



Logistik, Energie und Mobilität 2030

Metastudie im BMWi Technologieprogramm
IKT für Elektromobilität

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

IKT FÜR 
ELEKTROMOBILITÄT

Studie

Logistik, Energie und Mobilität 2030

Metastudie im BMWi Technologieprogramm IKT für Elektromobilität
Berlin

Autoren:

Nora Dörr, Gesamtleitung

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

Lydia Dorrman, Thema Batterietechnologie

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

Dr. Wolfgang Klebsch, Thema Wasserstoff

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

Annelie Oleniczak, Lektorat

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

Fachliche Beratung:

Sebastian Kosslers, Thema Ladeinfrastruktur bis 2030

Referent bei DKE in DIN und VDE

Florian Regnery, Thema Ladeinfrastruktur bis 2030

Projektmanager E-Mobilität, Netzbetrieb bei VDE FNN

Herausgeber:

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
im Rahmen des Dienstleistungsauftrags der Begleitforschung IKT für Elektromobilität,
ein Technologieprogramm des Bundeswirtschaftsministeriums

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
Stresemannallee 15
60596 Frankfurt am Main
www.vde.com

Geschäftsstelle der Begleitforschung IKT für Elektromobilität
Bismarckstraße 33
10625 Berlin
nora.doerr@vde.com
Telefon: +49 151 4022 3166

Gestaltung:

Kerstin Gewalt | Medien&Räume

Titelbild:

eyetronic / Fotolia

Dezember 2020 / Überarbeitung Januar 2021

Inhalt

	Management Abstract	1
1.	Einleitung	2
2.	Status-quo der Antriebsenergie	4
3.	Energieträger und Antriebsformen	7
3.1	Batteriesysteme für die Elektromobilität	7
3.2	Wasserstoff für mobile Anwendungen	12
3.3	Entwicklungen im Bereich alternativer Kraftstoffe	19
3.4	Einschätzung zur Anwendung von Kraftstoffalternativen	22
4.	Energiewirtschaft	24
4.1	Energiebedarf 2030	24
4.2	Akteure im Energiemarkt 2030	24
4.3	Wasserstoff am Zug – Energieszenario 2030	28
5.	Ladeinfrastruktur bis 2030	29
5.1	Elektrische Ladetechnologie und -infrastruktur	29
5.2	Lade- und Lastmanagement im Stromnetz 2030	32
5.3	Verteilnetz und Tankinfrastruktur für Wasserstoff	34
6.	Fahrzeugtypen und Betriebsformen des Transportes	36
7.	Verkehrsträger	39
7.1	Steigerung der Verkehrsleistung	39
7.2	Nutzung vorhandener Netze	39
8.	Akteure in Transport und Logistik	41
8.1	Logistikakteure und deren Entwicklungspotenziale	41
8.2	Mobilitätsdienstleister	42
8.3	Einflussfaktoren zukünftiger Transportleistungen	43
9.	Logistikszenerarien 2030	44
9.1	Trends in der Logistik	44
9.2	Flybot – der Fliegenroboter zur autonomen Einzelzustellung: ein autonomes Zustellszenario der Zukunft	44
9.3	Litfaß-Logistik – Dienstleister-unabhängiges Locker-System als Zustellszenario im urbanen Raum	45
9.4	PC – Paket Concierge – Bündelung von Paketen und individualisierte Zustellung	47
9.5	Last Mile Market – die Börse für ungenutztes Liefervolumen im urbanen Raum	48
9.6	DBee-Logistik – die multimodale Schienen-Logistik der Zukunft	50
9.7	Ansatzpunkte für nachhaltige Logistik	51
10.	Aktuelle Trends	53
10.1	Implikationen und Herausforderungen durch Corona	53
10.2	Förderung des CO ₂ -neutralen Verkehrs	54
11.	Herausforderungen für das Technologieprogramm IKT für Elektromobilität bis 2030	56
12.	Ausblick und Fazit	59
	Abbildungsverzeichnis	60

Management Abstract

In der vorliegenden Metastudie werden mögliche Entwicklungen in den Bereichen Mobilität, Logistik und Energie für den urbanen Einsatz bis zum Jahr 2030 untersucht. Neben Fragen der technischen Machbarkeit werden gesellschaftliches Verhalten, (umwelt-)politische Vorgaben und wirtschaftliche Aufwände betrachtet.

Die Metastudie „Logistik, Energie und Mobilität 2030“ ist im Rahmen der Begleitforschung des Technologieprogramms IKT für Elektromobilität des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) entstanden. Ziel des Programms ist die Förderung von intelligenten Anwendungen für Mobilität, Logistik und Energie. Das Programm besteht (in leicht veränderter Form) seit 2010 und hat in dieser Zeit zahlreiche Projekte im gesamten Bundesgebiet gefördert.

Fokus dieser Metastudie ist die Energieinfrastruktur, welche elektromobile, nicht-fossile, landgestützte Verkehrsmittel für gewerbliche Anwendungen in Mobilität und Logistik unterstützt. Der zeitliche Horizont der Betrachtungen liegt im Jahr 2030.

Die wichtigsten Ergebnisse aus dem Bereich Energie:

- **Batterien** sind für den Einsatz in den Bereichen Mobilität und Logistik bereits hinreichend entwickelt. Hier sind weitere Optimierungen im Bereich der Herstellkosten durch das Greifen von economies of scale zu erwarten. Durchbrüche in der Grundlagenforschung sind zeitlich nicht absehbar, weil mit großen Unsicherheiten verbunden, könnten aber, wenn sie erfolgen, zu einer erheblichen Kapazitätssteigerung beitragen. Dadurch wären größere Reichweiten und umfassendere Nutzungsmöglichkeiten gegeben.
- **Wasserstoff** ist für den Schwerlast- und Fernverkehr bis 2030 eine flexible und technisch ausgereifte Antriebsenergie. Erste Fahrzeuge werden dann als Großserienmodelle im Einsatz sein. Der Markthochlauf erfolgt ab 2030 bis 2050.
- Weitere **alternative Kraftstoffe** werden bis 2030 nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen, um als Ersatz in Verbrennerfahrzeugen zum Einsatz zu kommen.
- Der **Energiemarkt** wird in Zukunft heterogener und vielfältiger. Unterschiedliche Antriebsenergien existieren 2030 nebeneinander. Jedoch sind die grundlegenden Transformationsprozesse hin zur Batterie- und Wasserstoffnutzung angestoßen. Dadurch werden neue Akteure auf den Markt treten und alte werden sich an die veränderten Bedarfe und Rahmenbedingungen anpassen.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Bereichen Mobilität und Logistik:

- **Vollautonome Fahrzeuge** werden 2030 als Einzelfalllösungen eingesetzt.
- Die **Verkehrsleistung** wird bis 2030 stetig zunehmen. Um bei gleichbleibenden Verteilnetzen und infrastrukturellen Voraussetzung Mobilität und Logistik zu ermöglichen sind die vorhandenen Verkehrsträger besser auszulasten.
- Die Anzahl und Gestalt von **Logistikakteuren** und **Mobilitätsdienstleistern** wird 2030 vielfältiger, deren Angebote sind maßgeblich getrieben von der Digitalisierung.

Darüber hinaus wurden für einzelne Teilaspekte Szenarien entwickelt:

- **Wasserstoff am Zug – Energieszenario 2030** beschreibt den kooperativen Einsatz der neuen Antriebsenergie durch verschiedene Verkehrsträger und Nutzer;
- **Flybot** und **Litfaß-Logistik** beschreiben zwei alternative Zustellkonzepte an den Endkunden unter Nutzung autonomer bzw. automatisierter Systeme;
- **Paket-Concierge** und **Last Mile Market** beschreiben zwei Konzepte für den Transport über die letzte Meile. Während beim ersten Szenario die Reduzierung der Einzelzustellungen im Zentrum steht, steht im zweiten Fall die bessere Auslastung vorhandener Zustellkapazitäten im Mittelpunkt;
- **DBee-Logistik** stellt den Transport von Brief- und Paketsendungen über weite Strecken in den Mittelpunkt und beschreibt die Rückkehr dieser unter Zuhilfenahme autonomer Containerlösungen auf die Schiene.

Abschließend werden mögliche thematische Schwerpunkte für die zukünftige Ausrichtung von Fördermaßnahmen aufgezeigt. Im Zentrum steht dabei langfristig die Ermöglichung einer nachhaltigen Logistik, die den vereinbarten Klimazielen entspricht und politische Entscheidungen dahinführend durch technische Konzepte Realität werden lässt.

1. Einleitung

In der vorliegenden Metastudie werden mögliche Entwicklungen in den Bereichen Mobilität, Logistik und Energie für den urbanen Einsatz bis zum Jahr 2030 untersucht. Neben Fragen der technischen Machbarkeit werden das gesellschaftliche Verhalten, (umwelt-)politische Vorgaben und wirtschaftliche Aufwände betrachtet.

Die Metastudie „Logistik, Energie und Mobilität 2030“ ist im Rahmen der Begleitforschung des Technologieprogramms IKT für Elektromobilität des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) entstanden. Ziel des Programms ist die Förderung von intelligenten Anwendungen für Mobilität, Logistik und Energie. Das Programm besteht (in leicht veränderter Form) seit 2010 und hat in dieser Zeit zahlreiche Projekte im gesamten Bundesgebiet gefördert.

Strombasierte Mobilität und Logistik verknüpfen die Verbrauchssektoren Verkehr und Elektrizität (Sektor-kopplung) durch die notwendige Wahl geeigneter Energieträger und Antriebsformen. Letztere erweisen sich als Schlüsselthemen, die einer schwer vorhersehbaren technologischen und wirtschaftlichen Entwicklung unterliegen (→ Abbildung 1).

Im Bereich Antriebsenergie werden die aktuell dominierenden Kraftstoffe Benzin und Diesel in den Hintergrund

treten und Platz für alternative Energieträger und deren Antriebe machen. Gleichmaßen wird erneuerbare Energie, gespeichert in Wasserstoff oder Batterien, ein wesentlicher Energieträger für die elektrischen Antriebe der Zukunft sein. Dem Zusammenspiel dieser alternativen Energieträger widmet sich → Kapitel 3 und zeigt Entwicklungsrichtungen bis zum Jahr 2030 für Batterien, Wasserstoff und alternative Kraftstoffe auf.

Der Wandel hin zur Elektromobilität in der Mobilitäts- und Logistik-Branche betrifft nicht nur die zugrunde liegende Antriebstechnik, sondern auch die Energiewirtschaft. Dort sind es insbesondere die bisherigen etablierten Akteure wie Mineralölkonzerne und Stromerzeuger, die sich auf verändernde Rahmenbedingungen einzustellen haben. Ihre bisherigen Konzepte müssen adaptiert werden, um den veränderten Bedarfen an Antriebsenergie gerecht zu werden und gegenüber neuen Akteuren auf dem Markt zu bestehen. → Kapitel 4 stellt Akteure und Herausforderungen für die Energiewirtschaft vor.

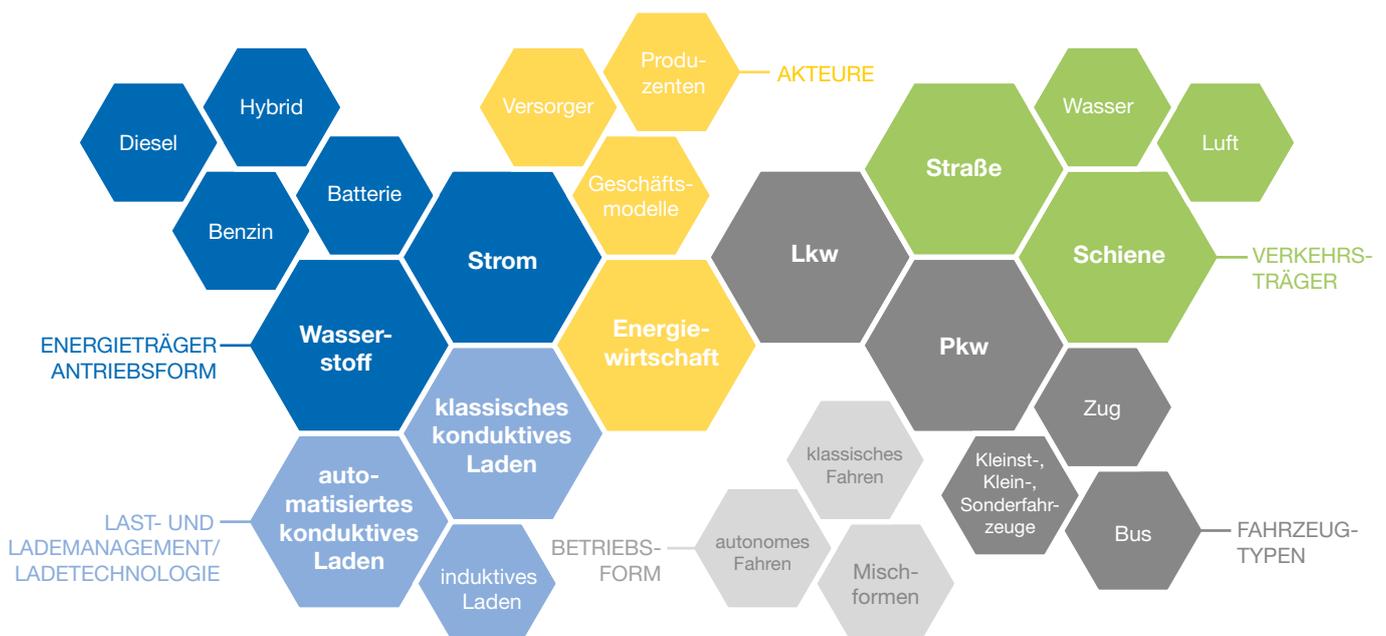


Abbildung 1: Schlüsselthemen der Metastudie 2030

Die zunehmende Verbreitung der Elektromobilität spiegelt sich auch im wachsenden Bedarf an Ladeinfrastruktur. Das hier zugrunde liegende Lade- und Lastmanagement unterliegt einer noch nicht vollständig absehbaren Entwicklung. Jedoch sind Abschätzungen bzgl. des wahrscheinlichen technischen Einsatzes möglich. Diese Trends werden in → Kapitel 5 aufgezeigt.

Im Bereich der gewerblichen Anwendungen von Mobilität und Logistik werden unterschiedliche Fahrzeugtypen benötigt, deren Konfiguration stark vom Einsatzgebiet bestimmt wird. Abhängig von der jeweiligen Anwendung kommen für deren Einsatz unterschiedliche Antriebsformen bzw. Energieträger in Frage. In → Kapitel 6 werden deshalb beispielhaft einige Fahrzeugtypen vorgestellt.

Darauf aufbauend werden die unterschiedlichen Verkehrsträger dargestellt. In → Kapitel 7 werden schwerpunktmäßig die Steigerung der Verkehrsleistung und die damit verbundene Nutzung bestehender Verkehrsnetze betrachtet.

An die Ausführungen zu den unterschiedlichen Verkehrsträgern wie Schiene und Straße anknüpfend, werden in → Kapitel 8 die Logistik- und Mobilitätsakteure in ihren jeweiligen Konstellationen beschrieben. Hier bieten sich dann wiederum Anknüpfungspunkte für die Auswahl der Antriebsform, des Energieträgers und der bereitstellenden Akteure der Energiewirtschaft.

In → Kapitel 9 werden fünf Logistikszenarien für den urbanen Raum im Jahr 2030 beschrieben und die sich daraus ergebenden Herausforderungen und Chancen für die verschiedenen Themen aufgezeigt.

Auf einen kurzen Exkurs zu aktuellen Trends in → Kapitel 10, wie sie als Corona-bedingte Implikationen zu erwarten sind, folgt eine Beschreibung der bestehenden Möglichkeiten der Förderung von Elektromobilität.

Abschließend werden in → Kapitel 11 Herausforderungen für das seit 2010 bestehende Förderprogramm IKT für Elektromobilität aufgezeigt, welche es mit technologischer Weitsicht und wirtschaftlichem Fingerpitzengefühl anzunehmen gilt.

2. Status-quo der Antriebsenergie

Mobilität und Logistik setzen den Einsatz von Energie voraus. Vor 200 Jahren waren es noch ausschließlich die Kraftstoffe wie Heu und Hafer, die mittels Muskelkraft von Pferden und Ochsen zur Fortbewegung von Menschen bzw. Gütern genutzt wurden. Seit der industriellen Revolution und dem damit verbundenen Aufbruch in das Zeitalter der Mobilität haben sich fossile Energieträger wie Kohle, Benzin und Diesel durchgesetzt. Doch diese haben gemeinsam mit anderen Industriezweigen durch den erhöhten CO₂-Ausstoß den Klimawandel vorangetrieben.

Die Weltgemeinschaft ist sich darin einig, dass dem als Gefahr für die Menschheit erkannten Klimawandel entgegengetreten werden muss, indem schrittweise auf CO₂-neutrale Energieträger gewechselt wird. Die EU-Kommissionspräsidentin Ursula von der Leyen hat in ihrer ersten Rede zur Lage der Europäischen Union am 16. Septem-

ber 2020 eine Verschärfung der Klimaziele bis 2050 angekündigt (European Green Deal). Mit ca. einem Fünftel der ausgestoßenen Treibhausgase spielt der Verkehrssektor heute eine entscheidende Rolle und wird mit der Umstellung auf klimaneutrale Energieträger und Antriebsformen erheblich zur Erreichung dieser Ziele beitragen.

