankstellen wieder geschlossen, da sie wirtschaftlich nicht tragfähig sind.⁷⁵

Für den Schwerlastverkehr ergeben sich zusätzliche besondere Herausforderungen. Die spezifischen Anforderungen, wie der deutlich höhere Wasserstoffbedarf, erfordern eine dedizierte Infrastruktur. Gemäß den Berechnungen eines wissenschaftlichen Simulationsmodells wären bis 2050 etwa 140 Tankstellen entlang der Autobahnen und in Industrieregionen notwendig, um den Bedarf der Brennstoffzellen-Lkw zu decken.⁷⁶ Die Kosten für den Ausbau und Betrieb dieser Infrastruktur würden laut den Autoren ca. 9 Milliarden Euro jährlich betragen.

Erschwerend kommt zudem hinzu, dass in Abhängigkeit davon, ob Wasserstoff flüssig oder gasförmig gespeichert wird, unterschiedliche Betankungstechnologien eingesetzt werden, die keine Kompatibilität aufweisen.

Aufgrund der damit einhergehenden mangelnden Einheitlichkeit tut sich ein weiteres Hindernis für den Ausbau der Wasserstofftankinfrastruktur auf.⁷⁷

Ein Blick auf das Wasserstoff-Tankstellennetz in der Region Lausitz zeigt 5 Projekte, die sich aktuell in Planung befinden und sich im Raum Cottbus, Forst, Senftenberg und Spremberg konzentrieren.⁷⁸

E-Fuels können aufgrund ihrer herkömmlichen Kraftstoffe sehr ähnlichen Eigenschaften über das bereits bestehende Tankstellennetz verkauft werden.⁷⁹ Wie bereits in den vorigen Kapiteln erläutert, ist das kommerzielle Angebot an E-Fuels aber viel zu gering, um Tankstellen in hoher Anzahl damit auszustatten, sodass die tatsächliche Verfügbarkeit von E-Fuels an deutschen Tankstellen bisher in keinem nennenswerten Umfang gegeben ist.⁸⁰

Die Ladeinfrastruktur für **Elektrofahrzeuge** in Deutschland hat sich in den letzten Jahren erheblich entwickelt. Nach Angaben der Bundesnetzagentur waren im März 2024 insgesamt 103.226 öffentliche Normalladepunkte und 25.291 öffentliche Schnellladepunkte in Betrieb.⁸¹ Zusammengenommen ermöglichen diese Ladepunkte eine Ladeleistung von 4,52 Gigawatt. Durch das bereits im vorigen Kapitel genannte, von der Bundesregierung initiierte Projekt „Deutschlandnetz“ dürfte die Anzahl der öffentlichen Ladepunkte auch in naher Zukunft weiter steigen.

Mit Blick spezifisch auf die Lausitz-Region zeigt sich ein vergleichsweise lückenhaftes Netz an öffentlichen Ladepunkten.⁸² Im Landkreis Spree-Neiße gibt es laut der Bundesnetzagentur mit Stand März 2024 45 Ladesäulen, im Landkreis Elbe-Elster 32, im Landkreis Dahme-Spreewald 88, im Landkreis Oder-Spree 609, im Landkreis Görlitz 101, im Landkreis Bautzen 147, im Landkreis Oberspreewald-Lausitz 42, und in der Kreisfreien Stadt Cottbus 38.⁸³ Es muss bei diesen Zahlen allerdings bedacht werden, dass das Laden von Elektrofahrzeugen am häufigsten an Arbeitsplätzen oder am Wohnort über Wallboxen stattfindet.⁸⁴ Diese werden auch mitunter

72 Tschinibaew et al. (2024: 18).

73 LBST (2024).

74 Soller (2024).

75 Ebd.

76 Rose et al. (2020: 1).

77 H2 Mobility (2021: 14).

78 H2 Stations (2024).

79 Müller-Görnert (2023).

80 Ebd.

81 Bundesnetzagentur (2024)

82 Ebd.

83 Ebd.

84 Wolff (2024).

von Kommunen genutzt.⁸⁵ Rettungsdienste und Feuerwehren mit batterieelektrischen Fahrzeugen greifen ebenfalls oft auf Ladeinfrastruktur zurück, die direkt auf der Wache oder an Notaufnahmen installiert werden, wie im späteren Kapitel zu realen Nutzungsfällen ersichtlich werden wird. Ein Grund hierfür ist auch, dass öffentliche Ladepunkte oftmals nicht die nötigen Kapazitäten aufweisen, um schwerere Fahrzeuge im Rettungswesen, in der Feuerwehr oder im Katastrophenschutz

mit vertretbarem zeitlichem Aufwand aufzuladen. Inwiefern bestehende Feuerwehr- bzw. Rettungswachen baulich nachgerüstet werden können, um ein lokales Laden von Einsatzfahrzeugen in angemessener Zeit zu ermöglichen, und welche spezifischen Herausforderungen dabei auftreten, wird ebenfalls im späteren Kapitel zu realen Nutzungsfällen näher im Detail betrachtet.

4. PREISENTWICKLUNG UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

Die wirtschaftliche Attraktivität alternativer Antriebe spielt eine entscheidende Rolle für ihre breite Akzeptanz und Einführung. Dieses Kapitel beleuchtet die Preisentwicklungen von Wasserstoff, E-Fuels und Strom und

führt eine vergleichende Analyse der Total Cost of Ownership (TCO) für verschiedene Fahrzeugtypen durch. Es wird aufgezeigt, welche Faktoren die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der Technologien beeinflussen.

4.1 Preisentwicklungen der Energieträger

Die Preise für **Wasserstoff**, vor allem für grünen Wasserstoff, lagen und liegen deutlich höher als die für fossile Energieträger.⁸⁶ Während die Herstellungskosten für grünen Wasserstoff im Jahr 2023 in Deutschland ca. 6 bis 8 Euro pro Kilogramm betragen⁸⁷, schwanken sie im August 2024 gemäß dem tagesaktuellen Preisindex Hydex ca. zwischen 3 bis 6 Euro je Kilogramm.⁸⁸ Wasserstoff als direkt kaufbarer Treibstoff für Fahrzeuge an entsprechenden Tankstellen bewegte sich zum selben Zeitpunkt ca. zwischen 13 und 18 Euro pro Kilogramm.⁸⁹

In der nahen Zukunft könnten die Preise für Wasserstoff aufgrund Fortschritte in der Technologie der Elektrolyse bedeutend sinken.⁹⁰ Die Preisentwicklung wird jedoch durch diverse Faktoren beeinflusst, die präzise Prognosen erschweren. Insbesondere das Anwachsen der globalen Nachfrage dürfte ein Preistreiber sein, dessen Ausmaß noch nicht genau abzuschätzen ist.⁹¹

Preislich wettbewerbsfähig kann grüner Wasserstoff auf kurze Sicht nur in vereinzelt Bereichen werden, vor allem unter Berücksichtigung der Kosten für Trans-

port und weltweiter Markttendenzen. Langfristig betrachtet und unter der Annahme einer kontinuierlichen Preissteigerung fossiler Energieträger hat grüner Wasserstoff das Potenzial, insbesondere in der schweren Industrie und ähnlicher Branchen vermehrt eingesetzt zu werden.⁹² Nichtsdestotrotz wäre grüner Wasserstoff nach aktuellem Trend der CO₂-Preise auch im Jahr 2030 Schätzungen zufolge ca. doppelt so teuer wie grauer oder blauer Wasserstoff, sofern keine weiteren Förderungen eingeführt werden.⁹³ Hieraus wird ersichtlich, wie relevant politische Rahmenbedingungen und Vorgaben für die Preisentwicklung sein werden. Allen voran als Antriebsstoff für Fahrzeuge wird es dem Wasserstoff laut Einschätzung diverser Experten nur dann möglich sein, sich gegen die voraussichtlich günstigere Alternative der Elektromobilität durchzusetzen, wenn die Preise stärker als aktuell ersichtlich sinken.⁹⁴

Die Herstellung von **E-Fuels** kostet gegenwärtig schätzungsweise zwischen 2,20 und 4,80 Euro pro Liter und damit deutlich mehr als fossile Kraftstoffe.⁹⁵ Das macht E-Fuels momentan nicht wettbewerbsfähig. Allerdings

85 Hoh (2023).

86 Witsch (2023).

87 Doucet et al. (2023).

88 E-Bridge (2024).

89 H2 (2024).

90 Clausen (2022).

91 Wietschel et al. (2023a).

92 Görlach et al. (2023).

93 Clausen (2022: 24); Sacht (2024).

94 Wietschel et al. (2023a: 26).

95 Wietschel et al. (2023b: 6).

ist es laut Prognosen möglich, dass die Herstellungskosten infolge von technologischem Fortschritt und Skalierungseffekten 2050 auf ca. 1 bis 3 Euro pro Liter sinken könnten.⁹⁶ Zusätzliche, aktuell noch schwer vorhersehbare Faktoren wie Steuern, Vertriebskosten und Ausgaben für Forschung könnten diese Kosten neben den geringen Produktionskapazitäten allerdings noch steigern.

Preisangaben für E-Fuels als kaufbarer Treibstoff an Tankstellen sind aufgrund des kaum existenten Markts äußerst schwierig und nur schätzungsweise möglich. Oft werden aktuelle Preise zwischen rund 4,50 und 10 Euro pro Liter angegeben⁹⁷, wobei mittel- und langfristige Prognosen aufgrund des noch sehr frühen Entwicklungsstadiums und Ungewissheit bei den Herstellungskosten weit auseinandergehen.⁹⁸

Die Preisentwicklung der Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen ist neben den (deutlich sinkenden) Anschaffungspreisen ein zentraler Aspekt für ihre Marktdurchdringung.⁹⁹ In Deutschland ist insbesondere das

Laden an öffentlichen Ladesäulen oftmals teurer als das Tanken fossiler Antriebsstoffe. Laut einer Studie von Statista und LichtBlick von Anfang 2024 lag der Durchschnittspreis für eine Kilowattstunde (kWh) an Normal-Ladepunkten bei 54 Cent, bei Schnellladepunkten bei 64 Cent.¹⁰⁰ Gemäß dieser Preise würden für 100 gefahrene Kilometer bei einem Verbrauch von 20 kWh 10,85 Euro (Normal-Ladepunkt) bzw. 12,88 Euro (Schnell-Ladepunkt) anfallen, während es bei einem Verbrenner 10,38 Euro wären.¹⁰¹

Aus dem Vorangegangenen wird ersichtlich, dass die Ladepreise eine Herausforderung für die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen sind, wobei bedacht werden sollte, dass das Laden an nicht-öffentlichen Ladestationen, z.B. Wallboxes, oftmals deutlich günstiger ist.¹⁰² Langfristig werden sich die Ladekosten u.a. abhängig von Stromkosten und Erzeugungskapazitäten regenerativer Energien insgesamt entwickeln, welche sich nach einschlägigen Prognosen in den kommenden Jahren mit leichten Schwankungen stabilisieren bzw. moderat steigen werden.¹⁰³

4.2 Wirtschaftliche Analyse

Die aktuellen Entwicklungen in den Bereichen Elektromobilität, Wasserstoff und E-Fuels haben weitreichende Auswirkungen auf die Kostenstrukturen und die Total Cost of Ownership (TCO) der verschiedenen Fahrzeugtypen. Die TCO-Betrachtung umfasst sämtliche Kosten, die über den Lebenszyklus eines Fahrzeugs anfallen. Dazu zählen u.a. Anschaffungskosten, Energiekosten, Wartung, Reparaturen, Steuern und Versicherungen. Im Vergleich der drei alternativen Antriebstechnologien – Wasserstoff, E-Fuels und Elektromobilität – zeigen sich deutliche Unterschiede.