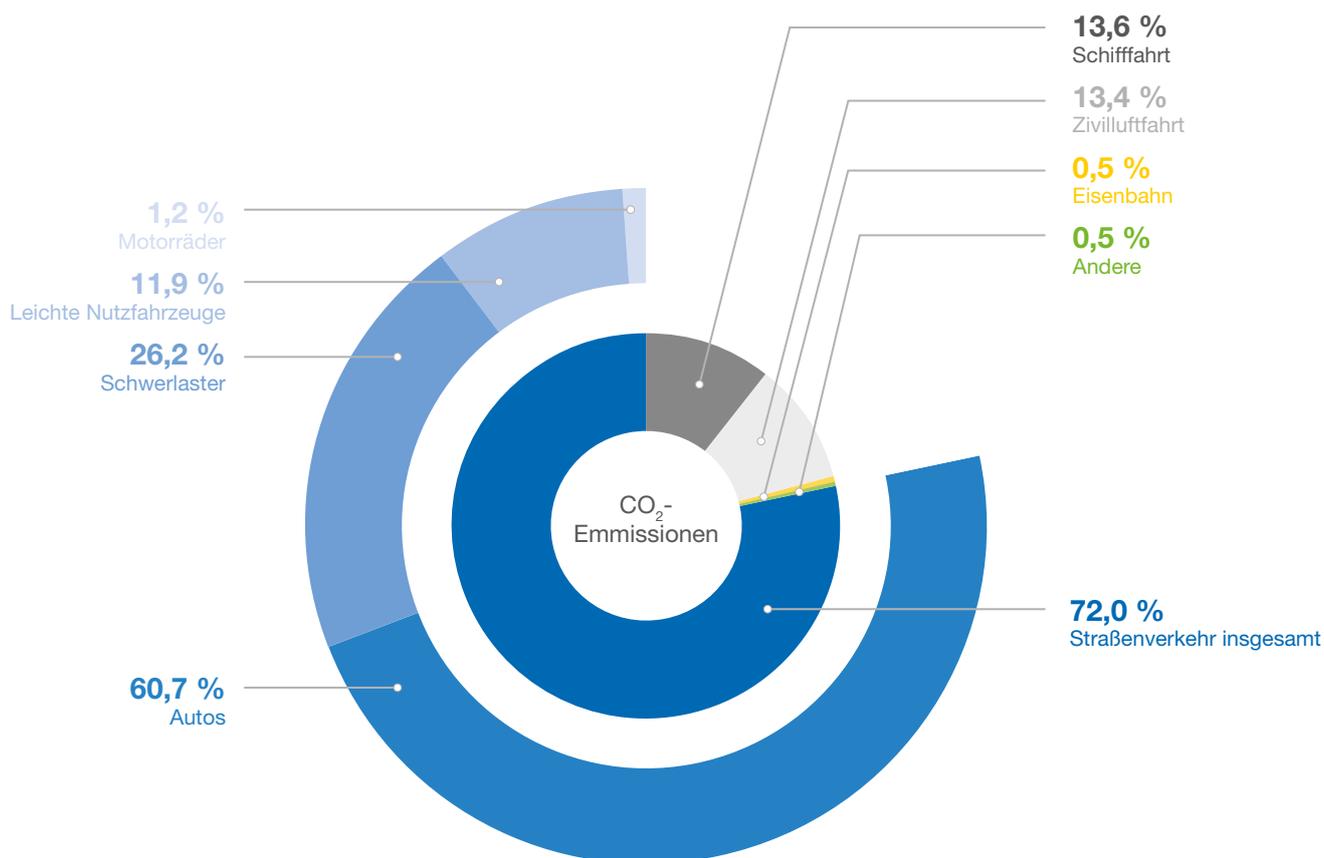


Abbildung 2: Potential zur CO₂-Reduzierung¹

¹ <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissionen-von-autos-zahlen-und-fakten-infografik> (Abruf am 13.10.2020)

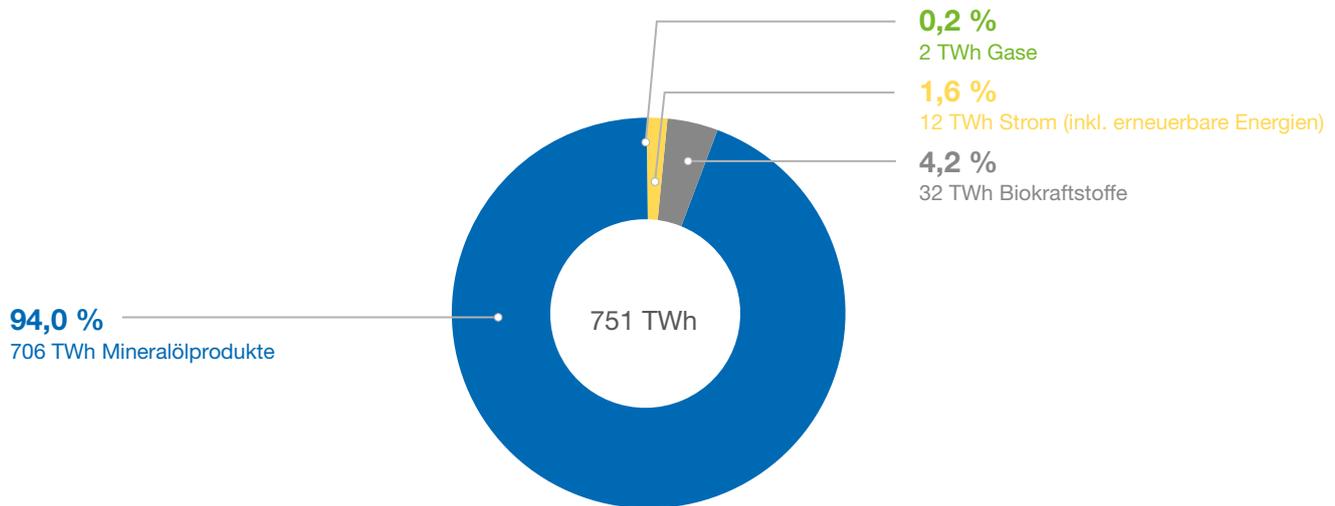


Abbildung 3: Endenergieverbrauch im Verkehrssektor nach Energieträgem²

Im Rahmen des Pariser Klimaabkommens verpflichtete sich die EU, die Treibhausgasemissionen bis 2030 in allen Wirtschaftssektoren um mindestens 40 % gegenüber dem Stand von 1990 zu senken. Auch die Bundesregierung strebt mit dem Klimaschutzprogramm 2030 eine Reduktion der Treibhausgase um 55 % gegenüber dem Basisjahr 1990 an³. Eine vollständig klimaneutrale, deutsche Wirtschaft bis zum Jahr 2050 wäre über das Zwischenziel einer Treibhausgasemissionsreduktion bis 2030 um 65 % möglich⁴.

Im Verkehrssektor ist eine Reduzierung der Treibhausgasemission insbesondere dann möglich, wenn der straßengebundene Verkehr in großen Teilen elektrifiziert wird und weitere alternative Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien genutzt werden (→ Abbildung 2).

Aktuell wird die Antriebsenergie von Fahrzeugen überwiegend aus fossilen Kraftstoffen bezogen⁵, welche zu erheblichen langfristigen Umweltschäden beitragen. Während Benzin- und Dieselmotoren seit rund hundert Jahren etabliert sind und eine stetige Optimierung erfahren haben, hinken andere Antriebsarten und Energieträger dieser Entwicklung noch hinterher.

Der **Verkehrssektor** ist in Deutschland der verbrauchsintensivste Sektor mit 30,1 % des Energieverbrauchs, dicht gefolgt von Industrie (29,5 %) und privaten Haushalten (25,5 %) sowie Gewerbe, Handel und Dienstleis-

tungen (15 %). Es werden zu über 90 % aus Mineralöl gewonnene Kraftstoffe eingesetzt; reine Biokraftstoffe und Strom spielen bislang nur eine geringfügige Rolle (→ Abbildung 3). Fast die gesamte im Verkehr eingesetzte Energie wird zur Erzeugung von mechanischer Energie verwendet, wovon bei Verbrennungsmotoren durchschnittlich weniger als die Hälfte für den Antrieb umgewandelt wird. Ein großer Anteil geht als Abwärme verloren.⁶

Anders als in den übrigen Sektoren ist der CO₂-Ausstoß im Verkehrssektor, sowohl wegen des zunehmenden Pkw- und Schwerlastverkehrs als auch wegen des zunehmenden Kraftstoffverbrauchs der einzelnen Fahrzeuge, seit Beginn der 1990er Jahre angestiegen (→ Abbildung 4). Wird der Verkehr EU-weit betrachtet, so wird deutlich, dass der Verkehrssektor auch dort aktuell für fast 30 % der gesamten CO₂-Emissionen der EU verantwortlich ist. Daraus entfallen 72 % auf den Straßenverkehr. Im Rahmen der Bemühungen zur Verringerung der CO₂-Emissionen setzte sich die EU das Ziel, die Emissionen des Verkehrs bis 2050 um 60 % gegenüber dem Stand von 1990 zu senken. Bisher wurden die vielfältigen Bemühungen sowohl auf staatlicher als auch auf marktlicher Seite jedoch vom steigenden Mobilitätsbedarf der Bevölkerung konterkariert. Das Reduzierungsziel der EU umzusetzen, gestaltet sich so immer schwieriger. Die Verbesserungshübe bei der Kraftstoffeffizienz von Neuwagen werden immer flacher und können den zusätzlichen CO₂-Ausstoß des

2 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren> (Abruf am 13.10.2020)

3 <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578> (Abruf am 01.12.2020)

4 https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB_V111.pdf (Abruf am 01.12.2020)

5 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren> (Abruf am 13.10.2020)

6 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren> (Abruf am 13.10.2020)

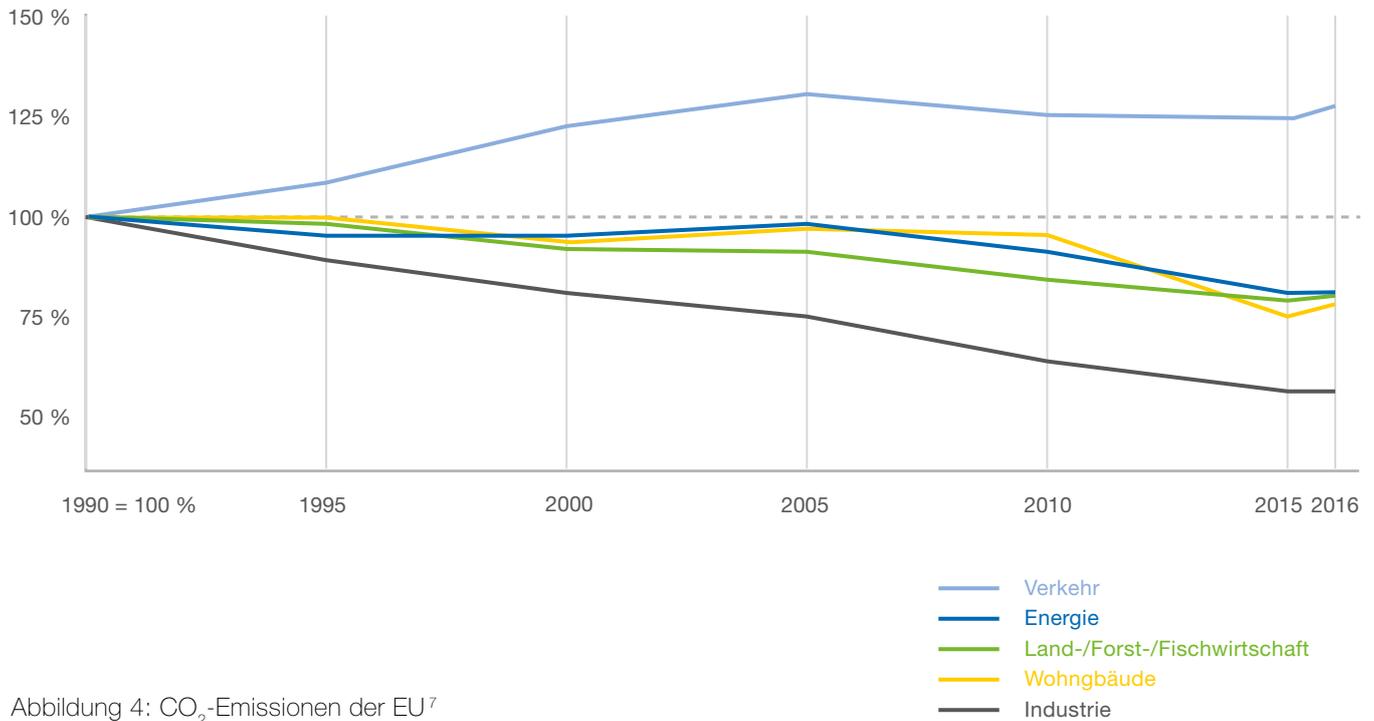


Abbildung 4: CO₂-Emissionen der EU⁷

weiterhin anwachsenden Verkehrs nicht mehr ausgleichen. Nach einem stetigen Rückgang des Ausstoßes emittierten die neu zugelassenen Autos im Jahr 2017 durchschnittlich etwa 0,4 Gramm CO₂ pro Kilometer mehr als im Jahr 2016. Das 60 %-Ziel der EU lässt sich allein durch Effizienzsteigerungen nicht erreichen.

Um dieser stagnierenden Entwicklung entgegenzuwirken, führte die EU 2019 neue, striktere CO₂-Emissionsziele ein. Sie zielen darauf ab, die schädlichen Emissionen von neuen Straßenfahrzeugen zu reduzieren. So nahmen die Abgeordneten unter anderem einen Vorschlag an, die CO₂-Emissionen neuer Lkw bis 2030 um 30% gegenüber den Emissionswerten von 2019 zu senken.⁸

Um diese Ziele zu erreichen bieten sich als Alternativen verschiedene Energieträger und damit verbundene Antriebsformen an. Dazu zählen die bereits technisch und marktlich verfügbaren Anwendungen der Elektromobilität (Ladesysteme, Batteriesysteme etc.), aber auch Wasserstoff-Anwendungen oder alternative Kraftstoffe (e-Fuels, Bio-Fuels). Eine detaillierte Betrachtung dieser Alternativen erfolgt in → Kapitel 3.

7 <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/priorities/klimawandel/20190313STO31218/co2-emissionen-von-autos-zahlen-und-fakten-infografik> (Abruf am 13.10.2020)

8 <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/priorities/klimawandel/20190313STO31218/co2-emissionen-von-autos-zahlen-und-fakten-infografik> (Abruf am 13.10.2020)

3. Energieträger und Antriebsformen

Im Folgenden werden drei grundlegend unterschiedliche Energieträger für die zukünftige Mobilität vorgestellt. → Kapitel 3.1 befasst sich mit Batteriesystemen, die sich für den Einsatz in Elektrofahrzeugen eignen. Zudem werden hier Zelltechnologien und deren Entwicklungstrends sowie Aspekte der Fertigung bis hin zum Ende der ersten Lebensphase, Zweitanwendung und Recycling beschrieben. Daran anschließend folgt in → Kapitel 3.2 eine Übersicht zum Thema Wasserstoff als alternativer Energieträger für Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle und als Schlüsselkomponente für die Vollendung der Energiewende. Schließlich werden in → Kapitel 3.3 alternative Kraftstoffe mit ihren Vor- und Nachteilen sowie einer Einschätzung zu ihrem Entwicklungsstand dargestellt.

3.1 Batteriesysteme für die Elektromobilität

Die Elektromobilität kann einen erheblichen Beitrag zur CO₂-Reduzierung und langfristigen Klimaneutralität leisten. Im Jahr 2019 betrug die Anzahl an Elektrofahrzeugen weltweit 4,79 Millionen (→ Abbildung 1). Bis zum Jahr 2030 wird ein Anstieg auf 150 Millionen Elektrofahrzeuge geschätzt⁹. Für die Elektrifizierung der Fahrzeuge werden Akkumulatoren eingesetzt, die als Schlüsselfaktor für die erfolgreiche Mobilitätswende angesehen werden. Mit aktuell ca. 40 % der Wertschöpfung stellt die Traktionsbatterie einen wesentlichen Teil der Kosten des Elektroautos dar.¹⁰ Die Anforderungen

an die Batterie eines Elektrofahrzeuges sind vielfältig wie beispielsweise hohe Reichweite, Langlebigkeit ohne Leistungsverlust, geringes Volumen und hohe gravimetrische Energiedichte (Energieinhalt pro Masse in kWh/kg).

Lithium-Ionen-Batterie

Derzeit wird für den Antrieb von batterieelektrischen Fahrzeugen auf die Lithium-Ionen-Technologie gesetzt. In einer Lithium-Ionen-Zelle befindet sich wasserfreier Elektrolyt, der für den Ladungstransport zwischen der positiven und

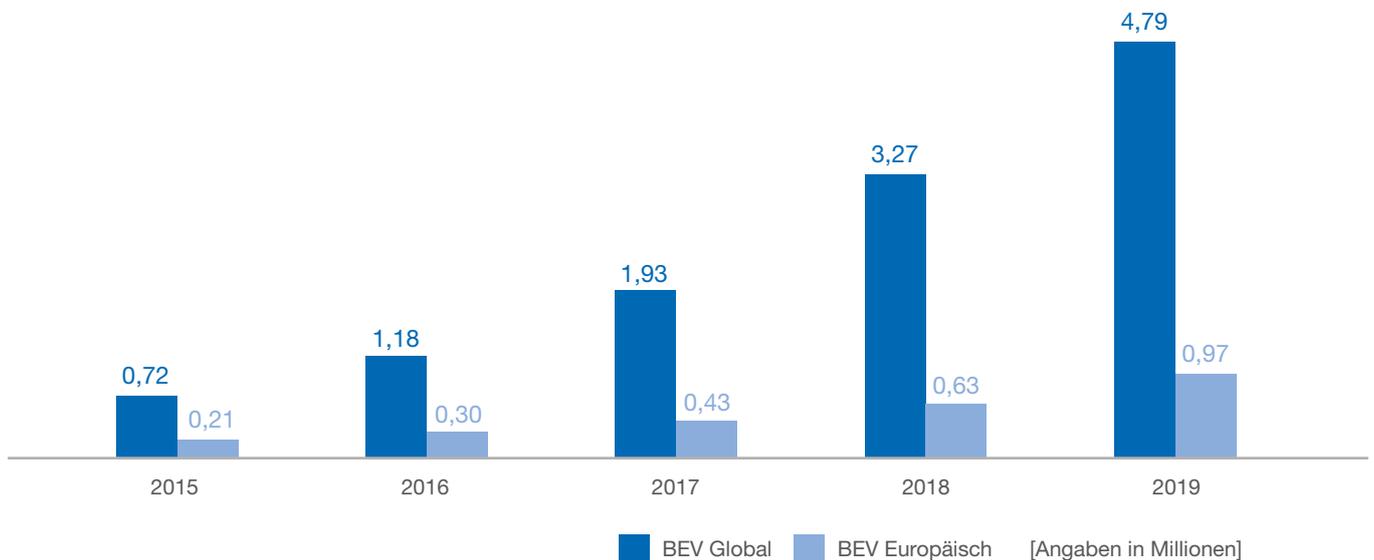


Abbildung 5: Anzahl der Elektrofahrzeuge „Global“ und „Europäisch“¹¹

9 <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019> (Abruf am 09.11.2020)

10 <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/batteriezellfertigung.html> (Abruf am 22.10.2020)

11 <https://www.iea.org/> (Abruf am 09.11.2020)

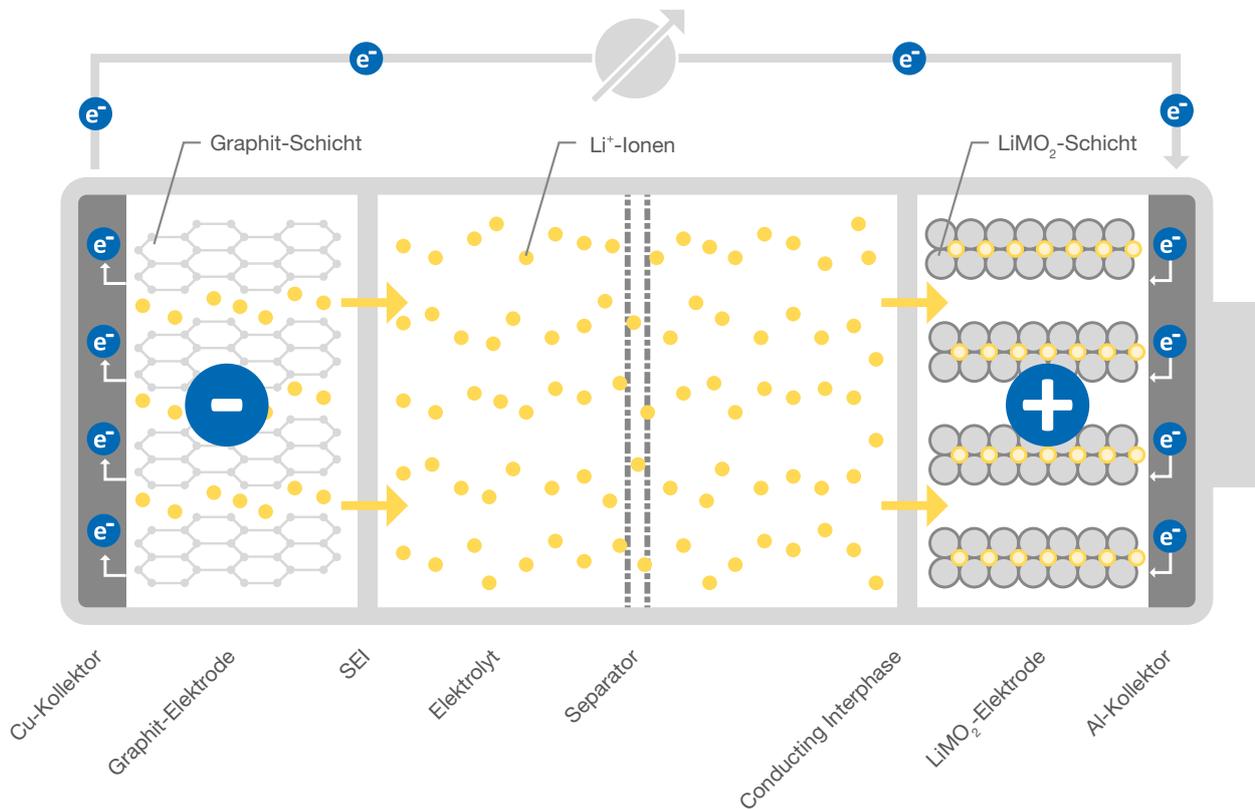


Abbildung 6: Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle beim Entladevorgang¹²

der negativen Elektrode der Zelle zuständig ist. Damit es nicht zu einem Kurzschluss kommt, werden die beiden Elektroden durch einen Separator – einer für Lithium-Ionen durchlässige Membran – physisch voneinander getrennt.

Die Elektrode, an der beim Entladen die chemische Reduktion ihres aktiven Materials stattfindet, wird als Kathode der Zelle bezeichnet. Die andere Elektrode ist die Anode, deren aktives Material Graphit beim Entladen oxidiert wird.

→ Abbildung 6 zeigt den Aufbau und die Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle mit folgenden Materialien als Zellkomponenten:

- Lithium-Kobaltoxid als Kathodenmaterial,
- Graphit als Anodenmaterial,
- Gemisch organischer Karbonate, inklusive Ethylenkarbonat, als Elektrolyt.

Weitergehende Informationen zu Lithium-Ionen-Akkumulatoren finden Sie im „Lithium-Ionen-Kompendium“.

Kathodenmaterial

Die Wahl des Materials einer Kathode beeinflusst das Leistungsverhalten der Zelle zum Beispiel hinsichtlich der Zyklenstabilität, Energiedichte und Kosten. Jedoch lassen sich nicht alle Leistungskriterien in einem Kathodenmaterial vereinen, denn die entsprechenden Eigenschaften sind bei verschiedenen Kathodenmaterialien unterschiedlich stark ausgeprägt. Auch die Anwendung gibt Kriterien für das Kathodenmaterial vor.

In der Elektromobilität dominiert der Einsatz von Kobalthaltigen Kathodenmaterialien. Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA) ist eine stabile Kombination und weist eine hohe Energie- und Leistungsdichte auf. Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) zeigt wie NCA eine gute Stabilität in der Zusammensetzung, ist aber langlebiger als der NCA-Typ. Viele Elektroauto-Hersteller setzen auf den Einsatz von Batterien des NMC-Typs. Kathoden mit hohem Nickel-Anteil gewinnen immer mehr Marktanteil. Je größer der Nickel-Anteil, desto höher ist die Energiedichte, also die Menge an speicherbarer Energie. Nickel ist außerdem günstiger als Kobalt. Jedoch sinkt die Zyklenfestigkeit, je größer der Nickel Anteil ist.

12 Kompendium: Li-Ionen-Batterien im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic (Stand Juli 2015)

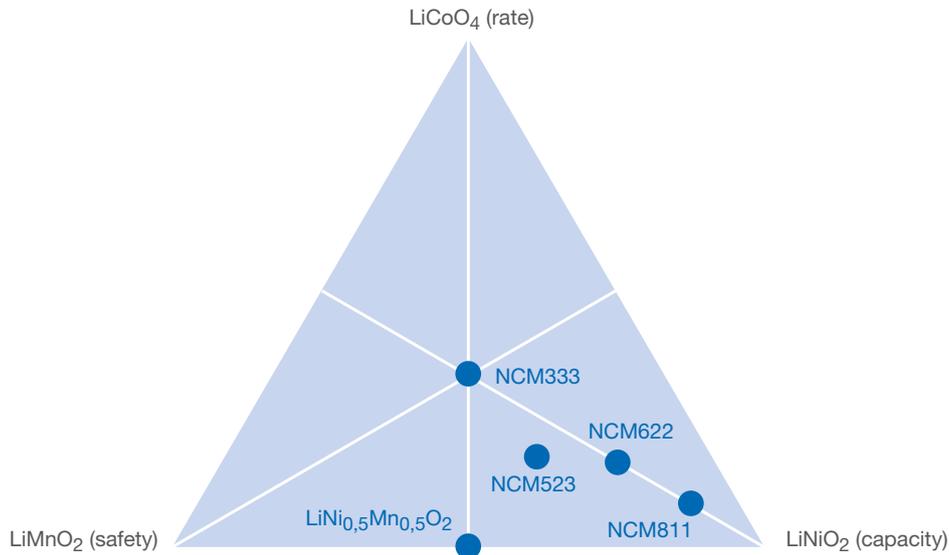


Abbildung 7: Phasendiagramm Mischung der Übergangsmetalle Ni, Co und Mn

Batterien mit einem Nickel-Mangan-Kobalt-Verhältnis von 6 : 2 : 2 (NMC-622), 5 : 3 : 2 (NMC-532) finden bereits Anwendung und es wird der Sprung zur Variante 8 : 1 : 1 (NMC-811) angestrebt.

Eine Verschiebung des Mischungsverhältnisses zu Gunsten eines bestimmten Merkmals geht zu Lasten der anderen Merkmale. Dieser Zusammenhang wird in → Abbildung 7 anhand eines Phasendiagramms illustriert. Beispielsweise weist nickelreiches Material wie NCM-811 den Vorteil deutlich höherer Energiedichte (capacity) auf, hat jedoch deutliche Nachteile hinsichtlich der Zyklenfähigkeit (rate) und der Sicherheit (safety). Der hohe Nickelanteil führt langfristig zur Zersetzung der Kristallstruktur des Materials und damit langfristig zum Verlust an Kapazität, also Lebensdauer. Andere relevante Mischungen reihen sich im Wesentlichen an der Kompromisslinie zwischen „rate“ und „safety“ auf.¹³

Anodenmaterial

Die Anode der Lithium-Ionen-Zelle besteht aus einer Kupferfolie und einer Schicht aus Kohlenstoff oder Lithium-legiertem Material. In ihr werden während des Ladens die für die Leistungsbereitstellung benötigten Lithium-Ionen eingelagert. Graphitanoden sind gängig, da sie ein niedriges Elektrodenpotenzial und eine geringe Volumenausdehnung bei der Einlagerung von Lithium-Ionen aufweisen.¹⁴

Metallisches Lithium wird als Anode aktuell hauptsächlich für die Produktion von Primärbatterien (nicht wieder aufladbare Batterien) verwendet. Zukünftig soll das Anodenmaterial auch für die Produktion von Sekundärbatterien (wieder aufladbare Batterien) eingesetzt werden. Metallisches Lithium weist eine hohe Energie- und Leistungsdichte und außerdem ein geringes Gewicht auf. Die Herausforderung liegt beim Ladevorgang. Die Gefahr besteht darin, dass sich das Lithium nicht gleichmäßig auf der Anode abscheidet und es zur Dendriten-Bildung an der Anodenoberfläche kommen kann. Dendriten sind nagelförmige Gebilde, welche – vereinfacht dargestellt – den Separator durchstoßen und einen Kurzschluss verursachen können. Forscher versuchen eine Lösung zu finden, welche z. B. durch Kombination mit keramischen Festkörpern den Einsatz von Lithium-Metall möglich macht.

Als weitere Möglichkeiten bieten sich Anodenmaterialien auf Silizium-Basis an. Silizium-Kohlenstoff-Komposite beispielsweise stellen eine Kombination von Graphit mit Anteilen von Silizium dar. Die volumetrische Energiedichte (Energie pro Volumen) von Silizium ist deutlich höher als die von Graphit. Der Einsatz von Silizium als Anodenmaterial befindet sich jedoch noch in der Entwicklung, da die Volumenänderung der Anode während des Be- und Entladevorgangs noch Schwierigkeiten bereitet.

¹³ VDE-Studie Batteriesysteme für Schienentriebzüge; Stand: 27. August 2018

¹⁴ Kompendium: Li-Ionen-Batterien im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid-Smart Traffic. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen; Stand: Juli 2015

Forschung zu zukünftigen Batterietechnologien

In den vergangenen Jahren haben die Forschungsaktivitäten zur Untersuchung bestehender Materialien wie auch grundlegend neuer Materialien zugenommen. Die folgenden Batterietechnologien geben einen Ausblick auf die Weiterentwicklung heutiger Lithium-Ionen-Technologien und neue Zellchemien.

Bei Lithium-Schwefel-Akkus besteht das Kathodenmaterial aus einer Mischung von Schwefel und Kohlenstoff. Da Schwefel ein nicht leitfähiges Material ist, wird es in ein leitfähiges Graphitgitter eingebettet. Der Elektrolyt ist ein organisches Lösungsmittel mit Leitsalzen oder ein Festkörperelektrolyt. Das Anodenmaterial besteht aus Lithium-Metall. Vorteile von Lithium-Schwefel-Batterien sind ihre potenziell hohen gravimetrischen Energiedichten (W/kg)¹⁵ und niedrigen Rohstoffkosten von Schwefel. Als nachteilig erweist sich die geringe volumetrische Energiedichte (W/l)¹⁶, die geringere Leistung im Vergleich zu kommerziellen Lithium-Ionen-Batterien sowie die geringe Lebensdauer. Deshalb kommt die Technologie in heutigen Elektrofahrzeugen nicht zum Einsatz und es bedarf weiterer Forschung.

Auch an Lithium-Luft-Batterien wird noch geforscht. Die Anode besteht aus metallischem Lithium, der Elektrolyt aus einem Festkörperelektrolyt oder einem Lithium-Ionen enthaltenden Leitsalz und die Kathode aus einem luftdurchlässigen, nanoporösen Kohlenstoffgitter. Der für die Reaktion erforderliche Sauerstoff wird aus der Luft entnommen. Durch das hohe elektrochemische Potenzial von Lithium bietet das System theoretisch hohe gravimetrische Energiedichten (bis zu 900 Wh/l und 450 Wh/kg)¹⁷. Mangelnde Zyklenstabilität und hohe Verlustspannungen beim Laden sind Herausforderungen, die weitere Entwicklungsarbeit erforderlich machen.

Die Entwicklung von Feststoffbatterien zielt auf die Nutzung von festen polymeren, hybriden oder keramischen Elektrolyten ab. Auch die Elektroden bestehen aus einem festen Material, z. B. aus Lithium-Metallanode, und einer Hochenergiekathode. Neben erhöhter Sicherheit zeichnet sie sich durch eine hohe Zyklenstabilität und Energiedichte aus. Durch die Kombination von neuen Anodenmaterialien, beispielsweise Lithium-Metall mit Festkörperelektrolyt, lässt sich die Energiedichte der Zelle steigern. In der Praxis müssen dafür allerdings noch die Produktionsverfahren für die

Umsetzung definiert werden. Der Einsatz im Anwendungsfeld der Elektromobilität wird nicht vor dem Jahr 2030 erwartet.¹⁸

Batteriezellfertigung

Derzeit haben sich asiatische Hersteller in der Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien einen Wissensvorsprung vor deutschen Zellherstellern erarbeitet. Um die Abhängigkeit vom asiatischen Markt zu reduzieren, investieren Bund, Länder und die deutsche Industrie vermehrt in den Knowhow-Aufbau für die Zellherstellung.¹⁹ Forschungsansätze sollen über das Stadium der Laborreife hinaus in eine Pilotfertigungsanlage und letztlich in die industrielle Serienfertigung überführt werden. Ziel ist eine Forschungs- und Fertigungslandschaft, welche der Elektrofahrzeugindustrie den Weg für eine ökonomische und ökologische Batterieherstellung ebnet. → Abbildung 8 gibt eine Übersicht der geplanten Zellhersteller in Deutschland.

Für die konkurrenzfähige Zelle aus Deutschland kommt es auf den Preis und die Qualität an.

Um die Produktionskosten zu optimieren empfehlen die Experten des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI eine vertiefte „[...] *Manufacturing-Betrachtung (inkl. Kostenoptimierung auf den unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen) und eine Hochskalierung der Produktion ebenso wie eine Kostensenkung durch Standardisierung [...]*“.²⁰ Ziel für das Jahr 2030 ist ein Preis von ca. 100 Euro pro Kilowattstunde Energieinhalt der Batterie. Ende 2020 kostet jede Kilowattstunde noch rund 200 Euro.

Die EU fördert zukünftig in großem Maße die konkurrenzfähige Batteriezellfertigung und damit verbunden auch die komplette Wertschöpfungskette in Europa. Mit Beschluss vom 09.12.2019 werden bis zu 3,2 Mrd. Euro als Fördermittel in den beteiligten Ländern (Deutschland, Frankreich, Italien, Polen, Belgien, Schweden, Finnland) zur Verfügung gestellt. Auf Deutschland entfallen bis zu 1,25 Mrd. Euro (Förderobergrenze), die als erlaubte staatliche Beihilfen beigesteuert werden können. Ziele sind unter anderem die Fertigung innovativer Batteriezellen, sowohl für den Einsatz in Fahrzeugen als auch in Elektrowerkzeugen, und die Entwicklung sicherer Recycling-Verfahren.^{21, 22}

15 https://battery2030.eu/digitalAssets/861/c_861008-l_1-k_roadmap-27-march.pdf (Abruf am 02.12.2020)

16 https://battery2030.eu/digitalAssets/861/c_861008-l_1-k_roadmap-27-march.pdf (Abruf am 02.12.2020)

17 https://battery2030.eu/digitalAssets/861/c_861008-l_1-k_roadmap-27-march.pdf (Abruf am 02.12.2020)

18 <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/GRM-ESEM.pdf> (Abruf am 02.12.2020)

19 <https://www.bmbf.de/de/karliczek-deutschland-ist-heute-wieder-hotspot-12069.html> (Abruf am 09.10.2020)

20 <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/GRM-ESEM.pdf> (Abruf am 02.12.2020)

21 <https://www.automobil-produktion.de/hersteller/wirtschaft/milliardenschwere-foerderung-fuer-batteriezellfertigung-108.html> (Abruf am 01.12.2020)

22 <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/batteriezellfertigung.html> (Abruf am 01.12.2020)

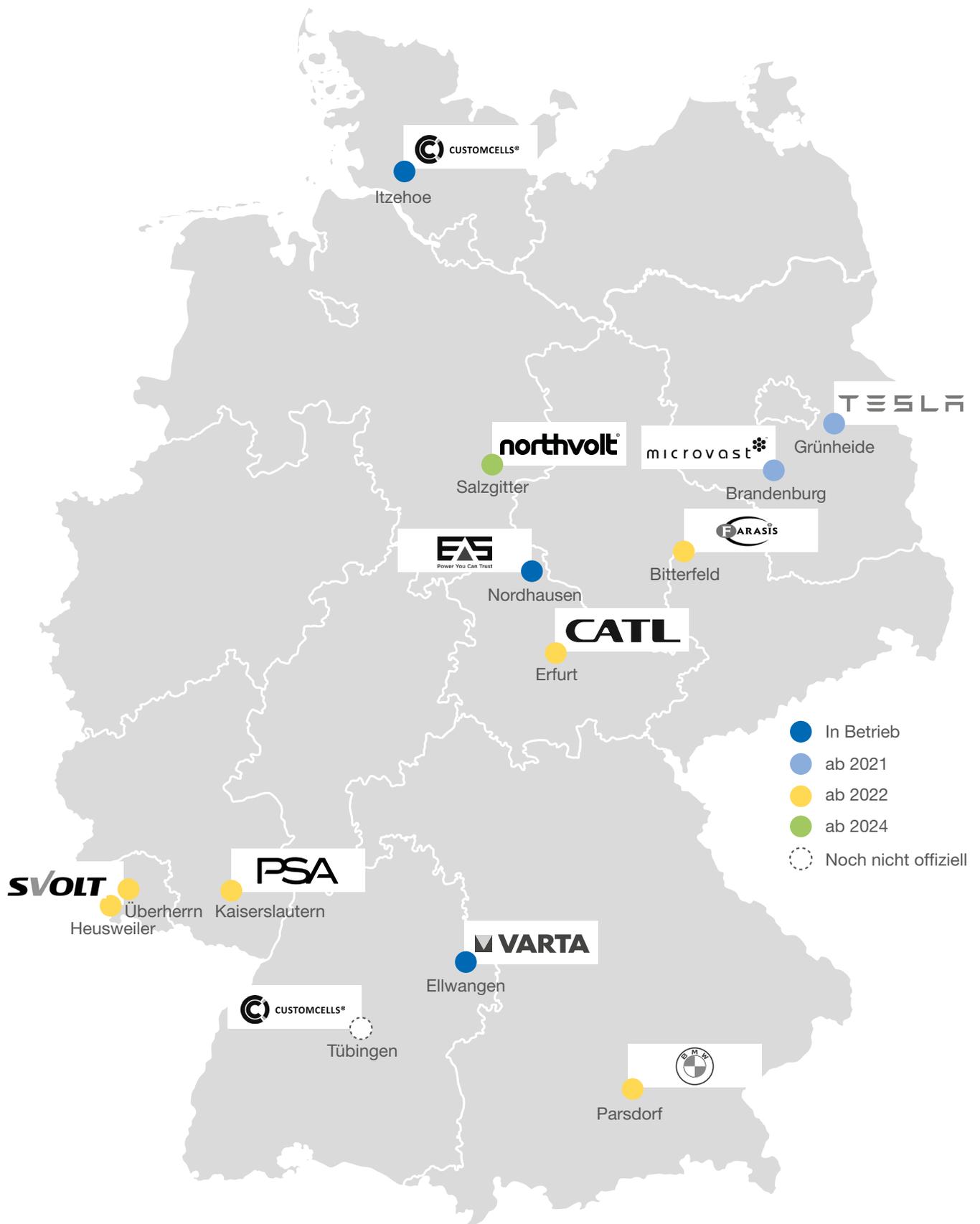


Abbildung 8: Batteriezellfertigung in Deutschland

CO₂-Bilanz und Recycling

Das Bundeswirtschaftsministerium legt in seinen Thesen zur industriellen Batteriezellfertigung in Deutschland und Europa den zusätzlichen Fokus auf die „nachhaltigen und umweltverträglichen Produktions- und Entsorgungsbedingungen, z. B. geringer CO₂-Ausstoß bei der Produktion [...] in der gesamten Wertschöpfungskette der Batterieherstellung [...]“.²³

Aufgrund der Klimaschutzziele der Bundesregierung und angesichts der wachsenden Bedeutung des Themas Klimaschutz bemühen sich viele Unternehmen um eine Reduzierung ihrer Emissionen. Zu den wichtigsten Möglichkeiten, wie diese ihren Teil zur Erreichung der Klimaziele beitragen können, zählen der konsequente Einsatz erneuerbarer Energien, gesteigerte Energieeffizienz sowie neue Produktionsverfahren. Wird bei der Produktion auf einen hohen Anteil an erneuerbarer Energie gesetzt, wie beispielsweise durch eigenerzeugten Strom aus Solaranlagen oder dem Bezug von Ökostrom, senkt dies die CO₂-Bilanz.

Weitere Ansatzpunkte sind die Lieferketten, Subunternehmen und die Rohstoffgewinnung. Bei der Gewinnung der Rohstoffe können die CO₂-Emissionen beispielsweise durch Recycling reduziert werden. Mit steigender Anzahl von Elektroautos steigt zugleich die Nachfrage für die Entsorgung von Traktionsbatterien. Noch hat die Politik Zeit für die Erarbeitung regulatorischer Rahmenbedingungen. Lithium-Ionen-Batterien zeichnen sich durch eine lange Lebensdauer (abhängig vom Nutzungsverhalten) aus, daher werden noch einige Jahre vergehen, bis die erste größere Welle der Akkus recycelt wird.

Das End of Life des sogenannten „First Life“ (1. Lebenszyklus) wird als erreicht angesehen, wenn je nach Anwendung die verfügbare Kapazität auf 70–80 % der Nennkapazität gefallen ist. Dies bedeutet jedoch noch nicht, den Akku sofort recyceln zu müssen. Es bietet sich die Möglichkeit einer Zweitanwendung an, dem „Second Life“. Hierfür wird die Batterie nach der Erstanwendung hinsichtlich ihres „State of Health“ (Gesundheitszustand) untersucht. Entspricht der Gesundheitszustand der Batterie den Anforderungen für das Second Life kann diese in einer Anwendung zum Einsatz kommen, die eine geringere Kapazität erfordert, beispielsweise als stationärer Energiespeicher. Erst zum Ende des Second Life wird die Batterie dem Recyclingprozess zugeführt. Deutsche Autohersteller wie auch das Bundeswirtschaftsministerium streben eine 90%ige Recycling-Quote an. Anfangs sollen Pilotanlagen errichtet und diese langfristig in industrie-fähige Anlagen überführt werden.

Durch das Recycling können wertvolle Rohstoffressourcen wie Kobalt, Kupfer und Nickel zurückgewonnen und in den Wertstoffprozess zurückgeführt werden.