Wasserstofffahrzeuge weisen derzeit sehr hohe TCO auf. Zusätzlich zu den hohen Anschaffungskosten sind insbesondere die Preise für Wasserstoff als Treibstoff ein wesentlicher Faktor. Laut einer Studie des Öko-Instituts müssten die Wasserstoffpreise an der Tankstelle auf etwa 3 Euro pro Kilogramm sinken, um

wirtschaftlich konkurrenzfähig zu sein.¹⁰⁴ Diese Preisenkung ist jedoch in naher Zukunft nicht realistisch, wie im vorigen Unterkapitel dargelegt wurde. Für den Schwerlastverkehr ergeben sich ähnliche Herausforderungen. Während für batterieelektrische Lkw bis 2030 oft ein Kostenvorteil gegenüber anderen Antriebsformen prognostiziert wird, bleibt der wirtschaftliche Einsatz von Wasserstoff-Lkw lediglich unter sehr optimistischen Annahmen möglich.¹⁰⁵

Mit E-Fuels betriebene Fahrzeuge haben einen vielfach höheren Energieverbrauch als Elektrofahrzeuge, was sich auch in bedeutend höheren TCO zeigt.¹⁰⁶ Die Betriebskosten eines durch E-Fuels angetriebenen Fahrzeugs würden auch in einem optimistischen Szenario im Jahr 2030 deutlich höher sein als für elektrische Fahrzeuge.¹⁰⁷ Spezifisch bei Nutzfahrzeugen zeigt eine Analyse 47 % höhere Kosten bis 2035 für einen mit E-Diesel

96 Götz et al. (2024).

97 Holdenried (2022).

98 Uniti (2020); T&E (2023).

99 Heimes et al. (2024: 30).

100 LichtBlick (2024).

101 Ebd.

102 Ebd.

103 Boysen-Hogrefe et al. (2023); Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose (2024); Bundesbank (2024).

104 Matthes et al. (2021: 50).

105 Jöhrens et al. (2022: 7).

106 T&E (2021).

107 Krajinska (2021).

betriebebenen Lkw im Vergleich mit einem batterieelektrischen Lkw.¹⁰⁸ Daraus wird ersichtlich, dass E-Fuels aufgrund der hohen Betriebskosten voraussichtlich nicht konkurrenzfähig sind.

Elektromobilität stellt im Vergleich zu Wasserstoff und E-Fuels derzeit die wirtschaftlichste Antriebsoption dar. Die TCO von E-Fahrzeugen sinken beständig, u.a. auch aufgrund von staatlichen Förderungen und der THG-Quote.¹⁰⁹ Auch wenn sie oftmals teurer in der Anschaffung sind, erreichen bestimmte batterieelektrische Fahrzeugtypen schon nach einigen Jahren die Kostengleichheit mit konventionellen, durch fossile Treibstoffe angetriebenen Fahrzeugen, auch aufgrund von geringerem Verschleiß.¹¹⁰ Wenn das Elektrofahrzeug überwiegend an öffentlichen Ladestationen geladen wird, entstehen jedoch deutlich höhere Energiekosten, die sich negativ auf die TCO auswirken.¹¹¹

Die weitere Entwicklung der Total Cost of Ownership wird maßgeblich von der Kostenentwicklung der alternativen Antriebsstoffe und der erforderlichen Infrastruktur abhängen. Spezifisch bei Nutzfahrzeugen könnten Wasserstofffahrzeuge langfristig im Vorteil sein, weil sie oft längere Nutzzeiten und geringere Wartungskosten aufweisen.¹¹² Nichtsdestotrotz bleibt die Elektromobilität aufgrund der bereits vorhandenen Kostenvorteile und der fortschreitenden Marktdurchdringung aus Perspektive der TCO die wirtschaftlichste Option. Zu bedenken ist hierbei allerdings, dass spezifische Kostenstrukturen, die für Nutzfahrzeuge entstehen, die im Rettungswesen, bei der Feuerwehr und im Katastrophenschutz eingesetzt werden, noch nicht vollständig absehbar sind, weil umfassende Erfahrungswerte etwa zur Lebensdauer und Wartungskosten dieser relativ neuen Fahrzeuge fehlen (siehe auch nächstes Kapitel).

108 Molliere (2022).

109 Fraunhofer ISI (2023).

110 Basma & Rodriguez (2023).

111 Ebd.

112 Mayr et al. (2021: 7).





5. ANWENDUNGSFÄLLE UND LESSONS LEARNED

Im Folgenden wird eine Übersicht und Diskussion von weltweiten Anwendungsfällen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebsformen im Rettungswesen, Feuerwehr und Katastrophenschutz gegeben. Dabei liegt der Fokus auf für die Praxis relevante technische Details und, sofern verfügbar, erste Erfahrungen und Bewertungen, die in Medienartikeln oder offiziellen Berichten erschienen sind und Orientierung geben können für den Einsatz alternativer Antriebsstoffe in der Lausitz und darüber hinaus. Die Anwendungsfälle wurden durch eine systematische Suche in akademischen Literaturdatenbanken sowie in aktueller Berichterstattung von Fachmedien erfasst. Außerdem wurden sie durch Fachgespräche

der Projektpartner mit Herstellern und Anwendern ergänzt. Da aufgrund von Sprachbarrieren nur mit deutschen und englischen Suchbegriffen recherchiert wurde, fokussieren sich die folgenden Sammlungen an Anwendungsfällen naturgemäß auf Beispiele aus dem deutsch- und englischsprachigen Raum. Auch konnten nur solche Anwendungsfälle erfasst werden, die öffentlich kommuniziert wurden – es ist davon auszugehen, dass es weitere Anwendungsfälle gibt, die nicht medienwirksam kommuniziert wurden und im Rahmen dieser Studie nicht erfasst werden konnten. Es wurden außerdem keine Anwendungsfälle von Fahrzeugen mit E-Fuel als genutzten Antriebsstoff gefunden.

5.1 Nutzung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen

Die Nutzung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen im Rettungswesen und bei der Feuerwehr steckt noch in den Kinderschuhen. Lediglich acht Dienststellen und Sonderprojekte, die solche Fahrzeuge nutzen bzw. testen, konnten weltweit bei den Recherchen für die vorliegende Studie erfasst werden.

Eines der wenigen prominenten Beispiele ist das „H2Rescue“-Fahrzeug, ein Prototyp für Katastropheneinsätze in den USA, das im Sommer 2023 vorgestellt wurde. Es ist darauf ausgelegt, Wärme, Wasser und Strom in Katastrophengebieten für bis zu 72 Stunden ohne Nachfüllen des Treibstoffs bereitzustellen. Die bisherigen Tests

verliefen erfolgreich. Obwohl das Fahrzeug noch in der Prototypenphase ist, demonstriert es die Möglichkeit der Integration von Wasserstoff in großflächigen Notfalleinsätzen, indem es autark Energieversorgung und Unterstützung in Krisensituationen bietet.

Auffällig ist bei weiteren Beispielen, dass viele Fahrzeuge in einer Umgebung eingesetzt werden, in welchen die Distanzen zu Wasserstofftankstellen nicht allzu weit sind. So werden in Yorkshire (UK) drei HyTIME-Unterstützungswagen im Rettungswesen eingesetzt, die sich laut Medienberichten in unmittelbarer Nähe zu Wasserstofftankstellen befinden. Auch ein Hyundai NEXO, der als

Tabelle 1: Nutzung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen.

Fahrzeug	Anwendungsfall	Ort	Einführung	Range-Extender
HyTIME	Zwei Unterstützungswagen im Rettungswesen	Yorkshire, UK	März 2018	ja
FCEV mobile Klinik	Rettungswagen (medizinische Versorgungsleistungen, Stromversorgung nach Katastrophe)	Kumamoto, Japan	Sommer 2021 (Prototyp)	nein
H2Rescue	Katastropheneinsatzfahrzeug (Wärme, Wasser, und Stromversorgung in Katastrophengebiet bis zu 72 Stunden ohne Nachfüllen von Treibstoff)	USA	Sommer 2023 (Prototyp)	nein
Renault Kangoo	Feuerwehr-Unterstützungswagen	La Manche, Frankreich	2015	k.A.
Toyota Mirai	Vier Feuerwehr ELW Erkunder	Berlin, Deutschland	Juni 2020	nein
Hyundai NEXO	Zwei Feuerwehr-Kommandowagen	Nörvenich, Deutschland	Dezember 2020	nein
Hyundai NEXO	Feuerwehr-Kommandowagen	Siegen, Deutschland	April 2021	nein
Hyundai NEXO	Zwei Feuerwehr-Kommandowagen	Shell Energy and Chemicals Park Rheinland, Deutschland	Mai 2023	nein

Feuerwehr-Kommandowagen in Siegen seit April 2021 verwendet wird, kann an einer Wasserstofftankstelle im Leimbachtal direkt bei Siegen betankt werden. Ebenso wird ein weiterer NEXO im Shell Energy and Chemicals Park Rheinland als Kommandowagen eingesetzt und kann direkt mit dem betriebseigenen Wasserstoff versorgt werden. Gleichmaßen verfügt auch der Toyota Mirai, der bei der Berliner Feuerwehr als Erkundungsfahrzeug genutzt wird, über naheliegende Wasserstofftankstellen in der Hauptstadt. In Regionen, in denen Wasserstofftankstellen nicht oder nur in weiter Entfernung erreichbar sind, werden trotz ihrer großen Reichweite kaum wasserstoffbetriebene Fahrzeuge eingesetzt. Dies

verdeutlicht die Relevanz der Wasserstofftankstellen-Infrastruktur als Hemmfaktor oder aber Ermöglicher für den Einsatz von Wasserstoff-Fahrzeugen im Rettungsdienst, bei der Feuerwehr und im Katastrophenschutz.

Unter den acht Anwendungsfällen waren für vier Erfahrungsberichte verfügbar, die überwiegend positiv ausfielen, allerdings kaum ins Detail gehen und aufgrund des Prototyp-Status und vergleichsweise kurzer Einsatzzeit vieler der Fahrzeuge nur begrenzt aussagekräftig sind.

Höchstgeschwindigkeit	Reichweite	Erfahrungen
k.A.	Ca. 322 km mit Wasserstoff, ca. 100 km zusätzlich elektrisch	Die Wagen wurden von den Fahrern bisher positiv bewertet. Alle drei Modelle sind in unmittelbarer Nähe einer Wasserstofftankstelle im Einsatz. ¹¹³
100 km/h	210 km	k.A.
k.A.	290 km	Das Fahrzeug wurde 2023 vorgestellt und 2024 weiter präsentiert. Trotz Prototypenstatus sind Optimierungen geplant, und erfolgreiche Tests wecken Zuversicht. ¹¹⁴
k.A.	k.A.	k.A.
175 km/h	500 km	k.A.
177 km/h	756 km	Keine Tankstelle in unmittelbarer Umgebung, 20 km entfernt, allerdings soll Tankstelle gebaut werden. ¹¹⁵
177 km/h	756 km	Die bisherigen Erfahrungen sind positiv. Das Fahrzeug wird an der Wasserstofftankstelle im Leimbachtal betankt und weist laut Testern ein Fahrverhalten wie ein herkömmlicher Kommandowagen auf. ¹¹⁶
177 km/h	756 km	k.A.

¹¹³ Ryan (2018).

¹¹⁴ Wright (2024); Kantola (2024).

¹¹⁵ Feuerwehr-Magazin (2020).

¹¹⁶ Siegener Zeitung (2023).

5.2 Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen im Rettungswesen

In der Übersicht zu batterieelektrischen Fahrzeugen im Rettungswesen zeigt sich, dass sie bereits deutlich verbreiteter sind als ihre Wasserstoff-Pendants und in bestimmten Einsatzgebieten bereits erfolgreich genutzt werden, jedoch noch mit Einschränkungen in Bezug auf Reichweite und Ladeinfrastruktur kämpfen.

Die untenstehende Tabelle umfasst 22 Dienststellen, die batterieelektrische Rettungs- und Krankenwagen einsetzen und über Länder wie Japan, Großbritannien, Deutschland, den USA, der Schweiz und Australien gestreut sind. Die dokumentierten Fahrzeuge zeigen eine große Bandbreite an Typen und technischen Spezifikationen, die sich stark nach den Anforderungen des jeweiligen Einsatzortes richten. So variieren Reichweiten von 115 km (Helgoland) bis hin zu 450 km (Henan Costar Group in Usbekistan), was die unterschiedlichen Herausforderungen je nach geografischem Kontext verdeutlicht.

Die Ladezeiten (meist waren hier nur Herstellerangaben zu finden) sind ebenfalls sehr unterschiedlich. Während einige Fahrzeuge, wie der Johanniter Elektro-Krankenwagen in Deutschland, innerhalb von 40 Minuten für 80 % der Kapazität aufgeladen werden können, benötigen andere Modelle, wie der WAS e-RTW, im 50-kW-Modus 1,5 Stunden. Diese Ladezeiten beeinflussen die Flexibilität der Einsatzfahrzeuge erheblich, insbesondere in ländlichen Gebieten oder bei Notfallrettungen, bei denen schnelle Verfügbarkeit entscheidend ist.

Die bisherigen Erfahrungen mit batterieelektrischen Rettungsfahrzeugen sind gemischt. In einigen städtischen und klar eingegrenzten Gebieten, wie beispielsweise in London und auf der Insel Helgoland, hat sich der Einsatz als positiv erwiesen. So konnte der vollelektrische Rettungswagen auf Helgoland problemlos integriert werden, da die kurzen Strecken und die gute Ladeinfrastruktur den Anforderungen entsprechen. Auch die leisen Fahr-

Tabelle 2: Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen im Rettungswesen.

Fahrzeug	Anwendungsfall	Ort	Einführung	Range-Extender	Höchstgeschwindigkeit
NV400	Rettungswagen	Tokyo, Japan	Mai 2020	k.A.	k.A.
Electric Dual Crewed Ambulance (E-DCA)	Rettungswagen	West Midlands, UK	Oktober 2020	nein	75 km/h
Electric Vehicle Company (LEVC) VN5	Zwei Unterstützungswagen für das Rettungswesen	West Midlands, UK	April 2021	ja	k.A.
Johanniter Elektro-Krankenwagen	Krankenwagen	Schönebeck, Deutschland	August 2021	nein	120 km/h
e-RTW	Rettungswagen	Herford, Deutschland	Dezember 2021	nein	k.A.
HATS Fully Electric Ambulance	Rettungswagen	London, UK	2022	k.A.	k.A.

geräusche werden als Vorteil wahrgenommen, führten aber auch zur Installation eines akustischen Passantenwarners.

In weitläufigen ländlichen Regionen oder bei komplexen Notfalleinsätzen zeigen sich jedoch deutliche Einschränkungen. So wurde in Herford festgestellt, dass die Reichweite von 150 bis 200 km sowie die lange Ladezeit von 3,5 Stunden für Einsätze außerhalb der Stadtgrenzen unpraktisch sind. Ähnlich wird dies im Fall der West Midlands in Großbritannien beschrieben, wo die Reichweite von etwa 170 km für städtische Einsätze ausreicht, aber für ländliche Gebiete als problematisch angesehen wird.

Ein interessanter Punkt in dem Zusammenhang begrenzter Reichweiten ist die Integration von Reichweitenverlängerern (Range Extender), die bei einigen Modellen verwendet werden, um die Flexibilität zu erhöhen. So verfügt das Modell LEVC VN5 in den West Midlands über

eine Hybridlösung mit einer rein elektrischen Reichweite von ca. 98 km und einer Gesamtreichweite von ca. 489 km im Hybridmodus.

Ein herausstechendes Merkmal vieler gelisteter Nutzungsfälle ist außerdem, wie schon bei Wasserstoff, die starke Abhängigkeit von der Ladeinfrastruktur. Dies zeigt sich besonders bei Fahrzeugen, die in Regionen mit gut ausgebauten Ladepunkten eingesetzt werden, wie etwa im Klinikum Region Hannover, wo spezielle Ladepunkte für die elektrischen Krankenwagen eingerichtet wurden. In Gebieten ohne flächendeckende Ladeinfrastruktur, wie in weiten Teilen des ländlichen Raums, ist der Einsatz dieser Fahrzeuge deutlich eingeschränkter.

Ein weiterer auffälliger Punkt ist die Anpassung der Einsatzszenarien an die technischen Möglichkeiten der Fahrzeuge. In einigen Fällen werden die Fahrzeuge nur für planbare, nicht zeitkritische Transporte, wie den

Reichweite	Ladedauer	Erfahrungen
k.A.	k.A.	k.A.
169 - 177 km	4.25 Std.	Der Rettungswagen erreichte durchschnittlich 70 Meilen pro Ladung. Ein Bericht bezeichnete die Reichweite und Ladezeit als einschränkende Faktoren. Während 100 Meilen für den Betrieb in der Stadt Erdington ausreichen, ist diese Reichweite in ländlichen Gebieten unzureichend, da dort oft mehr als die doppelte Strecke pro Schicht zurückgelegt wird. ¹¹⁷
98 km (rein elektrisch), 489 (hybrid)	Ca. 4 Std.	k.A.
120 km	40 Min. für 80 %	Aufgrund der limitierten Reichweite, reduzierten Geschwindigkeit und einer Ladezeit von mindestens 40 Minuten für 80 % Batteriekapazität mit 80 kW DC-Ladung konzentrierte man sich zunächst auf die Nutzung als Krankenwagen statt als Rettungsfahrzeug. ¹¹⁸
150 bis 200 km	3,5 Std.	Laut Herfords Feuerwehrleiter ist der Rettungswagen nicht überzeugend. Innerhalb der Stadt sei der Einsatz möglich, aber für längere Strecken oder mehrere Einsätze in Folge sei die Reichweite von 150 bis 200 Kilometern und die Ladezeit von 3,5 Stunden nicht ausreichend. ¹¹⁹
k.A.	k.A.	Der Rettungswagen transportierte bereits über 250 Patienten, legte 1.400 Meilen zurück und sparte laut offiziellen Angaben 430 kg CO ₂ -Emissionen ein. Allerdings gab es einen Vorfall, bei dem der Rettungswagen kurz vor dem Krankenhaus aufgrund eines leeren Akkus liegen blieb. Der Pannendienst half schnell mit einer Notladung. ¹²⁰

117 Middleton (2024).

118 Electrified (2021).

119 Westfalen-Blatt (2022).

120 Original ADS (2022); Foster (2022).

Krankentransport, genutzt. So wird beispielsweise der Johanniter Elektro-Krankenwagen in Schönebeck aufgrund seiner begrenzten Reichweite und Geschwindigkeit bewusst nur im Krankentransport eingesetzt und nicht als Rettungsfahrzeug für Notfalleinsätze.

Die Sammlung an Anwendungsfällen zeigt, dass die Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen im Rettungswesen je nach Standort und Infrastruktur bereits erfolgreich umgesetzt wird, aber noch mit erheblichen Einschränkungen verbunden ist. Besonders in städ-

tischen Gebieten, wo kurze Strecken und eine dichte Ladeinfrastruktur gegeben sind, können die Fahrzeuge ihre Vorteile ausspielen. In ländlichen und weniger gut versorgten Regionen hingegen stellen Reichweite und Ladezeiten weiterhin große Herausforderungen dar, die den Einsatz dieser Fahrzeuge aktuell einschränken. Zu bedenken ist hierbei allerdings, dass dieser Eindruck sich aus der Betrachtung mehrerer Fälle in unterschiedlichen Ländern mit unterschiedlichen Bedingungen etwa bei der öffentlichen Ladeinfrastruktur und deren Kapazitäten ergibt. Im Gespräch der Projektpartner mit einzel-

Tabelle 2 Forts.: Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen im Rettungswesen.

Fahrzeug	Anwendungsfall	Ort	Einführung	Range-Extender	Höchstgeschwindigkeit
e-RTW	Rettungswagen	Münster, Deutschland	Februar 2022	k.A.	k.A.
DocGo Electric Ambulance	Rettungswagen	New York City, USA	März 2022	k.A.	105 km/h
Dienstabteilung Schutz & Rettung Zürich E-Rettungswagen	Rettungswagen	Schweiz	Mai 2022	k.A.	k.A.
Helgoland Rettungswagen	Rettungswagen	Helgoland, Deutschland	November 2022	nein	k.A.
Mercedes Benz e-Vito Tourer L3	Rettungswagen	Kopenhagen, Dänemark	Februar 2023	nein	160 km/h
Orten ET55M	Rettungswagen	Hannover, Deutschland	März 2023	nein	120 km/h
eRTW	Rettungswagen	Berlin, Deutschland	April 2023	nein	120 km/h
Mercedes-Benz eVito Tourer L3	Krankenwagen	Stockholm, Schweden	April 2023	nein	160 km/h
WAS 500 Electric Ambulance	Rettungswagen	Luxemburg	Juli 2023	nein	120 km/h

nen Einsatzbehörden sowie Fahrzeugherstellern wurde bspw. hervorgehoben, dass spezifisch in Deutschland ggf. das Stadt-Land-Verhältnis umgekehrt sein könnte, weil in ländlichen Regionen Ladeinfrastrukturen, die auf die Bedürfnisse des Rettungswesens angepasst sind, einfacher von Grund auf zu errichten sind und vorhandene Infrastrukturen in Städten oft nicht die nötigen Kapazitäten haben, um schwerere Einsatzfahrzeuge des Rettungswesens zu versorgen.

In Gesprächen der Projektpartner mit einzelnen Dienststellen wurden zudem verbreitete Herausforderungen und Probleme deutlich, die durch die lange Lieferkette entstehen – vom ursprünglichen Fahrzeughersteller über den Umrüster auf elektrischen Antrieb bis hin zum Ausrüster für spezifische Anwendungen. Dazu gehören etwa ESP-Fehler und Warnmeldungen aufgrund des hohen Fahrzeuggewichts. Eine engere Abstimmung der Fertigungsschritte entlang dieser Lieferkette ist daher ebenso entscheidend.

Reichweite	Ladedauer	Erfahrungen
k.A.	k.A.	k.A.
ca. 217 km	k.A.	k.A.
200 km	1,5 Std. (50-kW-Modus) bzw. 3,5 Std. (22 kW)	k.A.
115 km	k.A.	Auf Helgoland funktioniert der vollelektrische Rettungswagen gut, da die Strecken kurz und die Anforderungen geringer sind. Für das Festland sehen Tester derzeit allerdings keine Möglichkeit, da dort längere Distanzen und höhere Ansprüche bestehen. Aufgrund der leisen Fahrgeräusche wurde ein Passantenwarner installiert, der während der Fahrt ein konstantes Rauschen erzeugt. ¹²¹
233 km	35 Min. von 10 auf 80 %	
150 bis 200 km	1,5 Std. (50 kW) bzw. 3,5 Std. (22 kW)	An allen Standorten des Klinikums Region Hannover wurden Ladepunkte für den seit März eingesetzten E-RTW vom Typ C eingerichtet. Nach ersten Tests und Anpassungen erhielt er die notwendige Zulassung. Allerdings sind Einsätze wie Überlandverlegungen oder der Transport von kritisch kranken Neugeborenen weiterhin nur mit konventionellen Rettungswagen möglich. ¹²²
ca. 200 km	1,5 Std. (50 kW) bzw. 3,5 Std. (22 kW)	k.A.
233 km	35 Min. von 10 auf 80 %	k.A.
Ca. 200 km	1,5 Std. (50 kW) bzw. 3,5 Std. (22 kW)	k.A.