3.2 Wasserstoff für mobile Anwendungen

Batteriebetriebene Fahrzeuge auf der Straße oder Schiene finden – auch dank stetig wachsender Ladeinfrastruktur – zunehmende Akzeptanz, begleitet von viel Optimismus seitens der Politik und der Medien. Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge hingegen haben es heute noch schwer, eine größere Anhängerschaft zu gewinnen, weil sie im Vergleich zu Batteriefahrzeugen viele Nachteile zu haben scheinen, wie den höheren Energieverbrauch, den teureren Kraftstoff, den komplexeren Antrieb oder die erforderliche neue Tank-Infrastruktur. Dennoch hebt die Politik in ihrer *Nationalen Wasserstoffstrategie* (NWS)²⁴ die besondere Bedeutung von elektrolytisch erzeugtem „grünem“ Wasserstoff hervor, der eine Voraussetzung für die Vollendung der Energiewende und Erreichung der Klimaziele sei: „Grüner“ Wasserstoff kann für eine sehr enge Verzahnung der Hauptverbrauchsbereiche Strom, Verkehr, Industrie und Wärme – die *Sektorenkopplung* – sorgen.

Wasserstoff und seine systemische Bedeutung

Wasserstoff ist mit 93 % das häufigste aller Elemente im Universum. In der Erdkruste ist dessen Anteil wesentlich geringer: Hier dominieren Sauerstoff, Eisen und Silizium. Wasserstoff kommt auf der Erde fast nur chemisch gebunden vor, in Form von Wasser und Kohlenwasserstoffen, organischen Molekülen oder Mineralien. Freier Wasserstoff ist unter irdischen *Normalbedingungen* ein farb- und geruchloses Gas von zweiatomigen Molekülen (H₂). In der Gegenwart von offenem Feuer, Funkenschlag oder Glut reagiert Wasserstoffgas explosionsartig mit Luft-Sauerstoff (O₂) zu Wasserdampf (H₂O).

In der Grundstoff-Industrie dient Wasserstoff als Basis für die Erzeugung von Stoffen wie Ammoniak, Anilin, Methanol und anderen, welche in der Verarbeitenden Industrie für die Herstellung höherwertiger Stoffe und Produkte verwendet werden. In der Petrochemie wird Wasserstoff für die Zerlegung von hochmolekularen Kohlenwasserstoffen im Schweröl benötigt (Hydro-Cracking), um Zwischenprodukte für die Herstellung von Benzin, Dieselmotorkraftstoff oder Kerosin zu erzeugen. Diese Industriezweige haben heute einen jährlichen Bedarf an gasförmigem Wasserstoff von ca. 19 Mrd. Norm-Kubikmetern (Nm³).²⁵

23 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/thesen-zur-industriellen-batteriezellfertigung-in-deutschland-und-europa.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (Abruf am 11.10.2020)

24 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>

25 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>

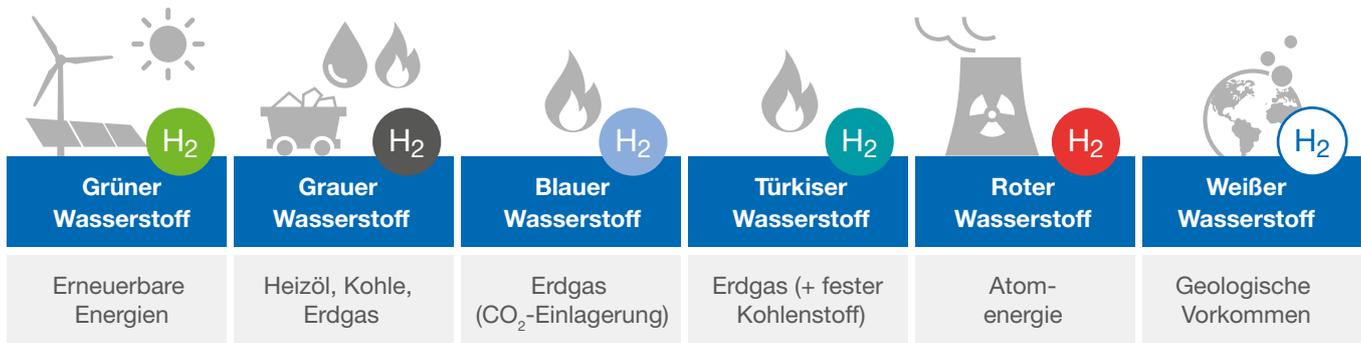


Abbildung 9: Farbschema zu den Grundlagen der Wasserstoffherstellung

Mit Blick auf Energiewende und Klimaschutz hat Wasserstoff inzwischen nicht nur die Bedeutung als Grundstoff, sondern auch als wichtiger Energieträger und flexibler Energiespeicher, insbesondere im Hinblick auf die volatilen erneuerbaren Energiequellen Wind und Sonne. Ein Grund hierfür ist, dass Wasserstoff als leichtestes aller Elemente im Periodensystem zugleich einen der höchsten gravimetrischen (unteren) Heizwerte aufweist, der mit 33,33 kWh/kg fast dreimal höher ist als der von Dieselmotorkraftstoff. Der volumetrische Heizwert von gasförmigem Wasserstoff ist naturgemäß mit 3,00 kWh/Nm³ sehr gering. Um möglichst viel von diesem Gas auf engstem Raum zu verdichten, wird Wasserstoff heute daher entweder stark komprimiert (bis zu 900 bar), extrem gekühlt (auf -252,9 °C) oder in einer speziellen Trägerflüssigkeit (*liquid organic hydrogen carrier*, LOHC)²⁶ gelöst.

Auf die Funktion des Wasserstoffs als Energieträger und -speicher bezogen wird es relevant festzulegen, wie der Wasserstoff erzeugt wird: Die Elektrolyse liegt als geeignetes Herstellungsverfahren nahe. Der mittels erneuerbaren Stroms elektrolytisch generierte Wasserstoff wird auch als **grüner Wasserstoff** bezeichnet.

Der in der Grundstoff- und Petrochemie eingesetzte Wasserstoff wird heute noch ausschließlich durch Dampfreformierung von Erdgas oder partieller Oxidation von Heizöl oder Kohle gewonnen. Bei diesen Verfahren wird eine große Menge klimaschädigendes Kohlendioxid (CO₂) freigesetzt. Der so produzierte Wasserstoff wird auch **grauer Wasserstoff** genannt.

Orientiert am jeweils verwendeten Produktionsverfahren und der entsprechenden Bedeutung im Hinblick auf den Klimaschutz werden noch weitere Wasserstoff-Farben²⁷ unterschieden (→ Abbildung 9):

In einem als *autotherme Reformierung* bezeichneten kombinierten Verfahren aus Dampfreformierung und partieller Oxidation wird Erdgas in Wasserstoff umgewandelt und das entstehende CO₂ abgeschieden, um es zu lagern, statt es in die Atmosphäre entweichen zu lassen (engl. *carbon capture and storage*, CCS bzw. *carbon capture and usage*, CCU). Damit lässt sich der Wasserstoff – bilanziell gesehen – klimaneutral herstellen. Er wird auch **blauer Wasserstoff** genannt.

Es besteht technisch auch die Möglichkeit, die Entstehung von CO₂ gänzlich zu verhindern, indem das Methan im Erdgas in einem Hochtemperaturreaktor in gasförmigen Wasserstoff und festen Kohlenstoff pyrolysiert wird. Der so hergestellte Wasserstoff heißt auch **türkiser Wasserstoff**.

Als weitere Möglichkeit bietet es sich grundsätzlich an, für die Elektrolyse von Wasser auch Strom aus Kernkraftwerken zu beziehen, der dort ohne Bildung von klimaschädigendem CO₂ erzeugt wird. Mittels *Atomstrom* generierter Wasserstoff erhält die Warnfarbe Rot und ist damit **roter Wasserstoff**.

Es gibt auch relevante Vorkommen an molekularem Wasserstoff in der oberen Erdkruste, wie das französische Institut für Erdöl und neue Energien (IFPEN) im Jahre 2013 mitteilte.²⁸ Hiernach finden größere natürliche Wasserstoff-Emissionen sowohl in der Tiefsee als auch auf Peridot-Bergmassiven und in bestimmten Bereichen intrakontinentaler Platten statt, und das in einem Umfang, der eine industrielle Nutzung rechtfertigen würde. Dieses *natürlich* auftretende molekulare Gas wird auch **weißer Wasserstoff** genannt.

26 http://user.fz-juelich.de/record/861708/files/Energie_Umwelt_453.pdf

27 Z. B. <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html>

28 https://www.umweltdialog.de/de/wirtschaft/Innovation-Forschung/archiv/2013-05-02_Der-natuerliche-Wasserstoff.php

Für die Vollendung der Energiewende und den nachhaltigen Schutz des Klimas muss der Verkehr auf Straße, Schiene, Wasser und in der Luft beispielsweise auf Batterie- oder Brennstoffzellenantriebe oder auf die direkte Verbrennung von grünem Wasserstoff oder synthetischen Kraftstoffen umgestellt werden. Auch die Grundstoff- und Petrochemie wird sich zukünftig auf grünen Wasserstoff einstellen müssen.²⁹

Darüber hinaus ist auch die Stahlindustrie gefordert, ihre Roheisen-Erzeugung von Koks auf Wasserstoff umzustellen: In dem üblichen Hochofenverfahren³⁰ wird heute Koks verbrannt, um zum einen die notwendige Wärme für die Reaktion zu schaffen und zugleich Kohlenmonoxid (CO) entstehen zu lassen, das geeignet ist, um Eisenerz, z. B. Eisen(II,III)-oxid ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), zu Roheisen (Fe) zu reduzieren. Die in diesem Verfahren entstehende Menge an klimaschädigendem CO_2 ist enorm. Aktuell bemüht sich die Stahlindustrie daher um die Einführung eines neuen Verfahrens, die *Direktreduktion mit Wasserstoff*. Hier wird anstelle von Koks nun Wasserstoff verbrannt, so dass statt CO_2 lediglich Wasserdampf (H_2O) entsteht. Die benötigte Wärme muss jedoch zusätzlich elektrisch bereitgestellt werden.

Die Beispiele aus der Chemie- und Stahlindustrie zeigen, dass nicht nur erneuerbarer elektrischer Strom, sondern vor allem auch grüner Wasserstoff benötigt wird, um die Energiewende zu schaffen und dem Klimaschutz gerecht zu werden. Das ist eine zentrale Aussage in der Nationalen Wasserstoff-Strategie³¹ (NWS) der Bundesregierung. Entsprechend groß ist der Druck, hinreichende Mengen an grünem Wasserstoff herzustellen und zu verteilen. In Energieeinheiten umgerechnet, entspricht die jährlich allein von der Grundstoff- und Petrochemie benötigte Menge an Wasserstoff 55 TWh (Mrd. kWh). Für das Jahr 2030 wird in der NWS ein Gesamtbedarf an (Elektrolyse-)Wasserstoff von 90–110 TWh prognostiziert. Dafür soll im ersten Schritt in Deutschland bis 2030 eine Elektrolyseur-Leistung von 5 GW installiert werden, mit der sich unter Einsatz von 20 TWh erneuerbarem Strom etwa 14 TWh grüner Wasserstoff herstellen lassen. Weitere 5 GW sollen in den darauffolgenden 5 bis 10 Jahren installiert werden. Da sich selbst mit dieser großen Elektrolyseur-Leistung die allein in Deutschland benötigte Menge an grünem Wasserstoff nicht herstellen lässt, sollen europaweit 40 GW und in Nordafrika zusätzliche 40 GW entstehen.

In den folgenden beiden Abschnitten werden die relevanten Elektrolyse-Verfahren und Brennstoffzellen-Technologien vorgestellt, die als technische Voraussetzung für die Erzeugung von Wasserstoff und dessen Nutzung in mobilen und stationären Anwendungen anzusehen sind.

Elektrolyseur für die Wasserstoff-Herstellung

Wasser-Elektrolyse erlaubt die direkte Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff durch den Einsatz von elektrischer Energie. Die entsprechende Vorrichtung, mit der diese Stoffumwandlung erfolgt, wird *Elektrolyseur* genannt. Ein Elektrolyseur umfasst im Wesentlichen vier Funktionselemente: Kathode, Anode, Separator und Elektrolyt. Die zum Einsatz kommenden verschiedenen Elektrolyse-Verfahren unterscheiden sich im Betriebsdruck und der Betriebstemperatur.³² Vor allem aber werden mit der Wahl des Elektrolyten wesentliche Eigenschaften des Verfahrens festgelegt. Als Wirkungsgrad der elektrolytischen Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser werden in der Literatur 70 bis 80 % genannt.

Bei der *alkalischen Elektrolyse*³³ (AEL) dient Kalilauge (KOH; 20–40 Gew.-%) als Elektrolyt. Kathode und Anode sind durch ein Diaphragma getrennt, das OH^- -Ionen für den notwendigen Ladungsaustausch durchlässt, aber zugleich die Vermischung der Produktgase verhindert. Die Betriebstemperatur liegt im Bereich 40–90 °C, und es werden Stromdichten von 0,2–0,6 A/cm² erreicht. Kompakte Baugrößen des Elektrolyseurs werden durch hohe Systemdrücke möglich, die bei kommerziellen Anlagen 30 bar und mehr betragen können. Ein Nachteil der AEL ist die Trägheit, mit der das System auf sich ändernde Last bei volatilem Stromangebot – wie es bei Windkraft- und PV-Anlagen der Fall ist – reagiert.

Bei der *PEM-Elektrolyse*^{34, 35, 36, 37} (*proton exchange membrane*) – auch *saure* Elektrolyse genannt – wird eine spezielle Membran eingesetzt, die für Protonen durchlässig ist, nicht jedoch für die Produktgase. An der Vorder- und Rückseite der PEM sind Elektroden angebracht, die mit dem Plus- und Minuspol der Spannungsquelle verbunden sind. Wasser wird an der Anode (Pluspol) vorbeigeführt. Die elektrolytisch abgespaltenen Wasserstoff-Ionen (also Protonen)

29 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>

30 Z. B. <https://de.wikipedia.org/wiki/Hochofen>

31 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>

32 2017_Book_WasserstoffUndBrennstoffzelle.pdf (Springer: Wasserstoff und Brennstoffzellen)

33 <https://www.ffe.de/publikationen/892-elektrolyse-die-schluesselfeldtechnologie-fuer-power-to-x>

34 <https://publications.rwth-aachen.de/record/689617/files/689617.pdf>

35 <https://new.siemens.com/global/de/produkte/energie/erneuerbare-energien/hydrogen-solutions.html#Elektrolyse>

36 <http://publications.rwth-aachen.de/record/661803/files/661803.pdf>

37 <https://igas-energy.de/technologie/pem-elektrolyse>

werden durch die PEM hindurch zur Kathode (Minus-pol) gezogen, wo sie sich zu Wasserstoff-Molekülen neutralisieren und als Gas aufsteigen. Der entstehende Sauerstoff entweicht auf der Anodenseite.

Im Gegensatz zur AEL eignet sich die PEM-Elektrolyse insbesondere, um unregelmäßig erzeugten Wind- und Sonnenstrom aufzunehmen, denn sie kann hoch dynamisch betrieben werden. Die Produktgasqualität bleibt hier – anders als bei der AEL – selbst im Teillast-Betrieb hoch. Die Betriebstemperatur liegt im Bereich 20–100 °C, und es sind hohe Stromdichten von bis zu 2 A/cm² möglich. Für PEM-Elektrolyse-Gesamtsysteme werden – bezogen auf den unteren Heizwert – Wirkungsgrade von 68 bis 72 % als erreichbar angesehen.³⁸

Ein Nachteil der PEM-Elektrolyse ist, dass ihr Elektrolyt ein von frei beweglichen Protonen durchsetztes Wasser (Ionomer) ist, also eine Säure darstellt, welche die beiden Elektroden wie auch die Katalysatorbeschichtung der Membran angreift. Entsprechend werden meist Iridiumoxid (IrO₂) als Anodenmaterial, Platin-Nanopartikel auf Kohlenstoff-Trägermaterial (Pt/C) für die Kathode und reines Platin als Membranbeschichtung verwendet.

Ein drittes zukunftsweisendes Elektrolyse-Verfahren befindet sich gerade im Übergang zwischen Forschung und industrieller Anwendung. Es handelt sich um die Hochtemperatur- oder *SOEC-Elektrolyse (solid oxide electrolyze cell)*, die auf keramischen Feststoffelektrolyten basiert. Es wird mit sehr hohen Temperaturen gearbeitet, so dass ein Teil der für die Spaltung des Wassers benötigten Energie aus der vorhandenen Wärme bezogen wird und damit der Strombedarf geringer ist. Für die Trennung der Halbzellen wird ein festes Oxid verwendet, durch das Sauerstoff-Ionen (O²⁻) hindurchdiffundieren können. Eine Besonderheit dieses Zellentyps ist, dass er in seiner Funktion grundsätzlich umkehrbar ist, das heißt, je nach Betriebsart kann die Festoxid-Zelle (SOC) als Elektrolysezelle oder als Brennstoffzelle verwendet werden. Mit Blick auf den mobilen Einsatz einer SOC könnte sie damit im Prinzip sogar die Rekuperation von Bremsenergie und somit die Rückumwandlung von Wasser in Wasserstoff ermöglichen.

Brennstoffzellen für elektrische Antriebe

Unter einer Brennstoffzelle versteht man eine Vorrichtung, die es erlaubt, einen Brennstoff wie Wasserstoff in einem elektrochemischen Prozess kontrolliert mit Sauerstoff reagieren zu lassen, um die im Wasserstoff gespeicherte Energie in elektrische Energie umzu-

wandeln und diese beispielsweise für den Antrieb eines Elektrofahrzeugs zu nutzen. Die vier wichtigsten Funktionselemente sind wie bei Elektrolyseuren und allgemein bei Batterien: Kathode, Anode, Separator und Elektrolyt. Deren elektrochemischen Eigenschaften bestimmen die Spannung der Zelle und den Strom, den sie bereitstellen kann.³⁹

Je nach Technologie eignet sich eine Brennstoffzelle für stationäre, portable oder mobile Anwendungen. In Fahrzeugantrieben eingesetzte Brennstoffzellen müssen hohe Anforderungen sowohl an die Zuverlässigkeit also auch an den dynamischen Betrieb erfüllen: die Betriebsstundenanzahl und die Leistungsdichte sind wichtigste Kennzeichen zur Charakterisierung von Brennstoffzellen.⁴⁰ Ähnlich wie im Falle von Lithium-Ionen-Batterien oder Elektrolyseuren werden auch Brennstoffzellen entsprechend dem verwendeten Elektrolyten und der Höhe der Betriebstemperatur kategorisiert.

Bei der *alkalischen (Niedertemperatur-)Brennstoffzelle (alkaline fuel cell, AFC)* dient Kalilauge (KOH, 30–45 Gew.-%) als Elektrolyt, der durch die Zelle gepumpt wird. Das Material der Anode, an welcher der Wasserstoff oxidiert wird, ist sogenanntes Rayney-Nickel; das Material der Kathode, an welcher der Sauerstoff reduziert wird, ist Rayney-Silber. Alternativ kommt für die Elektroden auch mit Edelmetallen aktivierter Kohlenstoff zum Einsatz. Die technologie-spezifisch niedrige Betriebstemperatur von bis zu 90 °C macht den Einsatz von Katalysatoren notwendig, um eine ausreichend hohe Geschwindigkeit der elektrochemischen Reaktion zu erzielen. Im Falle der AFC können relativ preiswerte Katalysatoren eingesetzt werden. Mit diesem Zellentyp lassen sich Wirkungsgrade von um die 60 % erzielen.⁴¹

Die Reinheitsanforderungen der AFC an die zugeführten Reaktionsgase sind äußerst hoch, denn CO₂ als Verunreinigung zersetzt den Elektrolyten durch Reaktion zu unlöslichem Karbonat. Um mit Luft für die Zufuhr von Sauerstoff arbeiten zu können, muss das Kohlendioxid zuvor vollständig entfernt werden. Die hohen Anforderungen haben den Einsatz der alkalischen Brennstoffzelle in der Vergangenheit auf die Luftfahrt und die Militärtechnik beschränken lassen. Dank neuerer Entwicklungen hinsichtlich der Toleranz gegenüber Rest-CO₂ findet die AFC inzwischen auch in Bootsantrieben Anwendung.

Die Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (*polymer electrolyte fuel cell, PEFC*) – vielfach auch einfach PEM-Brennstoffzelle genannt – ist als saure Zelle konzipiert. Hier diffundieren Protonen von der Anode ausgehend durch eine dünne, feste, gasdichte Elektrolyt-Membran

38 <https://publications.rwth-aachen.de/record/689617/files/689617.pdf>

39 Töpler, Johannes / Jochen Lehmann: Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven, New York, Vereinigte Staaten: Springer Publishing, 2017

40 https://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resourcen/dokumente/institut/elchemenergietechnik/BWK_05_2016_Wasserstoff.pdf

41 Töpler/Lehmann, 2017

zur Kathode, um dort mit Sauerstoff-Ionen zu Wasser zu rekombinieren. Für die Membran wird meist das Polymer-Material NAFION® der Firma DuPont verwendet. Dieser Membrantyp muss immer eine bestimmte Restfeuchte, also Durchdringung mit Wassermolekülen aufweisen, um dem Funktionsprinzip der Zelle zu genügen. Damit ist die Betriebstemperatur auf maximal 100 °C begrenzt, so dass Katalysatoren für die notwendige Reaktionsgeschwindigkeit der Gase sorgen müssen. Das saure Milieu der Zelle wiederum erfordert, dass die Katalysatoren aus Platin und die Elektroden zu ihrem Schutz vor Korrosion mit Edelmetallen der Platingruppe oder deren Oxiden beschichtet sein müssen. Der in der Praxis erreichte elektrische Wirkungsgrad dieses Brennstoffzellentyps liegt – abhängig auch vom gewählten Arbeitspunkt – bei etwa 60 %.^{42, 43}

Die PEM-Brennstoffzelle eignet sich insbesondere für Fahrzeugantriebe, die die Zelle mit veränderlichem Leistungsbedarf (Stromstärke) belastet. Der grundsätzliche Aufbau der Zelle lässt sich wie folgt skizzieren: Die Elektrolyt-Membran bildet mit den beiden Elektroden eine Membran-Elektroden-Einheit (*membrane electrode assembly*, MEA), die direkt an Gasdiffusions-Schichten ankoppelt und über Dichtungen mit Elektroden-Haltern verbunden ist, welche funktional als Gasverteiler oder Bipolarplatten dienen. Der Zellentyp PEFC ist technisch extrem flach realisierbar, so dass sich eine große Anzahl von Zellen zu sogenannten Stacks übereinanderstapeln lassen, um die gewünschte elektrische Spannung zu realisieren und bestimmte Lasten zu ermöglichen.⁴⁴

Eine dritte erwähnenswerte Technologie ist die Oxidkeramische Brennstoffzelle (*solid oxide fuel cell*, SOFC). Diese wird auch Hochtemperatur-Brennstoffzelle genannt, da sie bei Betriebstemperaturen von 650–1000 °C betrieben wird. Als Elektrolyt kommt hier ein keramischer Werkstoff zum Einsatz, der für Sauerstoff-Ionen (O²⁻) durchlässig ist, jedoch für Elektronen isolierend wirkt. Vorteil dieses Brennstoffzellentyps ist, dass hier nicht nur Wasserstoff, sondern auch Kohlenwasserstoffe als Brennstoffe verwendet werden können. Die hohe Betriebstemperatur erfordert jedoch lange Anlaufzeiten, so dass sich die SOFC heute vor allem für stationäre Anwendungen wie Blockheizkraftwerke oder für die Hausenergieversorgung anbietet.

Wasserstoff-Antriebe – Status Quo und Ausblick

Abgesehen davon, dass grüner Wasserstoff direkt verbrannt werden könnte, um ein Fahrzeug anzutreiben, oder sich für die Herstellung von synthetischem Kraftstoff für konventionelle Verbrennungsmotoren

eignen würde, basiert das etablierte Wasserstoff-Antriebskonzept auf Brennstoffzellen – in der Regel vom Typ PEFC. Brennstoffzellen-Fahrzeuge sind ebenso als Elektrofahrzeuge anzusehen, wie solche mit Traktionsbatterien: Sie werden von einem Elektromotor angetrieben, dessen Energie von einer Brennstoffzelle bereitgestellt wird, die den in einem Hochdrucktank mitgeführten Wasserstoff „verbraucht“ und reinen Wasserdampf als Abgas freisetzt (→ Abbildung 10).

Die Leistungsdichte von PEM-Brennstoffzellen ist mit rund 0,25 Kilowatt pro Kilogramm wesentlich geringer als die von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien (>1 kW/kg). Dieser elektrochemisch bedingte Nachteil erfordert in Beschleunigungsphasen die Unterstützung der Brennstoffzelle durch eine Dynamik-Batterie (auch Hochvolt- oder Puffer-Batterie genannt). Wie groß diese Batterie auszulegen ist, hängt davon ab, wieviel Energiereserven für die Beschleunigung vorgehalten und welcher Anteil der beim Bremsen generierten Energie in die Batterie zurückgespeist werden soll. Je besser von der rekuperierten Energie Gebrauch gemacht wird, umso geringer wird der Wasserstoffverbrauch des Fahrzeugs ausfallen.

Mit dem hochkomprimierten Wasserstoff im Drucktank kann ein Brennstoffzellen-Fahrzeug wesentlich mehr Energie mitführen, als es mit einer Traktionsbatterie sinnvoll möglich wäre. Die damit verbundene höhere Reichweite von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ist ein entscheidender Vorteil gegenüber reinen Batteriefahrzeugen, und das unabhängig davon, ob es sich um Straßen- oder Schienenfahrzeuge handelt. Mit einer typischen Tankfüllung von 5 kg Wasserstoff verfügt ein Brennstoffzellen-Pkw über eine Reichweite von mehr als 500 Kilometern. Ein entsprechender Batterie-Pkw mit einer solchen Reichweite bräuhete eine Batteriegröße von mindestens 100 Kilowattstunden. Der zusätzliche Energiebedarf für dynamisches Fahren sowie für Heizung, Klima etc. geht stets zu Lasten der Batterie-Reichweite, während bei Brennstoffzellen-Autos ein vorübergehend erhöhter Wasserstoffbedarf leichter zu verschmerzen ist.

Rein energetisch betrachtet hat der Antrieb mit Brennstoffzellen allerdings einen klaren Nachteil: Die Konversionsverluste bei der Erzeugung des Antriebsstroms für den Elektromotor lassen den Energiebedarf deutlich ansteigen. Zudem sind die Kosten für die Erzeugung und Bereitstellung von grünem Wasserstoff wirkungsgrad-bedingt grundsätzlich höher als die von grünem elektrischem Strom.

42 Töpler/Lehmann, 2017

43 <https://publications.rwth-aachen.de/record/689617/files/689617.pdf>

44 <https://d-nb.info/991898338/34>

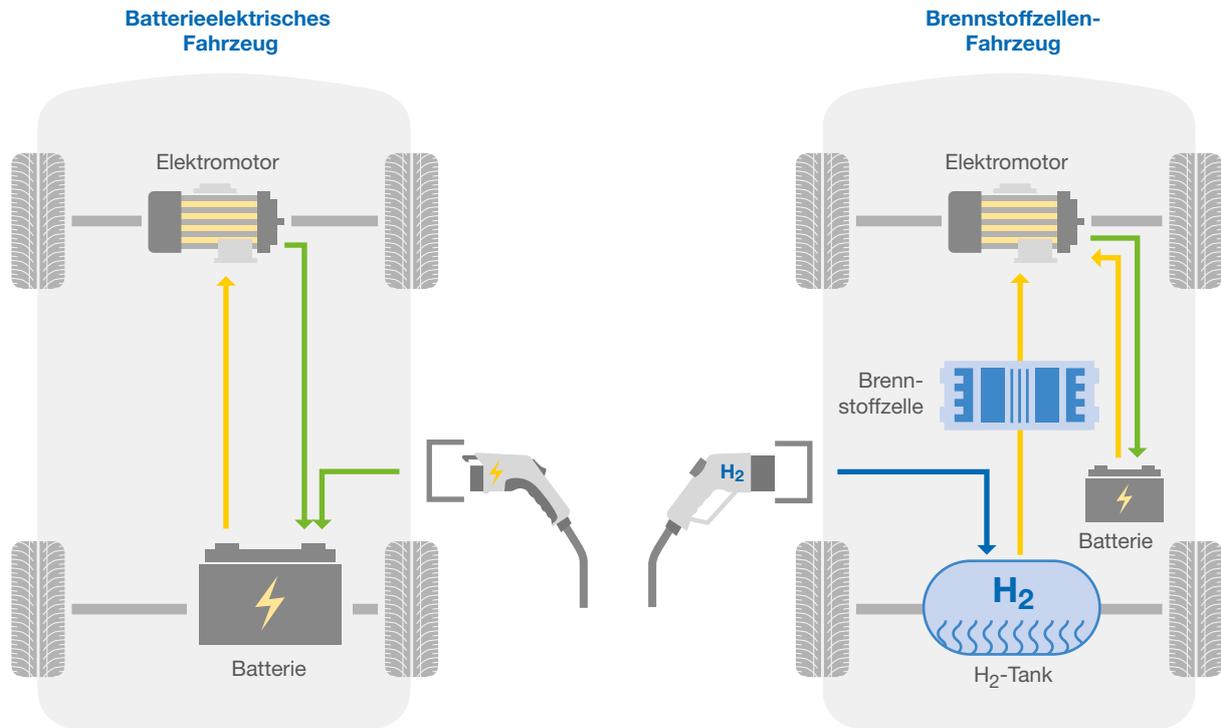


Abbildung 10: Vergleich Antrieb in E-Fahrzeug und Brennstoffzellenauto

Ob ein privat genutztes Fahrzeug mit Batterie oder Brennstoffzelle ausgestattet sein sollte, hängt davon ab, ob die Person vor allem kurze Strecken fährt und das Fahrzeug daher meist steht, oder ob sie ein klassischer Langstreckenfahrer ist. Im Falle von Nutzfahrzeugen, die also beispielsweise Omnibusse, Lkw oder Zugmaschinen sein können, stellen sich die Verhältnisse wesentlich klarer differenzierbar dar. Für die Deutsche Post, beispielsweise, lohnte es sich technisch offenbar, auf Batterie-betriebene Pakettransporter des Typs StreetScooter⁴⁵ zu setzen, der bei einer Höchstgeschwindigkeit von 85 km/h im DHL-Betrieb eine Reichweite von 80 Kilometern hat (mit Work, 20 kWh). Es handelt sich hier um einen Kleinlastler der Gewichtsklasse bis 3,5 Tonnen.

Doch wie verhält es sich bei leichten Lkw (bis 7,5 t), mittelschweren Lkw (bis 18 t) oder schweren Lkw (bis 40 t)? In der Regel werden kleinere und leichtere Lkw als Nahverkehrs- oder Verteiler-Lkw eingesetzt, während schwerere Lkw eher für den Fernverkehr vorgesehen sind. Es ist davon auszugehen, dass im Falle

von Nutzfahrzeugen die Entscheidung Batterien oder Brennstoffzellen-Antrieb nicht nur von der benötigten Reichweite (Unterscheidung zwischen Nahverkehr und Fernverkehr), sondern vor allem auch von der Gewichtsklasse (3,5 t / 7,5 t / 18 t / 40 t)⁴⁶ abhängen wird.

Der Entscheidungskonflikt lässt sich am deutlichsten am Beispiel schwerer Lkw für den Fernverkehr erläutern. 40-Tonner werden heute meist auf langen Autobahnstrecken eingesetzt. Der zu erwartende Energiebedarf eines rein batteriebetriebenen 40 t-Lkw lässt sich anhand bekannter Daten wie folgt abschätzen: der Dieserverbrauch eines 40 t-Lkw liegt bei rund 40 Liter/100 km.⁴⁷ Ein 100 t-Dieseltriebzug (DMU) verbraucht rund 100 Liter/100 km.⁴⁸ Der entsprechende Batteriebetriebene Zug (BEMU) gleichen Gewichtes benötigt im Mittel 500 kWh/100 km.⁴⁹ Somit dürfte der Energiebedarf des Batterie-40t-Lkw um die 200 kWh/100 km betragen. Dafür müsste in der Praxis eine nominale Batteriegröße von 300 kWh vorgehalten werden. Pro 100 km garantierter Reichweite müsste bei einer Energiedichte von rund 150 Wh/kg somit ein Batteriegewicht von mindestens

45 <https://de.wikipedia.org/wiki/StreetScooter>

46 <https://de.wikipedia.org/wiki/Lastkraftwagen>

47 https://www.webfleet.com/de_de/webfleet/blog/so-viel-kraftstoff-verbrauchen-lkw/#:~:text=Mit%20der%20Fahrzeuggr%C3%B6%C3%9Fe%20steigt%20auch,25%20Liter%20pro%20100%20Kilometer

48 <https://www.vde.com/resource/blob/1979350/a41e9c3559af76fee9c91befbc1e9216/studie-klimaneutrale-alternative-zu-dieseltreibzeugen-data.pdf> (Abruf am 02.12.2020)

49 <https://www.vde.com/resource/blob/1979350/a41e9c3559af76fee9c91befbc1e9216/studie-klimaneutrale-alternative-zu-dieseltreibzeugen-data.pdf> (Abruf am 02.12.2020)

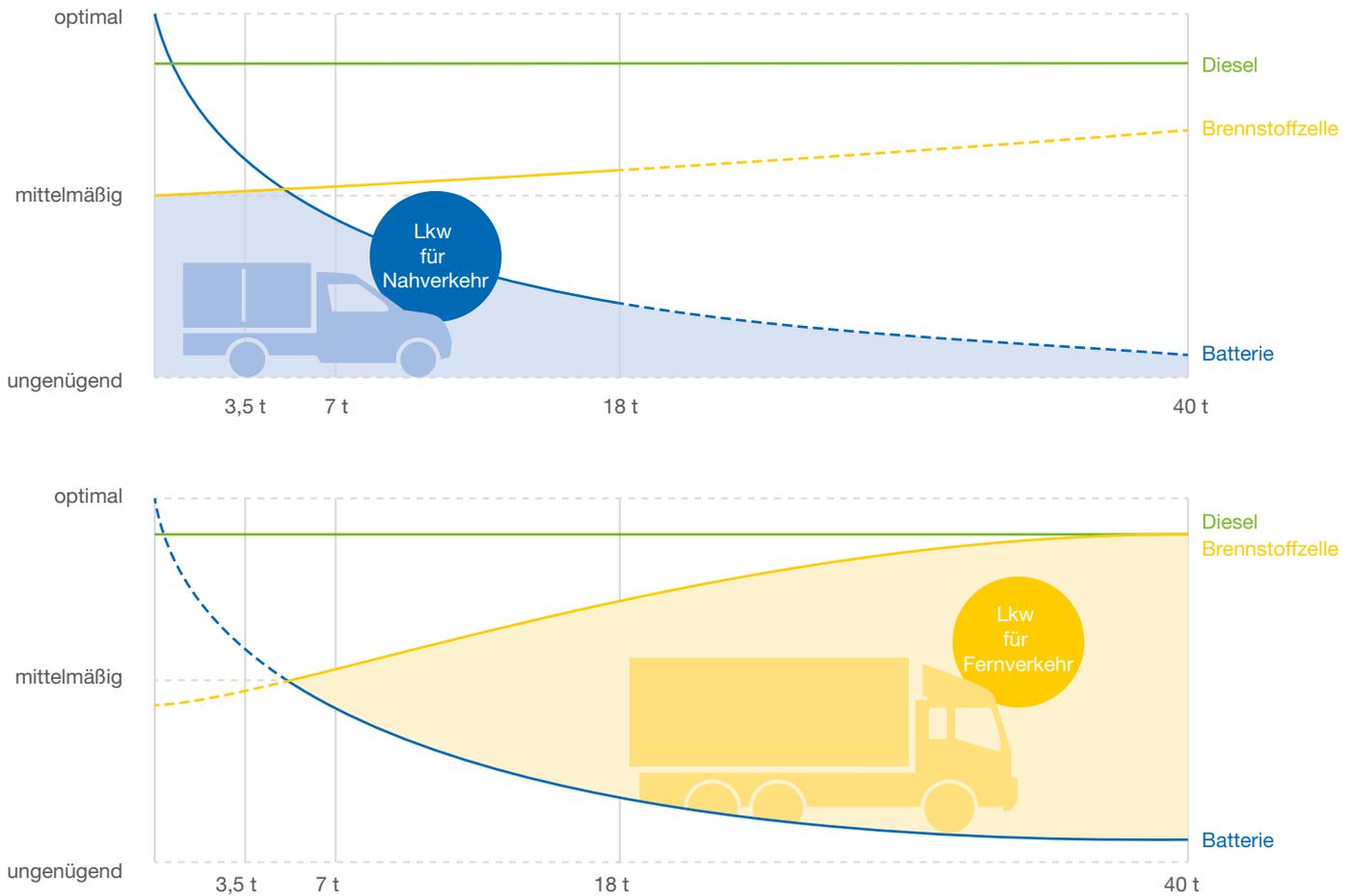


Abbildung 11: Einsatzszenarien Batterie versus Wasserstoff-Brennstoffzelle in Fahrzeugantrieben

zwei Tonnen in Kauf genommen werden. Mit Blick auf vorgeschriebene Pausenzeiten und anzunehmenden Ladedauern erscheint eine Mindest-Reichweite von 300 km angemessen, das heißt, es wird eine 6 t schwere Batterie mitzuführen sein. Das entspricht fast 50 % der maximal möglichen Zuladung eines 40 t-Lkw.

In ähnlicher Weise lässt sich auch der zu erwartende Wasserstoffbedarf der Brennstoffzellen-Variante eines 40 t-Lkw abschätzen: Ein 100 Tonnen schwerer Brennstoffzellenzug verbraucht auf einer 100 Kilometer langen Strecke etwa 25 kg Wasserstoff, den er auf 350 bar komprimiert mit sich führt.⁵⁰ Proportional auf den Lkw übertragen, entspräche dies einem Verbrauch von rund 10 kg-H₂/100 km. Der Tank schwerer Diesel-Lkw für Langstrecken fasst bis zu 1.000 Liter. Auf diese Menge komprimierter Wasserstoff mit 350 bar würde 31,5 Kilogramm wiegen. Mit dieser Menge an Wasserstoff im Tank hätte die Brennstoffzellen-Variante bereits eine Reichweite von 320 Kilometern. Brennstoffzellen-Stack und Puffer-Batterie tragen beide natürlich auch

zum Gewicht bei und haben ihre spezifischen Raumbedarfe. Allerdings korrelieren Größe und Gewicht des Brennstoffzellen-Stacks nicht mit der Reichweite, sondern nur mit dem Leistungsbedarf des Fahrzeugs. Die gleiche Aussage gilt auch für die Puffer-Batterie. Damit liegt eine vorsichtige Verallgemeinerung nahe: Je schwerer das Fahrzeug und je größer die zu überbrückende Distanz ist, umso mehr spricht für den Betrieb mit Brennstoffzelle (plus Puffer-Batterie) anstelle eines reinen Batterieantriebs. → Abbildung 11 versucht dies für Lkw im Nah- und Fernverkehr zu illustrieren.

In Autos werden Brennstoffzellen-Stacks mit 100 kW Leistung, in Brennstoffzellen-Triebzügen solche mit 400 kW eingesetzt. Dafür müssen die Stack auf optimaler Temperatur gehalten werden. Es ist davon auszugehen, dass die Brennstoffzellen-Leistung deshalb für Fahrzeuge nicht beliebig steigerbar ist. Es wird eine Grenze geben, bei der die direkte Verbrennung des Wasserstoffs oder die Verwendung von synthetischem grünem Dieselkraftstoff sinnvoller wäre.