¹²¹ NDR (2024).

¹²² Feldmann (2023); Knobloch (2023).

Tabelle 2 Forts.: Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen im Rettungswesen.

Fahrzeug	Anwendungsfall	Ort	Einführung	Range-Extender	Höchstgeschwindigkeit
e-RTW	Rettungswagen	Köln	September 2024	k.A.	120 km/h
St Vincent's hospital electric ambulance	Rettungswagen	Australien	November 2023	nein	k.A.
Electric Ford Ambulance	Rettungswagen	London, UK	Januar 2024	k.A.	k.A.
Henan Costar Group Electric Ambulances	Mehrere Rettungswagen	Usbekistan	Januar 2024	k.A.	k.A.
NHS Electric Ambulances	Rettungswagen-Flotte	UK	März 2024	k.A.	k.A.
E-KTW BY 2024	Krankenwagen	Rhön-Grabfeld und Erlangen-Höchstadt, Deutschland	März 2024	nein	130 km/h
Hato Hone St. John Electric Ambulance	Rettungswagen	Hamilton, Neuseeland	April 2024	nein	k.A.

5.3 Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen in der Feuerwehr und im Katastrophenschutz

Die untenstehende Tabelle umfasst 21 Dienststellen, die batterieelektrische Einsatzfahrzeuge in der Feuerwehr und im Katastrophenschutz nutzen. Diese Anwendungsfälle weisen eine breite geografische Abdeckung auf und erstrecken sich sowohl über städtische als auch ländliche Einsatzgebiete. Die Anwendungsfälle dieser Fahrzeuge reichen von klassischen Löschfahrzeugen über spezielle Unterstützungswagen bis hin zu hybriden Feuerwehrfahrzeugen. Auch hier zeigt sich, dass batterieelektrische Fahrzeuge in diesem Einsatzfeld deutlich verbreiteter sind als die weiter oben behandelten Wasserstoff-Pendants, bei welchen gerade einmal vier Anwendungsbeispiele bei der Feuerwehr oder Katastrophenschutz gefunden werden konnten.

Eine zentrale Auffälligkeit der erfassten Fälle ist die vergleichsweise geringe Reichweite vieler rein elektrischer Modelle. Die meisten Fahrzeuge haben eine maximale Reichweite von etwa 100 bis 160 Kilometern, was besonders in weitläufigen Gebieten potenziell einschränkend wirkt. Auch die Ladezeiten variieren stark, je nach eingesetzter Technologie und vorhandener Infrastruktur. So wird bei mehreren Modellen die Ladezeit bei komplett entladener Batterie mit bis zu 5 Stunden (Wechselstrom)

Reichweite	Ladedauer	Erfahrungen
150 – 200 km	1,5 Std. (50 kW) bzw. 3,5 Std. (22 kW)	Der Rettungswagen funktioniert gut im Stadtbereich und bietet Vorteile wie geringeren Bremsverschleiß und effiziente Beschleunigung, ist jedoch auf Autobahnen weniger geeignet. Wartung ist kompliziert, da mehrere Dienstleister eingebunden sind und technische Warnmeldungen häufig auftreten. Mitarbeitende reagieren gemischt: ein Drittel ist positiv eingestellt, ein weiteres Drittel skeptisch, und der Rest bevorzugt Diesel. Langfristig wird der eRTW als zukunftsorientierte und potenziell kostenneutrale Alternative gesehen. ¹²³
280 km	k.A.	k.A.
k.A.	k.A.	Der Wagen hat sich bereits in einigen Schichten bewährt und erfüllt die Anforderungen der Norm CEN EN 1789 für das Design und die Ausstattung von Rettungswagen. ¹²⁴
450 km	k.A.	k.A.
k.A.	k.A.	k.A.
224 bis 316 km	35 Min. für 80 %	Die Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge ist noch nicht flächendeckend ausgebaut, auch nicht an Rettungswachen oder Krankenhäusern. Daher hat das Bayerische Rote Kreuz Erlangen und Bad Neustadt a. d. Saale als Pilotstandorte gewählt, da dort die Voraussetzungen für Elektromobilität am besten gegeben sind. ¹²⁵
250 km	k.A.	k.A.

angegeben, während die Nutzung von Gleichstrom die Ladezeit auf unter eine Stunde reduzieren kann. Hier zeigt sich, dass die Einsatzmöglichkeiten stark von der Ladeinfrastruktur und der Notwendigkeit einer schnellen Einsatzbereitschaft beeinflusst werden.

Besonders hervorzuheben sind die positiven Erfahrungen mit dem Rosenbauer KLF-L Einsatzfahrzeug in Linz, Österreich sowie dem Rosenbauer RT in Berlin. Das österreichische Fahrzeug ist seit 2018 im Einsatz, hat bereits über 12.000 km zurückgelegt und über 100 Einsätze absolviert. Trotz anfänglicher Probleme, die durch technische Anpassungen

gelöst wurden, sind die Anwender mittlerweile sehr zufrieden, was die Zuverlässigkeit und die geringen Wartungskosten betrifft. Das in Berlin genutzte Modell ist seit 2022 im Dienst und hat bereits tausende Einsätze erfolgreich gemeistert. Im Vergleich dazu gab es jedoch auch kritische Rückmeldungen zu den weit verbreiteten Rosenbauer-Modellen, etwa bei einem Einsatz in Los Angeles, wo das Modell RTX aufgrund von Undichtigkeiten im Wassertank nach sehr kurzer Nutzungsdauer zur Reparatur zurück zum Hersteller musste. Leider waren zudem kaum Erfahrungsberichte zur Nutzung von Rosenbauer-Modellen in eher ländlichen Regionen zu finden.

¹²³ Eigenes Gespräch des Projektkonsortiums mit der Dienststelle.

¹²⁴ Levin (2024).

¹²⁵ Bayerisches Rotes Kreuz (2024).

Ein weiteres Beispiel, das heraussticht, ist die umfassende Implementierung von Ladeinfrastrukturen für einen Pierce Volterra-Feuerwehrgewagen in Madison, USA. Hier wurden in Zusammenarbeit des Fahrzeugherstellers mit Energieversorgern und der städtischen Verwaltung umfangreiche Anpassungen vorgenommen, um eine zuverlässige Versorgung der Einsatzfahrzeuge sicherzustellen. Solche Projekte zeigen, dass der erfolgreiche

Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge stark von einer gut ausgebauten Infrastruktur abhängig ist.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass batterieelektrische Fahrzeuge im Feuerwehr- und Katastrophenschutz zwar bereits in unterschiedlichen Regionen erfolgreich getestet und vereinzelt regulär eingesetzt werden, jedoch weiterhin mit Herausforderungen wie begrenzter Reich-

Tabelle 3: Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen in der Feuerwehr und im Katastrophenschutz.

Fahrzeug	Anwendungsfall	Ort	Einführung	Range-Extender	Höchstgeschwindigkeit
e-Golf	28 Funkdienstwagen	München, Deutschland	2017	Nein	150 km/h
Rosenbauer's KLF-L Emergency Vehicle	Feuerwehrgewagen	Linz, Österreich	April 2018	k.A.	k.A.
Rosenbauer Concept Fire Truck	Feuerwehrgewagen	Amsterdam, Niederlande	Dezember 2019	Ja	k.A.
Rosenbauer RT	Feuerwehrgewagen	Dubai	September 2020	Ja	110 km/h
Pierce Volterra	Feuerwehrgewagen	Madison, USA	September 2021	Ja	k.A.
Rosenbauer RT	Vier Feuerwehrgewagen	Basel, Schweiz	November 2021	Ja	110 km/h

weite, langen Ladezeiten und der Abhängigkeit von spezifischen Ladeinfrastrukturen zu kämpfen haben. Auch haben sich in Gesprächen der Projektpartner mit einzelnen Dienststellen wie schon im Anwendungsfeld Rettungswesen weitverbreitete Herausforderungen und Probleme herauskristallisiert, die sich aus der langen Lieferkette von ursprünglichem Fahrzeughersteller zu Umrüster auf elektrischen Antrieb und schlussendlich Ausrüster für

spezifische Anwendungen ergeben. Eine engere Verzahnung der Fertigungsschritte innerhalb dieser Lieferkette werden neben dem Ausbau und der Anpassung der bestehenden Infrastruktur sowie kontinuierliche Weiterentwicklungen der Batterietechnologie entscheidende Faktoren für die zukünftige Nutzung des batterieelektrischen Antriebs bei der Feuerwehr sein.

Reichweite	Ladedauer	Erfahrungen
230 km	Typ 2 (3,6 kW): 10,5 Std.; Typ 2 (7,2 kW): 5,3 Std.; Schnellladen (CCS, 80 %): 45 Min.	Die Fahrzeuge werden seit 2017 als Funkdienstwagen für etwa 80 km täglich genutzt, was mit einer nächtlichen Ladung gut abgedeckt ist. Das Feedback der Nutzer ist überwiegend positiv, besonders wegen des leisen Fahrgeräuschs und der guten Beschleunigung. Im Winter sinkt die Reichweite auf etwa 120 km, was jedoch für den Einsatzzweck ausreicht. Größere Probleme traten nur auf, wenn zusätzliche elektrische Verbraucher das System belasteten, sodass für einige Anwendungen eine separate Ladeerhaltung nötig wurde. ¹²⁶
160 km	k.A.	Das Fahrzeug hat 12.000 km und über 100 Einsätze bewältigt. Der Antrieb ist zuverlässig, Startverzögerung durch CPU beträgt ca. 10 Sekunden. Wartungskosten sind minimal. Anfängliche Probleme wurden durch Umbauten gelöst. Laut Linz AG ist man sehr zufrieden, und der Projektinitiator würde das Vorhaben aufgrund verbesserter Fahrgestellverfügbarkeit erneut starten. ¹²⁷
k.A.	k.A.	k.A.
ca. 100 km (elektrisch)	zwischen 40 Min. (Gleichstrom) und 4 bis 5 Std. (Wechselstrom) bei komplett leeren Batterien	k.A.
k.A.	Ca. 90 Min.	Das Fahrzeug absolvierte hunderte Einsätze mit „einwandfreier Leistung“. Der Aufbau der Ladeinfrastruktur erforderte enge Zusammenarbeit zwischen der Flottenabteilung, der Feuerwehr, Madison Gas and Electric, der Stadt und Pierce Manufacturing, um eine 150-kW-ABB-Ladestation zu installieren, wofür die elektrische Anlage des Standorts aufgerüstet wurde. Das Fahrzeug wird nach jedem Einsatz geladen. ¹²⁸
ca. 100 km (elektrisch)	zwischen 40 Min. (Gleichstrom) und 4 bis 5 Std. (Wechselstrom) bei komplett leeren Batterien	k.A.

¹²⁶ Eigenes Gespräch des Projektkonsortiums mit der Dienststelle.

¹²⁷ Pvsafety (2024).

¹²⁸ Dohms-Harter (2021); Petrillo (2021); Grimes (2023).

Tabelle 3 Forts.: Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen in der Feuerwehr und im Katastrophenschutz.