50 <https://www.vde.com/resource/blob/1979350/a41e9c3559af76fee9c91befbc1e9216/studie-klimaneutrale-alternative-zu-dieseltriebzeugen-data.pdf> (Abruf am 02.12.2020)

3.3 Entwicklungen im Bereich alternativer Kraftstoffe

Alternativen zu den heute üblichen mineralölbasierten Kraftstoffen Diesel, Benzin oder Kerosin sind elektrischer Strom und Wasserstoff, wie sie in batterie- oder brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen genutzt werden. Diese Energieträger sind nur dann nachhaltig im Sinne umweltschonenden Handelns, wenn sie auf erneuerbaren Energien aufbauen. Gleiches gilt auch für alternative Kraftstoffe, welche die üblichen Kraftstoffe auf Mineralölbasis ersetzen sollen.

Zu den **alternativen Kraftstoffen** zählen sowohl fossile Kraftstoffe wie Erdgas oder Autogas als auch Biokraftstoffe auf Grundlage biogener Energieträger sowie sogenannte e-Fuels (→ Abbildung 12). Strombasierte Brenn-, Kraft- und Grundstoffe werden über PtX-Verfahren erzeugt („Power-to-X“, deutsch: Strom zu X,

also die Umwandlung von Strom in beliebige Stoffe). Sie werden teilweise auch als Powerfuels bzw. solare Kraftstoffe bezeichnet. Auch der aus Strom hergestellte Wasserstoff ist ein Kraftstoff, wenn er in Brennstoffzellenfahrzeugen eingesetzt wird. Wasserstoff kann also, ebenso wie Batterien, als Speichermedium für Strom genutzt werden.

Alternative Kraftstoffe, die auf **fossilen Energieträgern** wie Erdöl oder Erdgas basieren, stellen keine nachhaltige Alternative im Sinne der CO₂-Vermeidung dar. Diese erste Gruppe verschiedener konventioneller Kraftstoffe emittiert, je nach Energiedichte, Verbrauch und chemischen Eigenschaften, unterschiedliche Mengen an Treibhausgasen je gefahrenem Kilometer. Es ergibt sich dadurch ein nicht unerheblicher Ausstoß an CO₂^{51, 52} (→ Abbildung 12). Fossile Kraftstoffe sollten also bei Überlegungen im Hinblick auf ökologisch nachhaltige Mobilität nicht im weiteren Fokus der Betrachtung liegen.

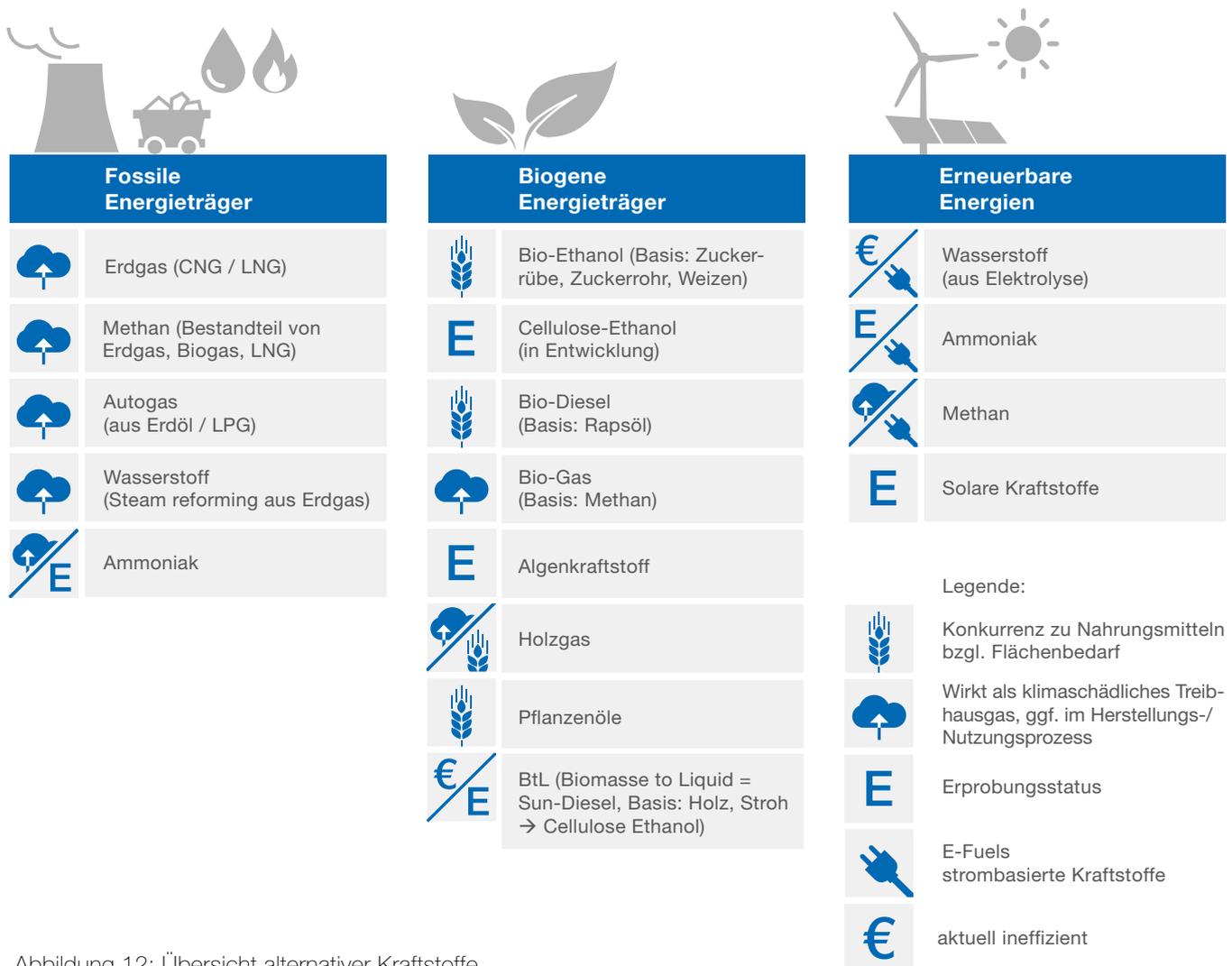


Abbildung 12: Übersicht alternativer Kraftstoffe

51 <https://www.wiwo.de/finanzen/steuern-recht/benzin-gas-diesel-mit-welchem-sprit-autofahrer-am-meisten-sparen-koennen/19514990.html> (Abruf am 08.07.2020)

52 <https://www.autobild.de/artikel/erdgas-vs.-benzin-test-13039493.html> (Abruf am 08.07.2020)

Kraftstoff	Benzin	Diesel	Autogas (LPG)	Erdgas (CNG)	Wasserstoff-gespeicherte Energie *	Strom-gespeicherte Energie *
CO ₂ -Emission [kg/l] ⁵³	2,32	2,65	1,79	1,63	0	0
Energiedichte [kwh] ^{54, 55, 56, 57}	8,8/l (~12,0 /kg)	9,9/l (~11,9 /kg)	6,8/l (~12,8 /kg)	13,3/l (~10,6–13,1 /kg)	33,3/kg	0,12–0,18/kg **
Verbrauch [100 km] ⁵⁸	8,0 l	6,4 l	9,6 l	6,0 l	1,0 kg	18,0 kWh
CO ₂ -Emission [kg/100 k]	18,56	19,96	17,18	9,78	0	0

* Nutzung von grünem Wasserstoff bzw. erneuerbaren Energien

** Energiedichte der Batterie abhängig von den chemischen Eigenschaften

Abbildung 13: Vergleich konventioneller und alternativer Kraftstoffe

Auch Methan, das wesentlicher Bestandteil von Erdgas oder Biogas ist, wirkt als Treibhausgas: Es ist in seiner Wirkung sogar 20- bis 25-mal schädlicher als CO₂. Es wird während der Herstellung, des Transports und der Nutzung in nicht unerheblichen Mengen als flüchtiges Gas freigesetzt.

dichte geprägt ist, als Futtermittel zur Verfügung. Die zweite Generation von Biokraftstoffen verwendet alle Bestandteile der Pflanze gleichermaßen. Jedoch ist insbesondere die Umwandlung von Pflanzen in Ethanol aktuell nicht wirtschaftlich. Auch bis 2030 ist bei diesen Kraftstoffen wohl nicht mit einer breiten Verfügbarkeit am (End-)Verbrauchermarkt zu rechnen. Cellulose-Ethanol wird vermutlich nur ein Nischen- bzw. Übergangsprodukt bleiben.

Die zweite Gruppe alternativer Kraftstoffe sind **biogene Kraftstoffe**. Sie sind auf Grundlage von biogenen Energieträgern nur dann ökologisch (und sozial) nachhaltig, wenn der Anbau der dafür benötigten Pflanzen nicht in Konkurrenz zur land- und forstwirtschaftlichen Nutzung der bislang für Nahrungsmittelpflanzen vorgesehenen Flächen steht. Als Ausgangsstoffe für Biokraftstoffe stehen zahlreiche nachwachsende Rohstoffe zur Verfügung. Für die Bio-Kraftstoffe der ersten Generation (Pflanzenöl, Bio-Diesel und -Ethanol) werden üblicherweise die Fruchtstände der Pflanzen aufgrund ihres hohen Gehaltes an Zucker, Stärke und Öl zur Herstellung genutzt. Bei diesen ersten Biokraftstoffen steht der Rest der Pflanze, welcher durch eine wesentlich geringere Energie-

Die Nutzung reiner biogener Kraftstoffe ist bisher einzelnen beispielhaften Anwendungen vorbehalten. Bioethanol wird als obligatorische Beimischung in den Kraftstoffen E5 und E10 genutzt. Ein bundesweiter Markt für Biodiesel als Reinkraftstoff existiert praktisch nicht ⁵⁹. Ein erster CO₂-neutraler Langstreckenflug mittels nachhaltig hergestelltem Biomasse-Kerosin (Sustainable Aviation Fuel, kurz: SAF) wurde Ende November 2020 von DB Schenker und Lufthansa Cargo auf der Strecke Frankfurt-Shanghai durchgeführt. Ab der Einführung des Flugplanes 2021 plant DB Schenker regelmäßige, CO₂-neutrale Flüge in das Angebotsportfolio aufzunehmen. Für beide Unternehmen sind biogene Kraftstoffe allerdings nur ein Zwischenschritt hin zur Nutzung von strombasierten Kraftstoffen. ⁶⁰

53 <https://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/kraftstoffverbrauch-in-co2-ausstoss-umrechnen/150/3097/57956> (Abruf am 08.07.2020)

54 Angaben je l bzw. kg; Daten je kg für Benzin, Diesel, LPG, CNG dazu geringfügig abweichend, da die Stoffe über unterschiedliche Dichten verfügen.

55 https://www.linde-gas.at/de/images/1007_rechnen_sie_mit_wasserstoff_v110_tcm550-169419.pdf (Abruf am 09.07.2020)

56 <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/alternative-kraftstoffe/vergleich-cng-und-lpg/> (Abruf am 09.07.2020)

57 <https://www.wissenschaft.de/allgemein/energiedichte-verschiedener-kraftstoffe/> (Abruf am 09.11.2020)

58 <https://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/kraftstoffverbrauch-in-co2-ausstoss-umrechnen/150/3097/57956> (Abruf am 08.07.2020)

59 https://de.wikipedia.org/wiki/Biodiesel#cite_note-105 (Abruf am 11.12.2020)

60 <https://www.dbschenker.com/qa-en/about/press/corporate-news/co2-neutral-freight-flights-670152> (Abruf am 11.12.2020)



Closed Carbon Cycle MOBILITY

Die TU Bergakademie Freiberg erforscht im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projektes „C3 Mobility“ mit der Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH (CAC) Verfahren zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen.

Es wird synthetisches Benzin aus sogenanntem Biomethanol erzeugt. Biomethanol kann aus Kohlendioxid, Wasser und Strom oder aber auch aus Abfällen und anhand von regenerativ gewonnenem Wasserstoff erzeugt werden. Voraussetzung ist das Vorhandensein einer ausreichenden Menge an elektrischer Energie. Das synthetische Benzin benötigt also keinerlei fossile Brennstoffe.

Die Syntheseanlage hat – Stand Ende 2019 – eine erste Charge von 16.000 Litern synthetischem Benzin erzeugt. Für 2020 ist ein zweiter Versuch an der Anlage geplant, bei dem 15 bis 25 m³ nicht-fossiles Benzin produziert werden sollen.

Das gesamte Verfahren befindet sich noch im Entwicklungsstadium, Prozessparameter müssen weiter optimiert werden. Von einer großtechnischen Reife oder industriellen Anwendbarkeit ist das Verfahren noch deutlich entfernt.⁶¹

Strombasierte Kraftstoffe sind die dritte Gruppe der alternativen Kraftstoffe. Unter der Voraussetzung, dass der zu Grunde liegende Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen wird, wie es bei solaren Kraftstoffen der Fall ist, sind diese auch als „grüne“ Alternative einzustufen.

Solare Kraftstoffe werden durch elektrochemische, photochemische und thermochemische Verfahren gewonnen. Über die drei Methoden wird ein solares Synthesegas erzeugt. Dies ist eine Mischung aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid, die im weiteren Verfahren in Kerosin umgewandelt wird.⁶² Eine Herstellung im industriellen Maßstab ist bis 2030 trotz zahlreicher Forschungsprojekte (beispielsweise SOLAR-JET⁶³, HyFlexFuel⁶⁴ oder SUN-to-LIQUID⁶⁵) nicht realistisch. So wurden im Projekt SOLAR-JET insgesamt nur rund 700 Liter und im Projekt SUN-to-LIQUID etwa 8400 Liter Biokraftstoff hergestellt. Zum Vergleich: Auf einem Kurzstreckenflug werden ca. 6 Liter Kerosin pro 100 Passagierkilometer verbraucht. Bei einem Flug Frankfurt-Berlin summiert sich das bei einem entsprechenden Flugzeug auf ca. 4.880 Liter (Klasse A320, 200 Passagiere). Die solaren Kraftstoffe befinden sich also noch in frühen Phasen der Entwicklung^{66, 67} und zum aktuellen Zeitpunkt ist nicht abzusehen, ab wann Produktion im industriellen Maßstab möglich sein wird⁶⁸. So geht beispielsweise DHL davon aus, dass solare Kraftstoffe kein geeignetes Mittel sind, um die „mittelfristige Überbrückung bis zur vollständigen Elektrifizierung“ zu erreichen⁶⁹. Für E-Fuels, und als deren Untergruppe die Sun Fuels, erscheint eine Nutzung als alternative Kraftstoffe in Logistik und Mobilität 2030 zum aktuellen Zeitpunkt nicht flächendeckend in großem Maßstab möglich.

Die Forschungsinitiative „Energiewende im Verkehr“ des BMWi leistet aktuell mit ihren 16 Forschungsvorbänden und der übergeordneten Begleitforschung „BEniVer“ grundlegende Arbeiten zur Herstellung und Nutzung strombasierter Kraftstoffe sowie zur Vergleichbarkeit der Kraftstoffkosten über die verschiedenen Konzepte hinweg^{70, 71}.

61 http://www1.bayern.landtag.de/www/ElanTextAblage_WP18/Drucksachen/Schriftliche%20Anfragen/18_0005631.pdf

62 <https://www.bauhaus-luftfahrt.net/de/topthema/solare-kraftstoffe/> (Abruf am 02.12.2020)

63 <https://cordis.europa.eu/project/id/285098> (Abruf am 09.07.2020)

64 <https://www.hyflexfuel.eu/technologies/> (Abruf am 09.07.2020)

65 <https://www.sun-to-liquid.eu/page/home.php> (Abruf am 09.07.2020)

66 <https://www.bauhaus-luftfahrt.net/de/topthema/solare-kraftstoffe/> (Abruf am 09.07.2020)

67 <https://www.nordlb.de/de/research/download/1638/direct/> (Abruf am 12.12.2020)

68 <https://www.dpdhl.com/content/dam/dpdhl/de/media-center/responsibility/dpdhl-whitepaper-nachhaltige-kraftstoffe-fuer-die-logistik.pdf> (Abruf am 09.07.2020)

69 <https://www.dpdhl.com/content/dam/dpdhl/de/media-center/responsibility/dpdhl-whitepaper-nachhaltige-kraftstoffe-fuer-die-logistik.pdf> (Abruf am 09.07.2020)

70 https://www.energiesystem-forschung.de/foerdern/energiewende_im_verkehr (Abruf am 01.12.2020)

71 <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/11/20201103-strombasierte-kraftstoffe-der-zukunft.html> (Abruf am 01.12.2020)

Elektrofahrzeuge allgemein					
Verbrennungsmotor	Hybrid	Plug-in-Hybrid	Range Extended Electric Vehicle	Batteriebetriebenes Fahrzeug	Brennstoffzellenfahrzeug
Diesel- und Ottomotoren werden auch in Zukunft weiter optimiert. Ihr Effizienzpotenzial ist noch nicht ausgeschöpft.	In Hybridfahrzeugen kommen Elektro- und Verbrennungsmotoren zum Einsatz. Eine Batterie wird beim Fahren über den Motor aufgeladen. Sie dient auch zur Speicherung von Bremsenergie.	Der Stromspeicher in Plug-in-Hybriden kann zusätzlich über das Stromnetz aufgeladen werden. Auch hier dient die Batterie als Speicher von Bremsenergie.	Bei Bedarf erzeugt z. B. ein Verbrennungsmotor mittels eines Generators Strom für den Elektromotor. Die Reichweite wird somit deutlich verlängert.	Die Energie für den Antrieb kommt ausschließlich aus der Batterie. Diese wird über das Stromnetz aufgeladen.	Die Stromerzeugung für den Elektromotor geschieht direkt an Bord. In der Brennstoffzelle wird chemische Energie von Wasserstoff in elektrische Energie umgewandelt.
	 	  	  	 	 

Abbildung 14: Antriebstechnologien der Zukunft (in Anlehnung an VDA)⁷²

Strombasierte Brenn-, Kraft- und Grundstoffe werden perspektivisch einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Dekarbonisierung der Wirtschaft leisten, auch wenn ihre industrielle Nutzung im Gegensatz zu Batterie- und Wasserstoffanwendungen noch in unmittelbarer zeitlicher Nähe liegt. Neben der direkten Nutzung von Wasserstoff können sie insbesondere in der energieintensiven Industrie als Alternative zur Nutzung fossiler Energien zum Einsatz kommen. Dies gilt insbesondere auch für Verkehrsbereiche, in denen eine direkte Nutzung von Strom technisch auch zukünftig schwierig sein wird (z. B. Luft- und Langstreckenseeverkehr).⁷³

3.4 Einschätzung zur Anwendung von Kraftstoffalternativen

Vergleicht man die drei alternativen Antriebsenergien Wasserstoff, Batterie-Strom und alternative Kraftstoffe (hier insbesondere Biokraftstoffe) und die damit verbundenen Antriebstechnologien, so lassen sich aktuell zwei konkrete Anwendungsfälle in der städtischen Logistik ausmachen, deren technologische Machbarkeit bis 2030 gegeben scheint (→ Abbildung 14).

⁷² <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/elektromobilitaet/startseite-elektromobilitaet.html>

⁷³ http://www1.bayern.landtag.de/www/ElanTextAblage_WP18/Drucksachen/Schriftliche%20Anfragen/18_0005631.pdf (Abruf am 13.10.2020)

Anwendungsfall kleinvolumige Endkundenzustellung und urbane Mobilität

Zum einen ist es die vergleichsweise kleinvolumige Endkundenzustellung im urbanen Raum, die sich mit den schon heute bewährten batterieelektrischen Antrieben realisieren lässt. Mobilitätslösungen für den Individualverkehr oder kombinierte Verkehre im Sinne eines Modal Split lassen sich ebenfalls bereits heute mit den vorhandenen elektrisch betriebenen Fahrzeugen realisieren.