Fahrzeug	Anwendungsfall	Ort	Einführung	Range-Extender	Höchstgeschwindigkeit
Rosenbauer RT	Fünf Feuerwehrwagen	Berlin, Deutschland	März 2022	Ja	110 km/h
Emergency One E1 EVO	Feuerwehrwagen	Département Hérault, Frankreich	Mai 2022	Nein	k.A.
Spartan Emergency Response Vector	Zwei Feuerwehrwagen	Toronto und Varennes, Kanada	August 2022	Ja	k.A.
Rosenbauer RTX	Feuerwehrwagen	Los Angeles, USA	September 2022	Ja	110 km/h
Volvo FE Electric L32 A-XS	Feuerwehrwagen	Zürich, Schweiz	Oktober 2022	k.A.	k.A.
Pierce Volterra	Feuerwehrwagen	Portland, USA	Februar 2023	Ja	k.A.
Rosenbauer Plug-In Hybrid Electric Fire Truck	Feuerwehrwagen	Acton, Australien	Mai 2023	Ja	k.A.
Rosenbauer RT	Zwei Feuerwehrwagen	Wien, Österreich	Juni 2023	Ja	110 km/h
Volvo FL Electric	Feuerwehr-Unterstützungswagen	Australien	August 2023	Nein	k.A.

Reichweite	Ladedauer	Erfahrungen
ca. 100 km (elektrisch)	zwischen 40 Min. (Gleichstrom) und 4 bis 5 Std. (Wechselstrom) bei komplett lee- ren Batterien	Die Berliner Feuerwehr testete von Januar 2021 bis Februar 2022 ein Vorserienmodell über 13 Monate mit fast 1.600 Einsätzen und 14.000 km Laufleistung. Über 95 % der Einsätze wurden rein elektrisch gefahren. Nutzer lobten die Sitzanordnung; das Fahrzeug war stets einsatzbereit. Seit März 2022 ist das Fahrzeug regulär im Einsatz. Allerdings gibt es Bedenken wegen Übergewicht auf Berliner Feuerwehrezufahrten. ¹²⁹ Der elektrische Betrieb ermöglichte bei 90,7 % der Einsätze eine deutliche Reduktion von Lärm und Emissionen, was die Kommunikation und das Arbeitsumfeld an Einsatzorten verbesserte. Trotz technischer Herausforderungen in der Ladeinfrastruktur erwies sich das Konzept als praxistauglich und führte zur Einsparung von etwa 10,3 Tonnen CO ₂ während der Projektlaufzeit. Die Batterie reichte im Stadtbetrieb für mehrere Einsätze, was für städtische Feuerwehranwendungen geeignet ist. Bei den seltenen intensiven Einsatzzeiten war eine hohe Ladeleistung vorteilhaft, doch eine reduzierte Ladeleistung auf 22 kW reichte in den meisten Fällen aus. ¹³⁰
k.A.	Ca. 2 Std.	k.A.
k.A.	k.A.	k.A.
ca. 100 km	0 %-80 % in ca. 45 Min.	Das Fahrzeug musste aufgrund eines Lecks im Wassertank zur Reparatur zurück zum Hersteller. Der Wagen war seit September täglich 10 bis 20 Mal rein elektrisch im Einsatz. Hauptkosten entstehen durch die Batterie, die jährlich 2-5 % an Leistung verliert und voraussichtlich alle 10 Jahre ersetzt werden muss. Ansonsten fallen nur geringe Wartungskosten für Reifen und Bremsen an. ¹³¹
k.A.	k.A.	k.A.
k.A.	Ca. 90 Min.	k.A.
k.A.	k.A.	k.A.
ca. 100 km (elektrisch)	zwischen 40 Min. (Gleichstrom) und 4 bis 5 Std. (Wechselstrom) bei komplett lee- ren Batterien	k.A.
300 km	zwischen 2,3 Std. (Gleichstrom) und 8 Std. (Wechselstrom) bei komplett lee- ren Batterien	k.A.

129 Gandzior (2022); Hegemann (2022); Preuschoff (2024).

130 Berliner Feuerwehr (2023).

131 Bellwood (2022); FirefighterNation (2022); Rosenbauer (2024).

Tabelle 3 Forts.: Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen in der Feuerwehr und im Katastrophenschutz.

Fahrzeug	Anwendungsfall	Ort	Einführung	Range-Extender	Höchstgeschwindigkeit
Rosenbauer RT	Feuerwehrwagen	Nörvenich, Deutschland	Oktober 2023	Ja	110 km/h
Rosenbauer RTX	Feuerwehrwagen	Vancouver, Kanada	Dezember 2023	Ja	110 km/h
Rosenbauer RTX	Feuerwehrwagen	Rancho Cucamonga Fire District, USA	Januar 2024	Ja	110 km/h
Rosenbauer RTX	Feuerwehrwagen	Brampton, Kanada	April 2024	Ja	110 km/h
Rosenbauer RTX	Feuerwehrwagen	Victoria, Kanada	Mai 2024	Ja	110 km/h
Pierce Volterra	Feuerwehrwagen	Calgary Fire Department, Kanada	Juli 2024	Ja	k.A.
Fire Rescue Victoria (FRV) Electric Vehicle for Incident and Emergency (EVIE)	Feuerwehrwagen	Victoria, Australien	Juli 2024	k.A.	k.A.

5.4 Gesamtüberblick und Fazit

Die Untersuchung der Anwendungsfälle von Fahrzeugen mit alternativen Antriebsformen im Rettungswesen, bei Feuerwehren und im Katastrophenschutz zeigt sowohl Potenziale als auch Herausforderungen auf. Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge sind noch vergleichsweise selten im Einsatz, was primär an der unzureichenden Tankstellen-Infrastruktur liegt. Ihre Reichweiten und autarken Energieversorgungsfunktionen, wie beim H2Rescue-Prototyp, machen sie jedoch zu vielversprechenden Optionen für den Katastrophenschutz und großflächige Einsätze – insbesondere in Notfallsituationen, in denen eine stabile Energiequelle unverzichtbar ist.

Batterieelektrische Fahrzeuge sind weiter verbreitet und haben in städtischen Regionen mit dichter Ladein-

frastruktur beachtliche Fortschritte erzielt. Der Einsatz im Rettungswesen und bei der Feuerwehr hat gezeigt, dass batterieelektrische Modelle im Rahmen bestimmter Einsätze – etwa bei planbaren Transporten und klar eingegrenzten urbanen Einsatzgebieten – bereits heute zuverlässig betrieben werden können. Allerdings ist die Reichweite bei vielen Modellen, vor allem im ländlichen Raum, noch ein limitierender Faktor, der den regulären Einsatz erschwert. Einige Organisationen haben daher hybride Range-Extender-Lösungen integriert, um die Einsatzmöglichkeiten der Fahrzeuge zu erweitern. Zu beachten ist hierbei allerdings, wie schon weiter oben erwähnt, dass dies ein Durchschnittsbild aus mehreren internationalen Fällen ist und sich spezifisch in Deutschland ggf. ein umgekehrtes Stadt-Land-Verhältnis ergeben

Reichweite	Ladedauer	Erfahrungen
ca. 100 km (elektrisch)	zwischen 40 Min. (Gleichstrom) und 4 bis 5 Std. (Wechselstrom) bei komplett leeren Batterien	k.A.
ca. 100 km	0 %-80 % in ca. 45 Min.	Das Fahrzeug musste nach kurzer Einsatzzeit wegen eines Wassertanklecks repariert werden. Die Kosten übernahm der Hersteller Rosenbauer. ¹³²
ca. 100 km	0 %-80 % in ca. 45 Min.	k.A.
ca. 100 km	0 %-80 % in ca. 45 Min.	k.A.
ca. 100 km	0 %-80 % in ca. 45 Min.	k.A.
k.A.	Ca. 90 Min.	k.A.
k.A.	k.A.	k.A.

könnte, da in ländlichen Regionen Ladeinfrastrukturen einfacher von Grund auf zu errichten sind und vorhandene Infrastrukturen in Städten oft nicht die nötigen Kapazitäten haben, um schwerere Einsatzfahrzeuge zu versorgen.

Zusammenfassend zeigt die aktuelle Entwicklung, dass alternative Antriebsformen für Rettungsdienste und Feuerwehren durchaus praktikabel sind, jedoch stark von der Infrastruktur und dem spezifischen Einsatzkontext abhängen. Die Umsetzung erfordert eine enge Kooperation zwischen Herstellern, Energieversorgern und Einsatzkräften, um sicherzustellen, dass Fahrzeuge stets einsatzbereit und auf die regionalen Anforderungen abgestimmt sind. Für eine flächendeckende Einführung

sind neben technologischen Weiterentwicklungen auch Investitionen in die Lade- und Tankstelleninfrastruktur erforderlich, um die Anforderungen an Schnelligkeit und Verfügbarkeit in Notfallsituationen zu erfüllen.

¹³² Karim (2024).

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die Dekarbonisierung des Rettungswesens, der Feuerwehr und des Katastrophenschutzes ist eine komplexe, aber notwendige Aufgabe im Rahmen der Energiewende. Die Analyse zeigt, dass die Einführung alternativer Antriebstechnologien durch politische, wirtschaftliche und technische Faktoren erheblich beeinflusst wird. Wasserstoff, batterieelektrische Antriebe und E-Fuels stellen jeweils spezifische Vor- und Nachteile dar, die je nach Einsatzgebiet und infrastrukturellen Voraussetzungen unterschiedlich zur Geltung kommen.

Batterieelektrische Fahrzeuge haben sich als die derzeit wirtschaftlichste Option erwiesen, insbesondere in urbanen Einsatzgebieten mit gut ausgebauter Ladeinfrastruktur. Ihre begrenzte Reichweite und die langen Ladezeiten bleiben jedoch Herausforderungen, insbesondere für ländliche Regionen und zeitkritische Einsätze. Wasserstoff bietet aufgrund seiner hohen Energiedichte und schnellen Betankungszeit Potenzial für Langstrecken und Schwerlastanwendungen, wird jedoch durch hohe Produktionskosten und die unzureichende Tankstelleninfrastruktur eingeschränkt. E-Fuels könnten bestehende Verbrennungsmotoren klimafreundlicher machen, sind jedoch aufgrund ihrer hohen Produktionskosten und der limitierten Verfügbarkeit derzeit nicht wettbewerbsfähig.

Um fundierte Entscheidungen über Antriebsstoffe und deren Umsetzung treffen zu können, kann die Erhebung von Daten und Nutzungsprofilen bestehender Rettungswagen, Löschfahrzeuge und weiterer Fahrzeugtypen eine entscheidende Orientierung bieten, etwa bei der Erfassung von typischerweise zurückgelegten Distanzen und der Infrastruktur-Situation entlang stark frequentierter Fahrrouten. Gleichzeitig sollte die Standardisierung und Normierung vorangetrieben werden, um die Anfertigung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebsformen zu vereinheitlichen und dadurch Kosten zu senken.

Zukunftsorientierte Strategien sollten auf einem technologieoffenen Ansatz beruhen, der die jeweiligen Stärken der Technologien nutzt und die Entwicklung einer passenden Infrastruktur fördert. Insbesondere die Region Lausitz könnte durch gezielte Investitionen in Lade- und Tankinfrastrukturen sowie durch Pilotprojekte eine Vorreiterrolle übernehmen.

Ein zentraler Faktor bleibt die politische Unterstützung, sei es durch Subventionen, Forschungsförderung oder die Festlegung klarer regulatorischer Rahmenbedingungen. Dies schließt auch die Gewährleistung von Planungssicherheit ein, etwa durch klare Regelungen zu einem möglichen Verbrenner-Aus, einschließlich Details zu Ausnahmen und Übergangsfristen. Gleichzeitig ist eine stärkere Zusammenarbeit zwischen Herstellern, politischen Akteuren und Rettungs- und Notfalldiensten notwendig, um spezifische Anforderungen an die Fahrzeugtechnologien frühzeitig zu adressieren.

Abschließend zeigt die Kurzstudie, dass die Transformation hin zu nachhaltigen Mobilitätslösungen im Rettungswesen, bei der Feuerwehr und im Katastrophenschutz nicht nur eine technologisch-wirtschaftliche Herausforderung darstellt, sondern eine allumfassende Aufgabe ist. Durch den gezielten Ausbau von Infrastrukturen, die kontinuierliche Förderung von Innovationen und den Austausch von Best Practices kann eine zukunftsfähige und klimafreundliche Mobilität realisiert werden.

LITERATUR

- Badelt, O. (2024): „Sozial-ökologische Herausforderungen bei der Integration von Wasserstoff in das Energiesystem“, in: Finger, A.; Badelt, O.; Dahmen, K.; Heilen, L.; Mai, N.; Seegers, R.; See-wald, E.; Śnieg, F.; Wiemer, L. (Ed.): Transformationsprozesse in Stadt und Land: Erkenntnis-se, Strategien und Zukunftsperspektiven, Verlag der ARL - Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft, Hannover, pp. 90-109.
- Basma, H.; Rodriguez, F. (2023): A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe, Working Paper 2023-28, International Council on Clean Transportation, Wilmington, NC.
- Bayerisches Rotes Kreuz (2024): „Pilotprojekt im Rettungsdienst: Erster elektrisch betriebener Krankentransportwagen in Betrieb genommen“, URL: <https://www.brk.de/aktuell/presse/meldung/pilotprojekt-im-rettungsdienst-erster-elektrisch-betriebener-krankentransportwagen-in-betrieb-genommen.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Bellwood, O. (2022): „America's First Electric Fire Truck Is On the Job in Los Angeles“, URL: <https://jalopnik.com/first-electric-fire-truck-los-angeles-lafd-1849768432> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Berliner Feuerwehr (2023): „Abschlussbericht Projekt eLHF“, URL: https://www.berliner-feuerwehr.de/fileadmin/bfw/dokumente/Forschung/elhf/Abschlussbericht_eLHF.pdf (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Beutler, F.; Brümmer, U.; Ertner, S.; Evenson, D.; Obermaier, R.; Schroeder, W. (2021): Transformation der Automobilindustrie: Was jetzt zu tun ist, böll. brief Grüne Ordnungspolitik no. 18, Heinrich Böll Stiftung, Berlin.
- BMWK (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin.
- BMWK (2024a): „Wasserstoffnetz für die Energiewende – wichtige Weichen für koordinierten und privatwirtschaftlichen Aufbau sind gestellt“, Schlaglichter Wirtschaftspolitik 02/24, Berlin.
- BMWK (2024b): „Die nationale Wasserstoffstrategie hat den Markthochlauf von Wasserstoff zum Ziel. Dafür wird die ausreichende Verfügbarkeit von Wasserstoff und der Aufbau einer leistungsfähigen Wasserstoff-Infrastruktur sichergestellt“, URL: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Wasserstoff/Kernnetz/start.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- BMWK (2024c): „IPCEI Wasserstoff: Gemeinsam einen Europäischen Wasserstoffmarkt schaffen“, URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/ipcei-wasserstoff.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- BMWK (2024d): „Rahmenbedingungen und Anreize für Elektrofahrzeuge und Ladeinfrastruktur“, URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/rahmenbedingungen-und-anreize-fuer-elektrofahrzeuge.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Boysen-Hogrefe, J.; Groll, D.; Hoffmann, T.; Jannsen, N.; Kooths, S.; Sonnenberg, N.; Stamer, V. (2023): Deutsche Wirtschaft im Herbst 2023, Kieler Konjunkturberichte Nr. 107, Kiel Institut für Weltwirtschaft, Kiel.
- Brunnengräber, A. (2020): „Die ressourcenpolitische Absicherung des E-Autos: Zur Rohstoff-Governance in Deutschland, der Europäischen Union und im Lithiumdreieck Argentinien, Chile und Bolivien“, in: Brunnengräber, A.; Haas, T. (Ed.): Baustelle Elektromobilität: Sozialwissenschaftliche Perspektiven auf die Transformation der (Auto-)Mobilität, transcript Verlag, Bielefeld, pp. 279-307.
- Bühler, L.; Möst, D.; Scharf, H. (2023): „Grüner Wasserstoff: Wie steht es um die Wirtschaftlichkeit und welche Nachfrage lässt sich erwarten?“ Ifo Dresden berichtet, vol. 30, pp. 16-22.
- Bundesbank (2024): „Deutschland-Prognose: Deutsche Wirtschaft fasst langsam wieder Tritt □ Perspektiven bis 2026“, URL: <https://publikationen.bundesbank.de/publikationen-de/berichte-studien/monatsberichte/monatsbericht-juni-2024-932980?article=deutschland-prognose-deutsche-wirtschaft-fasst-langsam-wieder-tritt-perspektiven-bis-2026-932984> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Bundesfinanzministerium (2024): Wachstumsinitiative – neue wirtschaftliche Dynamik für Deutschland, Berlin.
- Bundesnetzagentur (2024): „Elektromobilität: Öffentliche Ladeinfrastruktur“, URL: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Bundestag (2023): „Förderung von E-Fuels und Biokraftstoffen“, URL: <https://www.bundestag.de/presse/hib/kurzmeldungen-928500> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Bundestag (2024): „Anteil der Lkw mit alternativen Antrieben bei 1,75 Prozent“, URL: <https://www.bundestag.de/presse/hib/kurzmeldungen-986040> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Clausen, J. (2022): Das Wasserstoffdilemma: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen. Berlin: Borderstep Institut.
- Dohms-Harter, E. (2021): „Madison's Fire Department Tests Out Fire Truck That Runs On Electricity“, URL: <https://www.wpr.org/history/conflicts-disasters/madisons-fire-department-tests-out-fire-truck-runs-electricity> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Doucet, F.; Düsterlho, J.; Schäfers, H.; Jürgens, L.; Schütte, C.; Barkow, H.; Neubauer, N.; Heybrock, B.; Jensen, N. (2023): Grüner Wasserstoff für die Energiewende: Potentiale, Grenzen und Prioritäten. Teil 4: Der Industriesektor, Norddeutsches Reallabor, Hamburg.
- E-Bridge (2024): „Hydex & HydexPLUS – Kostenindizes für Wasserstoff“, URL: <https://e-bridge.de/kompetenzen/wasserstoff/h2index/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Electrified (2021): „Johanniter fahren im Elektro-Krankenwagen zum Patienten“, URL: <https://www.electrifiedmagazin.de/elektro/johanniter-fahren-im-elektro-krankenwagen-zum-patienten/101119/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Feldmann, M. (2023): „E-RTW in Hannover im Regeldienst“, URL: <https://www.behoerden-spiegel.de/2023/08/18/e-rtw-in-hannover-im-regeldienst/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Feuerwehr-Magazin (2020): „Feuerwehr stellt Wasserstoff-Brennstoffzellen-KdoW in Dienst“, URL: [https://www.feuerwehrmagazin.de/nachrichten/news/feuerwehr-stellt-wasserstoff-brennstoffzellen-kdow-in-dienst-104180#:~:text=N%C3%B6rvenich%20\(NW\)%20%E2%80%93%20Die%20Freiwillige,Gemeinde%20aber%20keine%20geeignete%20Tankstelle.](https://www.feuerwehrmagazin.de/nachrichten/news/feuerwehr-stellt-wasserstoff-brennstoffzellen-kdow-in-dienst-104180#:~:text=N%C3%B6rvenich%20(NW)%20%E2%80%93%20Die%20Freiwillige,Gemeinde%20aber%20keine%20geeignete%20Tankstelle.) (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- FFE (2023): „Normenlandschaft für die Elektromobilität“, URL: https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/normenlandschaft_fuer_die_elektromobilitaet/ (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- FirefighterNation (2022): „Water Leak Sidelines LAFD Electric Fire Truck Before It Hits the Streets“, URL: <https://www.firefighternation.com/lifestyle/water-leak-sidelines-lafd-electric-fire-truck-before-it-hits-the-streets/#gref> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Foster, M. (2022): „All aboard South West London's first purpose-built electric ambulance“, URL: <https://www.croydonhealthservices.nhs.uk/trust->