Für den ersten Anwendungsfall bestehen mehrere Herausforderungen. So gilt es, eine bedarfsgerechte sowie netzdienliche Bereitstellung des Stroms über das Stromnetz zu gewährleisten. Gleichzeitig sollte eine Energieverbrauchsreduzierung bzw. -optimierung auf einen Minimalwert für die jeweilige Einzelzustellung angestrebt werden. Und schließlich sollten Entwicklung bzw. Erprobung grundlegend alternativer Zustellkonzepte ermöglicht werden. Ergänzt wird dieser reine Logistik-Bedarf durch die Mobilitätsnachfrage von Handwerk, Dienstleistern und Kleingewerbe. Im urbanen Raum sind dafür auch Fahrzeuge mit einem elektrischen Misch-Antrieb denkbar, beispielsweise Plug-in-Hybride oder Range Extended Vehicles (→ Abbildung 14).

Anwendungsfall großvolumiger Transport

Ein anderer wichtiger Anwendungsfall ist die großvolumige Belieferung des stationären Handels sowie die Verteillogistik zwischen urbanen Ballungsräumen, die einen Schwerlasttransport bedingen. Dieser Verkehrsbedarf wird voraussichtlich durch wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeugen gedeckt (→ Abbildung 14).

Sollten die Fortschritte bei der Batterieentwicklung anhalten, sind dadurch auch Einsatzmöglichkeiten für rein Batterie-elektrische Fahrzeuge im Schwerlastverkehr denkbar. Bereits Ende 2020 nutzt DHL einen speziell entwickelten rein Batterie-elektrischen 16-Tonnen-Lkw von Volvo für die innerstädtische Zustellung in London.⁷⁴

In diesem Sinne könnte die Gemeinschaftsentwicklung einer neuartigen Akkutechnologie mit der Bezeichnung „Spatial Atom Layer Deposition“ (SALD) durch die deutschen Fraunhofer-Institute und die staatliche niederländische Forschungseinrichtung The Netherlands Organisation (TNO) dazu beitragen. Damit wären leichtere, sicherere und leistungsstärkere Batterien sowohl für den Einsatz in PKW, aber auch in Lkw bis hin zu Mobiltelefonen und Wearables denkbar. Aktuell befindet sich SALD noch in einer entwicklungsnahe Kleinserien-

fertigung. Die Industrialisierung des Verfahrens obliegt der eigens gegründeten Firma SALD BV (Eindhoven). Ein Einsatz in Elektrofahrzeugen wird frühestens für 2022/2023 prognostiziert.⁷⁵

Die Nutzung der alternativen Kraftstoffe und der damit verbundenen Antriebstechnologien ist nicht nur von deren technologischer Reife, sondern – wie am vorangegangenen Beispiel gezeigt – auch von deren Marktverfügbarkeit abhängig. Für die Ermöglichung der elektromobilen Logistik und Mobilität kommt der Energiewirtschaft, der Ladeinfrastruktur und dem Lade- und Lastmanagement deshalb eine besondere Bedeutung zu (→ Kapitel 4).

74 <https://www.dhl.com/gb-en/home/press/press-archive/2020/dhl-supply-chain-takes-to-the-road-with-uks-first-electric-16-tonne-truck.html> (Abruf am 02.12.2020)

75 <https://www.chemie.de/news/1168603/weit-ueber-1-000-km-reichweite-fuer-e-autos.html> (Abruf am 01.12.2020)

4. Energiewirtschaft

Der technologische Wandel der Fahrzeuge von Verbrennern hin zu Elektroautos mit Batterien oder Wasserstoffspeichern stellt auch die Energiewirtschaft vor große Herausforderungen. Die etablierten Akteure des Strommarktes werden durch den Mehrbedarf weiter an Relevanz gewinnen. Die Mineralölkonzerne hingegen müssen sich, um als Unternehmen fortzubestehen, wandeln und den geänderten Bedarfen gerecht werden. Bestimmend für die zukünftige Energiewirtschaft ist der Gesamtenergiebedarf sowie dessen Verteilung auf die verschiedenen Energieträger und Quellen, die den Bedarf decken sollen.

4.1 Energiebedarf 2030

Aktuelle Szenarien gehen davon aus, dass der weltweite Energiebedarf im Jahr 2030 zu bis zu 40 % aus erneuerbaren Energien gedeckt wird. Wasserkraft wird weltweit zunächst die größte Quelle für nachhaltig erzeugten Strom bleiben. Allerdings weist der Photovoltaiksektor insgesamt das größte Wachstum auf, vor allem weil die Gestehungskosten für Photovoltaik-Strom deutlich gesunken sind. Windkraft, onshore- und offshore, wird neben Wasser- und Sonnenenergie ihre überragende Rolle bei der Erzeugung erneuerbarer Energien behaupten. Andere grüne Energieformen werden lediglich ergänzend wirken.⁷⁶

In Deutschland wird der Strombedarf innerhalb der nächsten 10 Jahre um ca. 25 % steigen. Nach Einleitung der Energiewende in den 2000er Jahren und deren Beschleunigung durch den Beschluss des Atomausstiegs im Jahr 2011 und des Kohleausstiegs in 2019/2020 wird die Nachfrage nach grünem Strom und grünem Wasserstoff zukünftig in allen relevanten Verbrauchssektoren, das heißt bei Verkehr, Elektrizität, industrieller Prozesswärme und Gebäudewärme stark steigen. Zugleich wird die Bedeutung fossiler Energieträger mehr und mehr in den Hintergrund treten. Der elektromobile Verkehr wird den Strombedarf bis 2050 um bis zu 64 TWh ansteigen lassen. Das entspricht einer Steigerung gegenüber 2018 um den Faktor 5,8. Über diesen genannten Anstieg hinaus muss für die Antriebstechnologie basierend auf grünem Wasserstoff für dessen Herstellung zusätzlicher Strom bereitgestellt werden. Für die Herstellung des insgesamt in Deutschland über alle Verbrauchssektoren benötigten grünen Wasserstoffs wird eine zusätzliche Strommenge von etwa 55 TWh pro Jahr bereitzustellen sein. Das entspricht einem zusätzlichen Strombedarf von ca. 8 % gegenüber der gesamten Stromnachfrage.⁷⁷

Aufgrund der volatilen Entstehung von Wind- und Sonnenenergie müssen diese in Hochzeiten gespeichert werden. Wie bereits in → Kapitel 3 dargestellt, ist elektrolytisch hergestellter Wasserstoff ein sogenannter E-Fuel.

4.2 Akteure im Energiemarkt 2030

Wichtigste Akteure des Energiemarktes sind heute wie auch im Jahr 2030 die Stromproduzenten, Stromversorger, Stromnetzbetreiber etc. Der Strommarkt der Zukunft wird volatil durch die verstärkte Einspeisung von erneuerbarer Energie aus fluktuierenden Quellen. Photovoltaikanlagen speisen abhängig vom Sonnenstand und Wetter ein, Windkraftanlagen abhängig vom aktuellen Wetter. Zugleich wird die Anzahl der Agierenden wegen der fortschreitenden Dezentralisierung der Energieerzeugung ständig wachsen. Der Energiemarkt wird nicht zuletzt durch die zunehmende Liberalisierung vielfältiger, auf der Nachfrage- wie auf der Erzeugerseite (→ Abbildung 15).

Der Energiemarkt 2030 wird voraussichtlich wesentlich vielfältiger sein als heute. Nachhaltige Konzepte wie beispielsweise die Kopplung von Photovoltaik oder Windenergie mit einer Wärmepumpe zur kleinräumigen Versorgung mehrerer Haushalte werden an Bedeutung gewinnen.⁷⁸ Im städtischen Umfeld sind (semi-)autarke Konzepte für Mieterstrom sowohl auf Alt- als auch auf Neubauten zu erwarten. Im ländlichen Umfeld und dem Einzugsgebiet urbaner Räume sind aufgrund der abweichenden Siedlungsstruktur verstärkt Eigenverbraucher, ggf. in Kombination mit Speicherlösungen, zu finden.

Alle Unternehmen oder Personen, die Strom produzieren, sind **Stromerzeuger bzw. -produzenten**, und das unabhängig davon, welche Quellen sie für die Erzeu-

76 <https://www.pv-magazine.de/2020/10/13/iea-world-energy-outlook-photovoltaik-ist-die-neue-beherrschende-kraft-der-weltweiten-strommaerkte/> (Abruf am 21.10.2020)

77 <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/energie-steigender-energiebedarf-deutschland-droht-die-oekostrom-luecke/25385468.html?ticket=ST-561756-ljbPsnSIQUheYxks1r13-ap1> (Abruf am 21.10.2020)

78 <https://enertrag.com/portal-fuer-alle-erneuerbare-energie-loesungen> (Abruf am 25.10.2020)

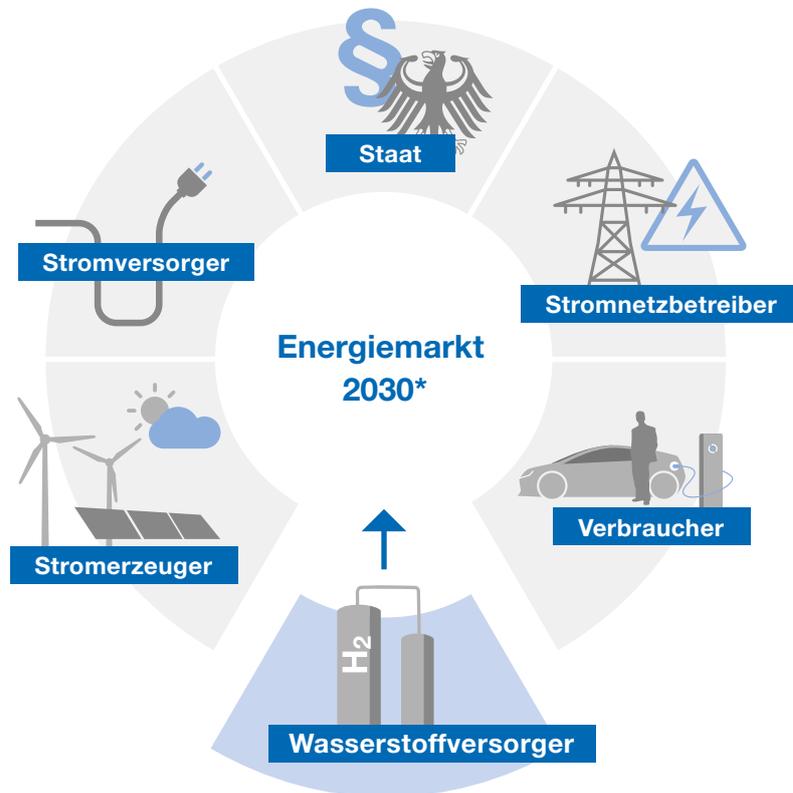


Abbildung 15: Energiemarkt 2030 (Auszug mit Fokus auf E-Mobilität, kein Anspruch auf Vollständigkeit)

gung nutzen. Mit der Einspeisung ins Netz entsteht ein homogenes Produkt, und zwar Strom. In Deutschland gibt es vier große und eine Vielzahl an mittelgroßen Stromerzeugern. Die meist lokalen oder regionalen Stadtwerke sind zugleich Grundversorger (siehe Abschnitt Stromversorger). Im Rahmen der Energiewende hat sich bereits in den vergangenen Jahren ein neuer Erzeugertyp herauskristallisiert, die Betreiber von Biomasse-, Wind-, Wasserkraft- oder Photovoltaikanlagen. Sie produzieren mit ihren Anlagen grünen Strom. So gelten Privatpersonen, die grünen Strom beispielsweise über eine Photovoltaikanlage erzeugen, ihn aber nicht vollständig selbst nutzen können und ggf. an Dritte veräußern, als Kleinsterzeuger. Die Anzahl dieser Kleinsterzeuger wird bis 2030 weiter zunehmen, wenn nebengewerbliche Stromerzeuger oder Privatpersonen ihren Eigenverbrauch auch mittels stationärer Speicherlösungen gedeckt haben und ihre Überproduktion an Dritte weitergeben. Voraussetzung dafür ist eine entsprechend attraktive Vergütung (siehe Info-Box Erneuerbare-Energien-Gesetz). Seitens der Bundesregierung besteht über das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz

(EEWärmeG) bereits die Pflicht zum Einsatz erneuerbarer Energien bei Neubauten⁷⁹. Diese Pflicht wird in den kommenden Jahren vermutlich noch verschärft und somit weitere Stromerzeuger auf den Markt treten lassen. So strebt die Stadt Hamburg bereits ab 2022 an, die Nutzung von Solaranlagen auf Neubauten verpflichtend zu machen⁸⁰. Von diesen Regelungen sind auch gewerbliche Vermieter betroffen und werden innovative Lösungen für ihre Mieter und Quartiere entwickeln müssen.

Die **Stromversorger** beliefern private Haushalte ebenso wie Unternehmen als Verbraucher. Zu ihren Aufgaben zählt, die benötigten Strommengen zu beschaffen und gegenüber dem Netzbetreiber den täglich prognostizierten Stromverbrauch anzumelden. Zudem sorgen sie für den reibungslosen Ablauf der Hintergrundprozesse, meist inklusive der Abrechnung aller Abgaben und Umlagen, welche zusätzlich zu den eigentlichen Energiekosten anfallen. Die Beschaffung der prognostizierten Strommengen erfolgt beispielsweise durch den direkten Bezug von einem Windparkbetreiber

79 <https://www.baunetzwissen.de/heizung/fachwissen/verordnungen-gesetze/erneuerbare-energien-waermegesetz-eewaermeg-161806> (Abruf am 21.10.2020)

80 <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/erneuerbare-energien-was-eine-solarpflicht-fuer-neubauten-bringt-und-was-daran-kritisiert-wird/26252848.html?ticket=ST-1240803-KUN2t0LLzurcBvDKdvzs-ap4> (Abruf am 22.10.2020)

oder über die Strombörse in Leipzig. Dort handeln zugelassene Börsenteilnehmer Strom. Er kann für einen festgelegten Lieferzeitraum auf Großhandelsebene gekauft werden, wie z. B. für ganze Jahre, bestimmte Monate, einzelne Stunden oder sogar Viertelstunden. Der Stromversorger agiert als Mittler zwischen (End-) Kunden, Stromproduzent und Stromnetz. Er sorgt dafür, dass der Strom die einzelnen Verbrauchsstellen erreicht und abgerechnet werden kann. Die Verbraucherpreise beeinflussen den Versorger durch seine Beschaffungsstrategie und eigene Entgelte. Zusätzliche Abgaben sind Konzessionsabgabe, EEG- und KWK-Umlage sowie Stromsteuer. In der Vergangenheit folgte das Stromangebot der Nachfrage, aber die zunehmend volatile Verfügbarkeit erneuerbarer Energien zwingt den Stromversorger, zukünftig dafür zu sorgen, dass die Nachfrage seiner Kunden dem aktuellen Stromangebot folgt. Dafür benötigt er einen tiefen Einblick in die historischen und aktuellen Verbrauchswerte des jeweiligen Netzanschlusspunktes. Entsprechend eng muss der Versorger zukünftig mit seinen Kunden (im Idealfall automatisiert) interagieren können.

Um besonders kleine Erzeuger und Verbraucher in den flexiblen Strommarkt zu integrieren werden sich zunehmend **Aggregatoren** herausbilden. Deren Geschäftsmodell besteht darin, kleine Erzeugungsanlagen, flexible Verbraucher und Speichersysteme zusammenzufassen und diese zu vermarkten. Sie gruppieren damit kleinste und kleine Anlagen auf ein handelbares Volumen. Bisher sind Rechte und Pflichten eines Aggregators nicht eindeutig und rechtsverbindlich geklärt.⁸¹ Hier besteht für den Gesetzgeber also noch Handlungsbedarf, will er perspektivisch den zunehmend kleinteiligeren und dezentraleren Energiemarkt ermöglichen.

Der **Stromnetzbetreiber** ist für die Netzinfrastruktur, also für die Transportwege des Stroms zuständig. Er stellt sicher, dass die Verteilnetze stabil sind und der erzeugte Strom die Verbraucher erreicht. Bei den Netzbetreibern wird zwischen Übertragungsnetzbetreibern und Verteilnetzbetreibern unterschieden. Die Übertragungsnetzbetreiber sind für die überregionale Verteilung des Stroms zuständig. Die Verteilnetzbetreiber sind für die regionale Verteilung verantwortlich. Der Stromzähler als Schnittstelle zum Kunden liegt in der Verantwortung des Netzbetreibers und nicht etwa des Versorgers. Zudem verfügt das Stromnetz über verschiedene Spannungsebenen, für die ein Netzbetreiber zuständig ist. Er stellt sicher, dass der Strom vom Hochspannungsnetz über das Mittelspannungsnetz in das Niederspannungsnetz der angeschlossenen Haushalte übergeben wird.

Mit dem Auslaufen der Garantiepriese über das **Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)** stellt sich für die bisher wirtschaftlich erfolgreichen Betreiber von Solarstrom- und Windkraftanlagen nun die Frage, wie mit dem erzeugten Strom umzugehen ist. Bis zum Jahr 2030 werden bis zu 400.000 Photovoltaikanlagen aus der garantierten EEG-Förderung herausfallen. Die Anlagen sind abgeschrieben und bieten nun folgende Möglichkeiten:

- Fortführung des Verkaufs an den örtlichen Stromnetzbetreiber, allerdings zu weit geringeren Preisen als bisher
- Eigenverbrauch des erzeugten Stroms, inklusive verpflichtender Zahlung einer ermäßigten EEG-Umlage (voraussichtlich 2,6 Cent pro Kilowattstunde) – das Einspeisen von etwaigen Überschüssen ins örtliche Netz ist nur mittels eines Vermarkters und unter Nutzung entsprechender Messtechnik möglich
- Direktvermarktung an Nachbarn oder Mieter, bei verpflichtender Zahlung der vollen EEG-Umlage (voraussichtlich 6,5 Cent pro Kilowattstunde) – ebenfalls nur unter Nutzung ggf. nachzurüstender und meist teurer Messtechnik.

Aktuell nicht explizit vorgesehen sind in der EEG-Novelle 2021 gemäß Kabinettsbeschluss vom 23.09.2020 naheliegende, kleinräumige Nutzermodelle zur (partiellen) Selbstversorgung. Ziel wäre es hier – auch im Sinne einer Verbraucherfreundlichkeit für engagierte Privatpersonen und um die E-Mobilität weiter zu fördern – möglichst viel eigenen Solarstrom am Entstehungsort zu nutzen und das ohne administrative, kaufmännische und technische Hindernisse. Der Anlagenbetreiber könnte den Strom selbst nutzen und Überschüsse in der Nachbarschaft verkaufen; beispielsweise für Haushaltsstrom oder auch private Ladestationen für E-Autos, an der Nachbarn ihre Elektrofahrzeuge laden. So könnte auch der Bedarf an öffentlicher Ladeinfrastruktur reduziert werden.^{82, 83}

81 <https://www.energieagentur.nrw/netze/aggregatoren> (Abruf am 09.11.2020)

82 <https://www.spiegel.de/wirtschaft/service/eigener-solarstrom-so-wirken-die-neuregelungen-kolumne-a-92fe28ed-767f-4db8-8be2-dd47b78e74de> (Abruf am 22.10.2020)

83 <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/vom-netz-zum-system/fnn-szenario> (Abruf am 27.10.2020)

Eine weitere Unterscheidung liegt zwischen den grundzuständigen und den wettbewerblichen Messstellenbetreibern. Grundlage dieser Unterscheidung ist die im Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende festgehaltene freie Wahl der Messdienstleister durch die Verbrauchsstellen bzw. Anschlussnutzer. Die Stromnetzbetreiber müssen den bedarfsgerechten Ausbau des Stromnetzes für die zukünftig volatilere Netzauslastung bewerkstelligen. Sie stehen dabei vor einem Dilemma, denn die Stromleitungen müssen so gut wie möglich auf die Herausforderungen der fluktuierenden, erneuerbaren Einspeisung ausgelegt sein, ein Ausbau auf Maximallast ist jedoch nicht wirtschaftlich.

Der **Staat** reguliert den Transport und die Verteilung des Stroms, indem er die Höhe der entsprechenden Entgelte festlegt und vermeidet dadurch die Monopolbildung. Entsprechend ist der Staat hier als zusätzlicher Akteur auf dem Strommarkt zu nennen. Die staatlich regulierten Übertragungs- und Verteilnetzentgelte machen mittlerweile rund ein Viertel der Strompreise aus. Zusätzliche staatlichen Abgaben, Steuern und Umlagen (z. B. Konzessionsabgabe, EEG-Umlage, Netzentgelte, Offshore-Haftungsumlage) tragen dazu bei, dass der Strompreis zu knapp 70% aus gesetzlichen Abgaben besteht.