- news/all-aboard-south-west-londons-first-purposebuilt-electric-ambulance-3951/ (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Fraunhofer ISI (2023): „Elektroauto versus Verbrenner – Kostenanalyse zeigt klaren Vorteil für E-Fahrzeuge“, URL: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2023/presseinfo-04-elektroauto-versus-Verbrenner-Kostenanalyse.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Freiwah, P. (2024): „Neue E-Auto-Förderung kommt - diese Steuervorteile winken für Dienstwagen“, URL: <https://www.merkur.de/wirtschaft/elektroauto-foerderung-steuervorteile-dienstwagen-staatliche-subvention-ampel-zr-93179138.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Fritz, D.; Heinfeldner, H.; Lambert, S. (2023): Rohstoffe der Elektromobilität: Kurzstudie zur Analyse derzeitiger und möglicher zukünftiger Rohstoffabhängigkeiten von Elektrofahrzeugen, Um-weltbundesamt, Wien.
- Gandzior, A. (2022): „E-Löschfahrzeug im Test: Berliner Feuerwehr zieht Bilanz“, URL: <https://www.morgenpost.de/berlin/article235461397/E-Loeschfahrzeug-im-Test-Berliner-Feuerwehr-zieht-Bilanz.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Gerhäuser, P.; Kroher, T. (2024): „Umweltbonus: Plötzliches Aus für die Förderung von E-Autos“, URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/elektroauto/foerderung-elektroautos/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Görlach, B.; Jakob, M.; Vega, R. (2023): Eine gemeinsame Agenda für grünen Wasserstoff in den G20-Staaten: Herausforderungen und Chancen für die G20 als Forum für grünen Wasserstoff, Policy Brief, Ecologic Institut, Berlin.
- Götz, T.; Schnurr, B.; Kaselofsky, J.; Labunski, F.; Pössinger, J. (2024): Effiziente Synthese und Rückverstromung von E-Fuels (ESyRE), Wuppertal Institut.
- Graf, F.; Isik, V.; Heneka, M.; Köppel, W.; Kolb, T.; Fleer, A.; Verbücheln, R. (2023): „Aktuelle Fragestellungen beim leitungsgesunden Transport von Wasserstoff“, in: Chemie Ingenieur Technik, no. 96, vol. 1-2, pp. 1-13.
- Grimes, C. (2023): „Can Electric Fire Trucks Meet the Needs of Today's Fire Departments?“, URL: <https://www.government-fleet.com/10204379/can-electric-fire-trucks-meet-the-needs-of-todays-fire-departments> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Grimm, A.; Pfaff, M. (2022): Transformation der Wertschöpfung in der Automobilbranche, Working Paper Forschungsförderung No. 249, Hans Böckler Stiftung, Düsseldorf.
- H2 (2024): „H2 tanken: Wasserstoffmobilität beginnt jetzt“, URL: <https://h2.live/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- H2 Mobility (2021): Wasserstoffbetankung von Schwerlastfahrzeugen – die Optionen im Überblick, H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG, Berlin.
- H2 Stations (2024): „H2 Stations Map“, URL: <https://www.h2stations.org/stations-map/?lat=49.139384&lng=11.190114&zoom=2> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Hausmann, F. (2024): „MAN plant Lkw-Kleinserie mit Wasserstoff-Verbrenner“, URL: <https://bi-medien.de/fachzeitschriften/baumagazin/nutzfahrzeuge-am-bau/wasserstoff-lkw-man-plant-lkw-kleinserie-mit-wasserstoff-verbrenner-b17743> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Hegemann, J. (2022): „Test des Löschfahrzeugs mit Elektroantrieb beendet“, URL: <https://www.feuerwehrmagazin.de/nachrichten/news/test-des-loeschfahrzeugs-mit-elektroantrieb-beendet-114366> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Heilmair, P. (2023): „Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie: Was steht drin?“, URL: <https://www.dena.de/newsroom/fortschreibung-der-nationalen-wasserstoffstrategie/> (letz-ter Zugriff: 05.12.2024).
- Heimes, H.; Kampker, A.; Dorn, B.; Offermanns, C.; Brans, F. (2024): „Aktuelle Herausforderungen der Elektromobilität“, in: Kampker, A.; Heimes, H. (Ed.): Elektromobilität: Grundlagen einer Fortschrittstechnologie, 3. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, pp. 29-39.
- Henkel (2023): „Was der E-Auto-Förderstopp für Verbraucher bedeutet“, URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/e-autos-foerderung-faq-100.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Hille, E.; Althammer, W.; Diederich, H. (2020): „Environmental regulation and innovation in renewable energy technologies: Does the policy instrument matter?“, in: Technological Forecasting and Social Change, vol. 153.
- Hoffmann, B.; Halbig, A.; Senders, J.; Nysten, J.; Antoni, O.; Müller, T. (2021): Auf dem Weg zum Wasserstoffwirtschaftsrecht? Rechtsgrundlagen und Entwicklungslinien für die Regulierung der grünen Wasserstoffwirtschaft. Stiftung Umweltenergierecht, Würzburg.
- Hoh, D. (2023): „Wie viele Ladesäulen braucht Deutschland?“, URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/energie/ladesaehlen-infrastruktur-elektromobilitaet-100.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Holdenried, E. (2022): „Klima-Bilanz, Preis, Produktion: 5 wichtige Faktoren für den Erfolg von E-Fuels, bei denen die Ansichten weit auseinander gehen“, URL: <https://www.businessinsider.de/wirtschaft/mobility/klima-bilanz-preis-produktion-5-wichtige-faktoren-fuer-den-erfolg-von-e-fuels-bei-denen-die-ansichten-weit-auseinander-gehen-a/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Hüls, C. (2022): „Determinanten der Transformation von Antriebsportfolios“, in: Strategische Planung der Transformation von Antriebsportfolios in der Automobilindustrie. Produktion und Logistik. Springer Gabler, Wiesbaden.
- IEA (2024): Global EV Outlook 2024: Moving towards increased affordability, International Energy Agency, Paris, Frankreich.
- IKEM (2024): „Regulierung und Standardisierung“, URL: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/567645/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebs-technologien für Lkw im Zeithorizont 2030, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg & PTV Transport Consult, Heidelberg & Karlsruhe.
- Kaiser, O.; Malanowski, N. (2020): Voraussetzungen für eine wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft: Fördernde und hemmende Faktoren im Verkehrssektor und der chemischen Industrie, Working Paper Forschungsförderung, No. 193, Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf.
- Kampker, A.; Heimes, H.; Dorn, B.; Offermanns, C.; Frieges, M.; Wennemar, S.; Neb, D.; Kisseler, N.; Drescher, M.; Gorsch, J.; Späth, B.; Lackner, N.; Bernhart, W.; Hasenberg, J.; Hotz, T.; Gallus, D.; Knoche, K.; Demir, I.; Achmadeev, T. (2023): Battery Monitor 2023: The Value Chain Between Economy and Ecology, Aachen.
- Kantola, K. (2024): „H2Rescue: A Breath of Fresh Air for Emergency Response“, URL: <https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/hydrogen-trucks/h2rescue-a-breath-of-fresh-air-for-emergency-response/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Karim, N. (2024): „Canada's first electric fire truck was in service less than a month before it needed repairs“, URL: <https://bc.ctvnews.ca/canada-s-first-electric-fire-truck-was-in-service-less-than-a-month-before-it-needed-repairs-1.6787929> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Kern, F.; Schmelzle, F.; Clausen, J.; Hummel, M.; Anzengruber, C.; Fichter, K.; Tölle, J. (2023): Die deutsche Wasserstoffpolitik und ihre Auswirkungen auf die Wasserstoffwirtschaft und alternative Transformationspfade. Projektbericht „Wasserstoff als Allheilmittel?“. Berlin: Bor-derstep Institut, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.

- Knobloch, L. (2023): „Der erste RTW mit E“, URL: <https://www.autozeitung.de/elektrischer-krankenwagen-203608.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Köllner, C. (2024): „Das müssen Sie zur Diesel-Alternative HVO wissen“, URL: <https://www.springerprofessional.de/betriebsstoffe/diesel/das-muessen-sie-zur-diesel-alternative-hvo-wissen/23641558> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Kraftfahrt-Bundesamt (2024a): „Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen mit alternativem Antrieb“, URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/n_umwelt_node.html;jsessionid=A8AC5EC7012528A3D71C5ACEE6DA3964.live11313 (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Kraftfahrt-Bundesamt (2024b): „Monatliche Neuzulassungen“, URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/monat_neuzulassungen_node.html (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Krajinska, A. (2021): Magic green fuels: Why synthetic fuels in cars will not solve Europe's pollution problems, Transport & Environment, London.
- Kruse, M.; Wedemeier, J. (2021): „Potenzial grüner Wasserstoff: langer Weg der Entwicklung, kurze Zeit bis zur Umsetzung“, in: Wirtschaftsdienst: Zeitschrift für Wirtschaftspolitik, vol. 101, no. 1, S. 26-32.
- Kunoth, K. (2024): „Sächsische Lausitz ohne Anschluss an Wasserstoffkernnetz“, URL: <https://www.radiolausitz.de/beitrag/saechsische-lausitz-ohne-ananschluss-an-wasserstoffnetz-834400/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Küper, M. (2021): Grüner Wasserstoff: Grundpfeiler für mehr Klimaschutz, IW-Kurzbericht, No. 32/2021, Institut der deutschen Wirtschaft (IW), Köln.
- LBST (2024): „Europa passt seine wachsende Infrastruktur von Wasserstoff-Tankstellen für die Betankung schwerer Nutzfahrzeuge an“, URL: <https://lbst.de/wp-content/uploads/2024/01/2024-01-24-LBST-HRS-2023-de.pdf> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Levin, C. (2024): „London's first electric ambulance - what we've learned three months in“, URL: <https://emergencyservicetimes.com/2024/03/14/londons-first-electric-ambulance-what-weve-learned-three-months-in/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- LichtBlick (2024): Ladesäulencheck 2024: Laden unterwegs teurer als Tanken, Hamburg.
- Matthes, F.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Göckeler, K.; Heinemann, C.; Hermann, H.; Kasten, P.; Mendelevitch, R.; Mottschall, M.; Seebach, D.; Cook, V. (2021): Die Wasserstoffstrategie 2.0: Untersuchung für die Stiftung Klimaneutralität, Öko-Institut e.V., Berlin.
- Mayr, K.; Hofer, F.; Ragowsky, G.; Gruber, W.; Arnberger, A.; Kabza, A.; Wolf, P.; Schmidt, M.; Jörissen, L. (2021): Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug: Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte, Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Merten, F.; Scholz, A. (2023): Metaanalyse zu Wasserstoffkosten und -bedarfen für die CO₂-neutrale Transformation, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal.
- Middleton, J. (2024): „NHS to roll out electric ambulances in push to lower carbon footprint“, URL: <https://www.independent.co.uk/news/uk/home-news/nhs-electric-ambulances-net-zero-b2513165.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Molliere, M. (2022): E-fuels in trucks: expensive, scarce, and less green than batteries, Transport & Environment, London.
- Müller-Görnert, M. (2023): E-Fuels im Straßenverkehr: Heilsbringer oder Molekelpackung? VCD, Berlin.
- NDR (2024): „Helgoland zufrieden mit elektrischem Rettungswagen“, URL: <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Helgoland-zufrieden-mit-elektrischem-Rettungswagen,regionheidenews1222.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Neubert, A.; Veltzke, B.; Grothe, L.; Menche, R. (2024): „Wo die „Klimafonds“-Millionen hingehen und es nach dem Haushaltsurteil klemmt“, URL: <https://www.mdr.de/nachrichten/deutschland/wirtschaft/klima-fonds-anpassung-geld-projekte-transformation-100.html#sprung3> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Neuling, U.; Berks, L. (2023): E-Fuels zwischen Wunsch und Wirklichkeit, Agora Verkehrswende Diskussionspapier, Berlin.
- Niepelt, R.; Pitz-Paal, R.; Holst, M.; Heinrichs, H.; Horst, J.; Klann, U.; Jordan, T.; Poganietz, W.; Merten, F.; Terrapon-Pfaff, J.; Schmidt, M. (2021): „Woher kommt der grüne Wasserstoff?“, FVEE Themen 2021, pp. 42-47.
- NOW (2022a): „Erster Wasserstoff-Serien-Lkw auf deutschen Straßen unterwegs“, URL: <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/erster-wasserstoff-serien-lkw-auf-deutschen-strassen-unterwegs/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- NOW (2022b): Gesetzeskarte Elektromobilität: Zentrale Strategien, Gesetze und Verordnungen. Berlin.
- NOW (2023): Gesetzeskarte Wasserstoff: Zentrale Strategien, Gesetze und Verordnungen. Berlin.
- Oberließen, M. & Härthe, M. (2024): „eRTW im Einsatz“, in: Behörden Spiegel, September 2024, pp. 20.
- Original ADS (2022): „Electric Ambulance Runs Out of Charge at a Roadside“, URL: <https://originalads.co.uk/electric-ambulance/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Paulsen, T. (2024): „Kfz-Steuer: Das gilt 2024 bei Elektroautos“, URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/elektroauto/kfz-steuer-elektroautos/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Petrillo, A. (2021): „First Electric Fire Truck in North America Made by Pierce Manufacturing Now in Service at Madison (WI) Fire Department“, URL: <https://www.fireapparatusmagazine.com/features/first-electric-fire-truck-in-north-america-made-by-pierce-manufacturing-now-in-service-at-madison-wi-fire-department/#gref> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Pfennig, M.; von Bonin, M.; Gerhardt, N. (2021): PTX-Atlas: Weltweite Potenziale für die Erzeugung von grünem Wasserstoff und klimaneutralen synthetischen Kraft- und Brennstoffen, Fraunhofer IEE.
- Preuschhoff, O. (2024): „Fünf elektrische Löschfahrzeuge für Berlin“, URL: <https://www.feuerwehrmagazin.de/fahrzeuge-modelle/fuenf-elektrische-loeschfahrzeuge-fuer-berlin-130582> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose (2024): Deutsche Wirtschaft kränkelt - Reform der Schuldenbremse kein Allheilmittel, Gemeinschaftsdiagnose #1-2024, Kiel Institut für Weltwirtschaft, Kiel.
- Pvsafety (2024): „Nachgefragt! Elektrisches Feuerwehreinsatzfahrzeug KLF-L 6 Jahre im Dienst“, URL: <https://www.pvsafety.de/nachrichten/nachgefragt-elektrisches-feuerwehreinsatzfahrzeug-klf-l-6-jahre-im-dienst/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- r2b (2023): Strategische Umsetzung der Landeswasserstoffstrategie des Landes Sachsen-Anhalt, Köln.
- Rose, P.; Wietschel, M.; Gnnann, T. (2020): Wie könnte ein Tankstellenaufbau für Brennstoffzellen-Lkw in Deutschland aussehen?, Working Paper Sustainability and Innovation, No. 509/2020, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.

- Rosenbauer (2024): „RT in Berlin & RTX in Los Angeles: The electric revolution has arrived in the field“, URL: <https://www.rosenbauer.com/en/au/rosenbauer-world/news/newsletter-subscription/newsletter-2022-09/rt-in-berlin-rtx-in-los-angeles-the-electric-revolution-has-arrived-in-the-field> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Ryan, A. (2018): „Yorkshire Ambulance Service’s search for the zero-emissions remedy“, URL: <https://www.fleetnews.co.uk/fleet-management/case-studies/industry-profiles/yorkshire-ambulance-service-s-search-for-the-zero-emissions-remedy> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Sacht, S. (2024): „Mind the Gap! Potenzielle Preisentwicklung von Wasserstoff in Norddeutschland“, in: Wirtschaftsdienst, vol. 104, no. 6, pp. 431-432.
- Schiffer, HW. (2023): „Wachsende Bedeutung der erneuerbaren Energien“, in: Einführung in die Energiewirtschaft. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Schwerz, S.; Meub, L.; Proeger, T. (2022): Wasserstoff-Infrastruktur und maritime Wirtschaft: Technische, institutionelle und regionale Grundlagen für die Mittelstandspolitik, ifh Forschungsbericht 3, Göttingen.
- Siegener Zeitung (2023): „Siegen will klimaneutral werden: Fahren bald Feuerwehr und Müllabfuhr nur noch mit Wasserstoff?“, URL: <https://www.siegener-zeitung.de/lokales/siegerland/siegen/siegen-stadt-will-klimafreundlichen-fuhrpark-AXZYNXVLQFFJFVDLOBSJMTAY.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Soller, G. (2024): „Wasserstoff: Mehrere Tankstellen in Deutschland schließen“, URL: [https://transport-online.de/news/wasserstoff-mehrere-tankstellen-deutschland-schliessen-158423.html#:~:text=R%C3%BCckbau%20statt%20Ausbau%3A%20Eigentlich%20wollte,wieder%20einige%20ausfallen%2C%20Tendenz%20fallend.&text=Redaktion%20\(allg.\)&text=Noch%20immer%20setzen%20manche%20theoretisch%20auf%20die%20Alternativen%20Wasserstoff](https://transport-online.de/news/wasserstoff-mehrere-tankstellen-deutschland-schliessen-158423.html#:~:text=R%C3%BCckbau%20statt%20Ausbau%3A%20Eigentlich%20wollte,wieder%20einige%20ausfallen%2C%20Tendenz%20fallend.&text=Redaktion%20(allg.)&text=Noch%20immer%20setzen%20manche%20theoretisch%20auf%20die%20Alternativen%20Wasserstoff) (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Spitzner, E.; Bösche, E.; Coskina, P.; Cordeiro, S.; Kleemann, J. (2020): Wasserstoff – Rohstoff der Zukunft?! Working Paper of the Institute for Innovation and Technology, Nr. 52.
- T&E (2021): E-fools: why e-fuels in cars make no economic or environmental sense, Transport & Environment, London.
- T&E (2023): „Over €200 to fill up a car – the cost of Germany’s bid to keep combustion engines“, URL: <https://www.transportenvironment.org/articles/over-e200-to-fill-up-a-car-the-cost-of-germanys-bid-to-keep-combustion-engines> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- T&E (2024): „Jedes vierte Elektroauto, das 2024 in Europa verkauft wird, kommt aus China“, URL: <https://www.transportenvironment.org/te-deutschland/articles/jedes-vierte-elektroauto-das-2024-in-europa-verkauft-wird-kommt-aus-china> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Tschinibaew, I.; Grote, R.; Kwell, B.; Maiwald, F.; Pontow, J.; Schrab, K.; Schweppenhäuser, M.; Protzmann, R.; Massow, K.; Radosch, I. (2024): Transformation des Taxi- und Mietwagengewerbes zur Emissionsfreiheit, Fraunhofer Fokus, Fraunhofer-Institut für offene Kommunikationssysteme Fokus, Berlin.
- TTW (2023): „Ein Jahr Wasserstoff-LKW in Deutschland“, URL: <https://ttw.tl.de/ein-jahr-wasserstoff-lkw-in-deutschland/> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Ueckerdt, F.; Odenweller, A. (2023): E-Fuels – Aktueller Stand und Projektionen, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.
- Umbach, F. (2023): „Energiesicherheit unter Bedingungen der Dekarbonisierung von Wirtschaft und Verkehr“, in: SIRIUS – Zeitschrift für strategische Analysen, vol. 7, no. 2, pp. 113-132.
- Umweltbundesamt (2022): „Wasserstoff im Verkehr“, URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/kraftstoffe-antriebe/wasserstoff-im-verkehr-haeufig-gestellte-fragen#einleitung> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Uniti (2020): Das werden klimaneutrale Kraftstoffe zukünftig kosten, Uniti, Berlin.
- Verkehrsrundschau (2024): „Wasserstoff-Lkw und ihre künftige Rolle auf dem Transportmarkt“, URL: <https://www.verkehrsrundschau.de/vr-wissen/alternative-antriebe/wasserstoff-lkw-und-ihre-kuenftige-rolle-auf-dem-transportmarkt-3507928> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Westfalen-Blatt (2022): „E-Rettungswagen überzeugt Feuerwehr Herford nicht“, URL: <https://www.westfalen-blatt.de/owl/kreis-herford/herford/e-rettungswagen-uberzeugt-feuerwehr-herford-nicht-2522042?npg=> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Westphal, K.; Kübler, M.; Möhring, L.; Völler, J. (2023a): Wasserstoff und Markthochlauf – Marktphasen und Zielmodelle, Policy Brief H2Global Stiftung 04/2023, H2Global Stiftung, Hamburg.
- Westphal, K.; Graul, H.; Hoffmann, F.; Klages, C.; Kübler, M.; Möhring, L.; Völler, J. (2023b): Kommerzielle Schnittstellen als Herausforderung für den Aufbau von Wasserstoff-Lieferketten, Policy Brief H2Global Stiftung 03/2023, Hamburg.
- Wietschel, M.; Eckstein, J.; Riemer, M.; Zheng, L.; Lux, B.; Neuner, F.; Breitschopf, B.; Pieton, N.; Nolden, C.; Pfluger, B.; Thiel, Z.; Löschel, A. (2021): Import von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten: von Kosten zu Preisen. HYPAT Working Paper 01/2021. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (Hrsg.).
- Wietschel, M.; Weißenburger, B.; Rehfeldt, M.; Lux, B.; Zheng, L. (2023a): Preiselastische Wasserstoffnachfrage in Deutschland – Methodik und Ergebnisse, HYPAT Working Paper 01/2023, Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- Wietschel, M.; Plötz, P.; Dütschke, E.; Neuner, F.; Tröger, J.; Gnnann, T. (2023b): Eine kritische Diskussion der beschlossenen Maßnahmen zur E-Fuel-Förderung im Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung der Bundesregierung vom 28.3.2023, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- Witsch, K. (2023): „Grüner Wasserstoff ist deutlich teurer als gedacht“, URL: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/bcg-studie-gruener-wasserstoff-ist-deutlich-teurer-als-gedacht/29443386.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Wolf, M. (2024): „Verbrenner-Aus auf der Kippe: Die EU auf der Suche nach einem Ausweg“, URL: <https://www.merkur.de/wirtschaft/verbrenner-aus-auf-der-kippe-europaeische-union-ausweg-suche-zr-93241076.html> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Wolff, S. (2024): „Das Gerüst für Elektromobilität“, URL: <https://www.vda.de/de/themen/elektromobilitaet/ladenetze> (letzter Zugriff: 05.12.2024).
- Wright, R. (2024): „H2RESCUE MISSION“, URL: https://www.army.mil/article/275433/h2rescue_mission (letzter Zugriff: 05.12.2024).

IMPRESSUM

Das Brandenburgische Institut für Gesellschaft und Sicherheit (BIGS) gGmbH ist ein unabhängiges, überparteiliches und nicht-gewinnorientiertes wissenschaftliches Institut, das zu gesellschaftswissenschaftlichen Fragen ziviler Sicherheit forscht. Das Institut publiziert seine Forschungsergebnisse und vermittelt diese in Veranstaltungen an eine interessierte Öffentlichkeit. Das BIGS entstand im Frühjahr 2010 in Potsdam und wird von der Universität Potsdam über ihre UP Transfer GmbH getragen, sowie von den Unternehmen IABG und W.I.S.. Alle Aussagen und Meinungsäußerungen in diesem Papier liegen in der alleinigen Verantwortung der Autor*innen.

Autor:

Kai Beerlink

Titel:

Der politisch-ökonomische Kontext der Dekarbonisierung im Bereich des Rettungswesens, der Feuerwehr und des Katastrophenschutzes

Herausgeber:

Brandenburgisches Institut für Gesellschaft und Sicherheit gGmbH

Verantwortlicher im Sinne des Rundfunkstaatsvertrages:

Dr. Tim H. Stuchtey



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das mFUND-Projekt „Power2Rescue“ unter der Koordination der Björn Steiger Stiftung und in Zusammenarbeit mit dem Brandenburgischen Institut für Gesellschaft und Sicherheit und der BTU Cottbus-Senftenberg sowie dem Landkreis Spree-Neiße als assoziierten Partner zielt darauf ab, klimaschonende Antriebstechnologien für Einsatzfahrzeuge im Rettungsdienst, der Feuerwehr und im Katastrophenschutz zu erforschen. Angesichts des Auslaufens der Zulassung von Verbrennungsmotoren in der EU besteht hier ein dringender Innovationsbedarf.

Das Projekt mit einer Laufzeit von Juli 2024 bis Juni 2025 plant durch mehrere Expertenworkshops und eine Machbarkeitsstudie praxisnahe, datenbasierte Lösungen für alternative Antriebe und die zugehörige Infrastruktur zu entwickeln.

Das Forschungsprojekt Power2Rescue wird im Rahmen der Innovationsinitiative mFUND vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert. Im Rahmen des Förderprogramms mFUND unterstützt das BMDV seit 2016 Forschungs- und Entwicklungsprojekte rund um datenbasierte digitale Innovationen für die Mobilität 4.0. Die Projektförderung wird ergänzt durch eine aktive fachliche Vernetzung zwischen Akteuren aus Politik, Wirtschaft, Verwaltung und Forschung und die Bereitstellung von offenen Daten auf der Mobilithek. Weitere Informationen finden Sie unter www.mfund.de.

Förderkennzeichen: 19FS1012B

BIGS ESSENZ Nr. 23, Februar 2025

ISSN 2191-6756

Copyright 2025 © Brandenburgisches Institut für Gesellschaft und Sicherheit gGmbH. Alle Rechte vorbehalten. Die Reproduktion, Speicherung oder Übertragung (online oder offline) des Inhalts der vorliegenden Publikation ist nur im Rahmen des privaten Gebrauchs gestattet. Kontaktieren Sie uns bitte, bevor Sie die Inhalte darüber hinaus verwenden.

BIGS

BRANDENBURGISCHES INSTITUT
für GESELLSCHAFT und SICHERHEIT

Brandenburgisches Institut für Gesellschaft und Sicherheit
Geschäftsführender Direktor: Dr. Tim H. Stuchtey

Dianastraße 46 . 14482 Potsdam

Tel.: +49-331-704406-0 . Fax: +49-331-704406-19

E-Mail: info@bigs-potsdam.org . www.bigs-potsdam.org



WWW.BIGS-POTSDAM.ORG

BIGS

BRANDENBURGISCHES INSTITUT
für GESELLSCHAFT und SICHERHEIT