Für den Energiemarkt 2030 ist die Digitalisierung ein entscheidender Faktor, der eine vollständige Energiewende erst ermöglicht, denn die Volatilität des Stromangebotes setzt voraus, dass in immer kürzeren Zeiträumen Bedarf und Angebot erfasst werden müssen. Digitale Stromzähler können ein Baustein für die Kommunikation mit dem Netzbetreibern sein und ihm unter anderem die Möglichkeit bieten, steuerbare Erzeuger oder Lasten zu beeinflussen, um gegebenenfalls Versorgungsschwankungen auszugleichen.

Neue Strommarktakteure

Der Strom-Energiemarkt wird aber auch um weitere Akteure ergänzt bzw. werden sich bestehende Unternehmen einem Transformationsprozess unterziehen müssen. Mineralölunternehmen wie beispielsweise BP bekennen sich klar zum Energieträger Wasserstoff als Alternative zu ihren aktuellen Produkten⁸⁴. So können sie ihre bisherigen Kernkompetenzen (beispielsweise anspruchsvolle Logistik zum Transport von Gefahrstoffen) nutzen, um sich in veränderten und neuen Märkten zu behaupten. Klare unternehmerische Ziele,

wie beispielsweise 10% des nachhaltigen Wasserstoffmarktes im Jahr 2030 zu bedienen, helfen Ihnen bei der langfristigen Sicherstellung des Unternehmensfortbestandes.⁸⁵ Mit der Errichtung einer Elektrolyse-Anlage zur Herstellung von grünem Wasserstoff am Standort Lingen geht BP klar in diese Richtung. Unter Nutzung von Offshore-Windkraftanlagen des dänischen Betreibers Ørsted soll eine erste Ausbaustufe 50 MW Leistung erbringen, langfristig soll auf bis zu 500 MW skalieren werden⁸⁶.

Der Branchenführer unter den Mineralölunternehmen in Deutschland, Aral, beabsichtigt, an seinem dichten Netz festzuhalten, dieses aber weiter zu entwickeln⁸⁷. So werden zukünftig unterschiedliche Kraftstoffe und Antriebsenergieträger an den Tankstellen zu finden sein. Prototypisch erfolgt diese Umsetzung bereits in Berlin (Holzmarktstraße). Dort wurden Sharing Optionen über die Berliner App Jelbi, Schnellladepunkte und eine Batteriewechselstation mit der vorhandenen Tankstelle zu einem „Mobility Hub“ integriert⁸⁸. Auch TOTAL betreibt in Berlin bereits eine Multi-Energie-Tankstelle am Flughafen Berlin Brandenburg (BER). Der dort verfügbare Wasserstoff wird lokal unter Nutzung von Sonnen- und Windenergie produziert⁸⁹.

Weitere neue Marktteilnehmer sind Produzenten technischer Gase wie Weltmarktführer Linde und der Konkurrent Air Liquide. Sie verfügen im Kontext der Wasserstoffnutzung über relevante Kernkompetenzen in den Feldern Produktion und Transport. Diese müssen sie auf einen größeren Markt skalieren, um dem steigenden Bedarf durch Brennstoffzellenfahrzeugen gerecht zu werden.⁹⁰

Fazit

Um die kontinuierliche Aufnahme bzw. den Ausbau regenerativer Energien in den Strommix zu gewährleisten, müssen die vorhandenen Regularien, die bisherigen Netzentgelte und auch die EEG-Umlage stetig weiterentwickelt werden⁹¹. Einerseits muss die Stabilität der Netze auch bei fluktuierender Einspeisung gewährleistet sein. Andererseits sollte das Abregeln in Zeiten hohen Energieertrages durch flexible Speicherlösungen, wie stationäre Speicherbatterien oder die Umwandlung in Wasserstoff, vermieden werden. So kann gleichsam die vollständig mögliche Ausbeute an regenerativen Energien genutzt werden.

84 <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html> (Abruf am 03.11.2020)

85 Vortrag Enno Harks, Deputy Director ; BP Europa SE ; External Affairs D auf der Hydrology Online Conference (Abruf am 08.10.2020)

86 <https://www.heise.de/news/Gruener-Wasserstoff-BP-und-Orsted-bauen-Elektrolyse-Anlage-in-Lingen-4953612.html> (Abruf am 14.11.2020)

87 <https://www.automobil-produktion.de/zulieferer/aral-haelt-trotz-elektromobilitaet-an-tankstellennetz-fest-209.html> (Abruf am 23.10.2020)

88 <https://www.aral.de/de/global/retail/presse/pressemitteilungen/mobility-hub.html> (Abruf am 23.10.2020)

89 <https://de.total.com/de/die-total-gruppe-deutschland/projekte-fuer-bessere-energie-deutschland/die-total-multi-energie-tankstelle-am-berlin-schoenefeld> (Abruf am 23.10.2020)

90 Vortrag Dr. Werner Ponikvar, Managing Director Linde Hydrogen FuelTech auf der Hydrology Online Conference (Abruf am 08.10.2020)

91 <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/strommarkt-der-zukunft-strom-2030.html> (Abruf am 25.10.2020)

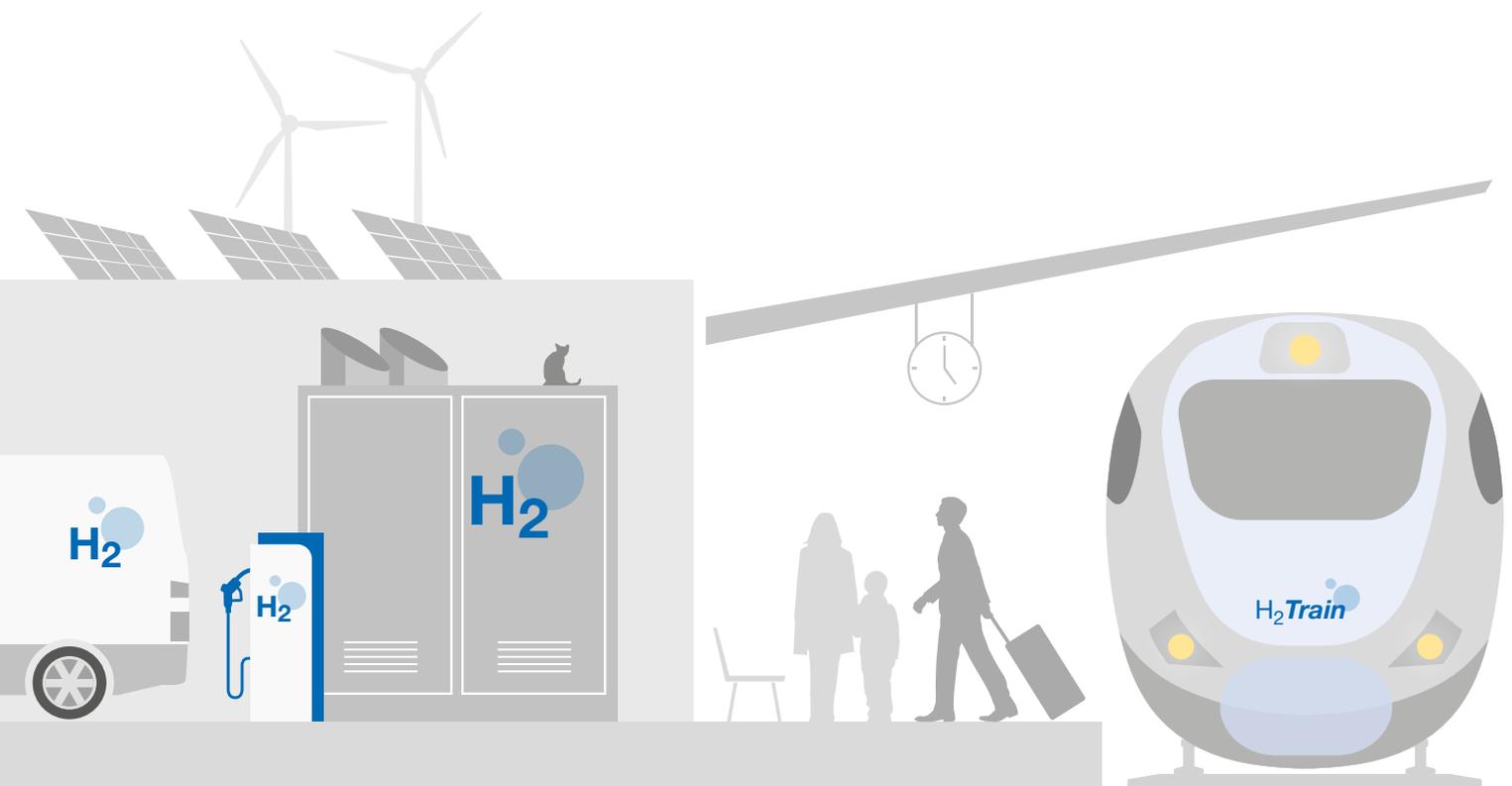


Abbildung 16: Energieszenario 2030

4.3 Wasserstoff am Zug – Energieszenario 2030

Multimodale Verkehrslösungen sind im Jahr 2030 weiträumig etabliert. Lange Strecken werden auf der Schiene zurückgelegt, dies gilt sowohl für Personen als auch für Güter. Rund 30% des Schienennetzes in Deutschland sind nicht elektrifiziert. Dort kommen seit den wegweisenden Entscheidungen innerhalb des DB-Konzerns in den frühen 2020er Jahren als auch durch das wachsende Angebot der Hersteller (Siemens, Alstom u. a.) Wasserstoffzüge zum Einsatz. Sie lösen kontinuierlich ältere Dieselmotoren ab. Um deren Versorgung mit Wasserstoff sicherzustellen, hat die Infrastruktur-Sparte der Deutschen Bahn mit Unterstützung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) in ein stark verteiltes Netz von Wasserstofftankstellen investiert. Die Tankstellen sind an den regionalen Umschlagpunkten, primär im ländlichen Raum, verortet. Der Wasserstoff wird lokal erzeugt. Dazu sind auf den bahneigenen, betriebsnotwendigen Flächen umfangreiche Photovoltaik- und Windkraftanlagen installiert. Die Umwandlung in Wasserstoff erfolgt in mobilen Containerlösungen direkt vor Ort⁹². Die Container sind als technologisch fertig entwickelte, quasi standardisierte Massenware schnell installiert. So konnte das Tankstellennetz innerhalb kürzester Zeit deutschland-

weit etabliert werden. Als Logistik-Konzerne liefern die DB AG bzw. ihre Tochtergesellschaft DB Schenker oder andere vertraglich gebundene Partner die Güter nach dem Schienentransport mittels hauseigener Brennstoffzellenfahrzeuge bis zu ihrem Zielort. Die Fahrzeuge ebenso die Züge werden direkt am jeweiligen Umschlagpunkt mit dem lokal produzierten Wasserstoff betankt. (→ Abbildung 16). Die Tankstellen sind darüber hinaus öffentlich zugänglich. So können auch lokal ansässige Handwerker und Unternehmer Wasserstoff mit ihren Nutzfahrzeugen tanken. Durch das mutige Vanschieben des bundeseigenen Eisenbahnkonzerns ist in kürzester Zeit ein enges Netz von Wasserstofftankstellen entstanden. Von 2020 ursprünglich knapp 100 Tankstellen^{93, 94} ist das Netz von Wasserstofftankstellen innerhalb von 10 Jahren auf über 1000 (inklusive weiterer Investments Dritter) gestiegen. So ist die Verfügbarkeit des alternativen Kraftstoffs Wasserstoff für zahlreiche Aufgaben sowohl für die durch den DB-Konzern durchgeführten Transport- und Logistikdienstleistungen als auch für externe Dritte möglich. Die lokale Herstellung mittels regenerativer Energien unterstützt die Energie-Autonomie Deutschlands. Als integraler Systembaustein eines grünen Energiemarktes helfen die Wasserstofftankstellen die CO₂-Emissionen zu verringern, denn sie ermöglichen den fundamentalen Strukturwandel und damit den Ausstieg aus Kernkraft und Kohle.

92 <https://www.windkraft-journal.de/2018/12/31/mobile-containerloesung-zur-herstellung-von-wasserstoff-aus-windstrom/131287> (Abruf am 25.10.2020)

93 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/820836/umfrage/anzahl-der-wasserstofftankstellen-in-deutschland/> (Abruf am 25.10.2020)

94 <https://h2.live/> (Abruf am 25.10.2020)

5. Ladeinfrastruktur bis 2030

Die zugrunde liegenden Ladetechnologien und die damit einhergehende Ladeinfrastruktur ist ein wesentlicher Baustein, um den Verkehrssektor mittels Elektromobilität zu dekarbonisieren, denn über sie wird die Antriebsenergie den jeweiligen Verbrauchern zugänglich gemacht. Um eine bedarfsgerechte Bereitstellung des Stroms zu gewährleisten ist durch die steigende Anzahl von elektromobilen Verbrauchern und der gleichzeitig volatilen Einspeisung aufgrund zunehmend erneuerbarer Energiequellen auch im Jahr 2030 und darüber hinaus das Management von Ladevorgängen notwendig.

5.1 Elektrische Ladetechnologie und -infrastruktur

Im Jahr 2030 könnten weltweit erstmals mehr E-Autos verkauft werden als Verbrenner. Nach Prognosen der Boston-Consulting-Group könnten aufgrund stärkerer regulativer Vorgaben und sinkender Batteriekosten elektrische Fahrzeuge (vollständig batteriebetrieben und Fahrzeuge mit Hybrid-Antrieben) 2030 zu 51% am Weltmarkt verkauft werden.⁹⁵

Derzeit beläuft sich die Summe zugelassener Elektrofahrzeuge auf ca. 420.000. Davon sind rund 240.000 reine Batteriefahrzeuge und ca. 200.000 Plug-in-Hybride⁹⁶. Die Bundesregierung hat sich das Ziel bis zu 10 Millionen zugelassener Fahrzeuge bis 2030 gesetzt. Damit dieses Ziel erreicht werden kann muss auch die Ladeinfrastruktur nachziehen. Mit aktuell ca. 21.100 öffentlich-zugänglichen Ladepunkten ist ein erster Meilenstein erreicht, der nächste Schritt zielt auf eine Million Ladepunkte für das Jahr 2030 ab.⁹⁷ Hildgard Müller fordert als Präsidentin des Verbands der Automobilindustrie (VDA) die Installation von 2.000 Ladepunkten pro Woche gegenüber aktuell 200. Nur so lässt sich das Ziel der Bundesregierung von 1 Mio. öffentlicher Ladepunkte 2030 erreichen. Von den aktuell zugelassenen Elektrofahrzeugen müssen sich aktuell ca. 13 Autos eine Ladesäule teilen. Aufgrund steigender Zulassungszahlen, aber stagnierendem Infrastrukturausbau, kommen nach VDA-Berechnungen im Frühling 2021 bereits 20 Fahrzeuge auf eine Ladesäule.⁹⁸ Bei dieser Betrachtung wird allerdings vernachlässigt, dass insbesondere Privatanutzer mit Eigenheim üblicherweise einen privaten Ladepunkt bei sich zu Hause installieren. Darüber hinaus haben auch Mieter und Eigentümer in Hausgemeinschaften zukünftig einen

Anspruch auf die Installation von Ladeinfrastruktur. Mit dem Wohnungseigentumsmodernisierungsgesetz wurde im Herbst 2020 im Bundesrat u. a. dieser Anspruch gesetzlich festgeschrieben.⁹⁹ Dadurch wird der Ausbau von Ladeinfrastruktur nicht nur durch klare Ziele für die Anzahl und Ausgestaltung öffentlicher Ladepunkte, sondern durch den rechtsverbindlichen Anspruch auch auf privater Seite forciert.

Im Bereich der Energieversorgung gibt es verschiedene Ansätze, batteriebetriebene Fahrzeuge zu laden.

„Beim Laden mit **Wechselstrom (AC Laden)** wird die elektrische Energie aus dem Wechselstromnetz unter Verwendung von einer oder drei Phasen zunächst in das Fahrzeug übertragen. Das im Fahrzeug eingebaute Ladegerät übernimmt die Gleichrichtung und steuert das Laden der Batterie. Die Energieübertragung zwischen dem Wechselstromnetz und dem Elektrofahrzeug kann kabelgebunden oder kabellos, z. B. induktiv, erfolgen (→ Abbildung 17). In den meisten Fällen wird das Fahrzeug über eine geeignete Stromversorgungseinrichtung, z. B. eine AC-Ladestation oder AC-Wallbox, mit dem Wechselstromnetz verbunden.

Das Laden mit **Gleichstrom (DC Laden)** benötigt eine Verbindung des Fahrzeugs mit der Ladestation über ein Ladekabel, wobei das Ladegerät in der Ladestation integriert ist. Die Steuerung des Ladens erfolgt über eine spezielle Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation.

Üblich ist derzeit das leitungsgebundene Laden, auch **konduktives Laden** genannt. Beim **induktiven Laden** erfolgt die Energieübertragung mit Hilfe des Transformatorprinzips. Diese Technologie befindet sich

95 <https://www.bcg.com/de-de/publications/2020/drive-electric-cars-to-the-tipping-point> (Abruf am 20.10.2020)

96 <https://drehmoment.net/staat-foerdert-e-autos-doch-es-droht-eine-ladeluecke/> (Abruf am 11.12.2020)

97 <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/ladeinfrastruktur-1692644> (Abruf am 13.11.2020)

98 <https://nachrichten-online.eu/2020/11/06/elektroauto-boom-vda-fordert-2000-neue-ladepunkte-pro-woche/> (Abruf am 13.11.2020)

99 <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/neues-wohnungseigentumsrecht-1733600> (Abruf am 13.11.2020)

für Elektrofahrzeuge aktuell noch in der Entwicklung und Standardisierung. Aus diesem Grund ist sie kommerziell großflächig noch nicht verfügbar.

Beim Batteriewechsel wird die entladene Batterie aus dem Elektrofahrzeug entfernt und durch eine geladene Batterie ersetzt. Diese Möglichkeit der Energieversorgung spielt aktuell jedoch keine nennenswerte Rolle für die Energieversorgung von Elektrofahrzeugen (Pkw), sondern wird insbesondere für Pedelecs, E-Bikes u. ä. Fahrzeuge eingesetzt. Dafür gibt es derzeit noch keine einheitlichen Standards. Daher wird auf den Batteriewechsel nicht weiter eingegangen.

Die Definitionen für **Normal- und Schnellladen** sind in der EU-Richtlinie 2014/94/EU „Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“ definiert und ergeben sich einzig aus den beim Ladevorgang angewendeten Ladeleistungen. So werden alle Ladevorgänge mit einer Ladeleistung von bis zu 22 kW als Normalladen klassifiziert, Ladevorgänge mit höheren Leistungen werden als Schnellladen bezeichnet.

Neben den klassischen DC-Ladestationen mit Leitungen ab 50 kW aufwärts kommen zunehmend auch kleinere DC-Wallboxen mit Leistungen von 10–20 kW in Betracht.“¹⁰⁰

Grundsätzlich wird konduktives, also kabel- bzw. steckergebundenes Laden von induktivem (kontaktlosem) Laden unterschieden. Der Ladestrom kann stationär an Ladepunkten bereitgestellt werden. Er kann aber auch dynamisch, während der Fahrt, aufgenommen werden: induktiv mittels fest verbauter Bodenspulen oder konduktiv über eine Oberleitung bzw. eine in der Fahrbahn integrierte Stromschiene. Fahrzeuge können auch über das komplette Tauschen der leeren gegen eine vollgeladene Batterie mit Strom versorgt werden. Dies kann an stationären Wechselstationen, Fixpunkten mit verbauter Infrastruktur oder flexiblen, fluktuierenden Tauschpunkten erfolgen (→ Abbildung 17).

Die verschiedenen Ladekonzepte sind unterschiedlich komplex gestaltet und können sich in ihren technologischen Voraussetzungen erheblich unterscheiden.

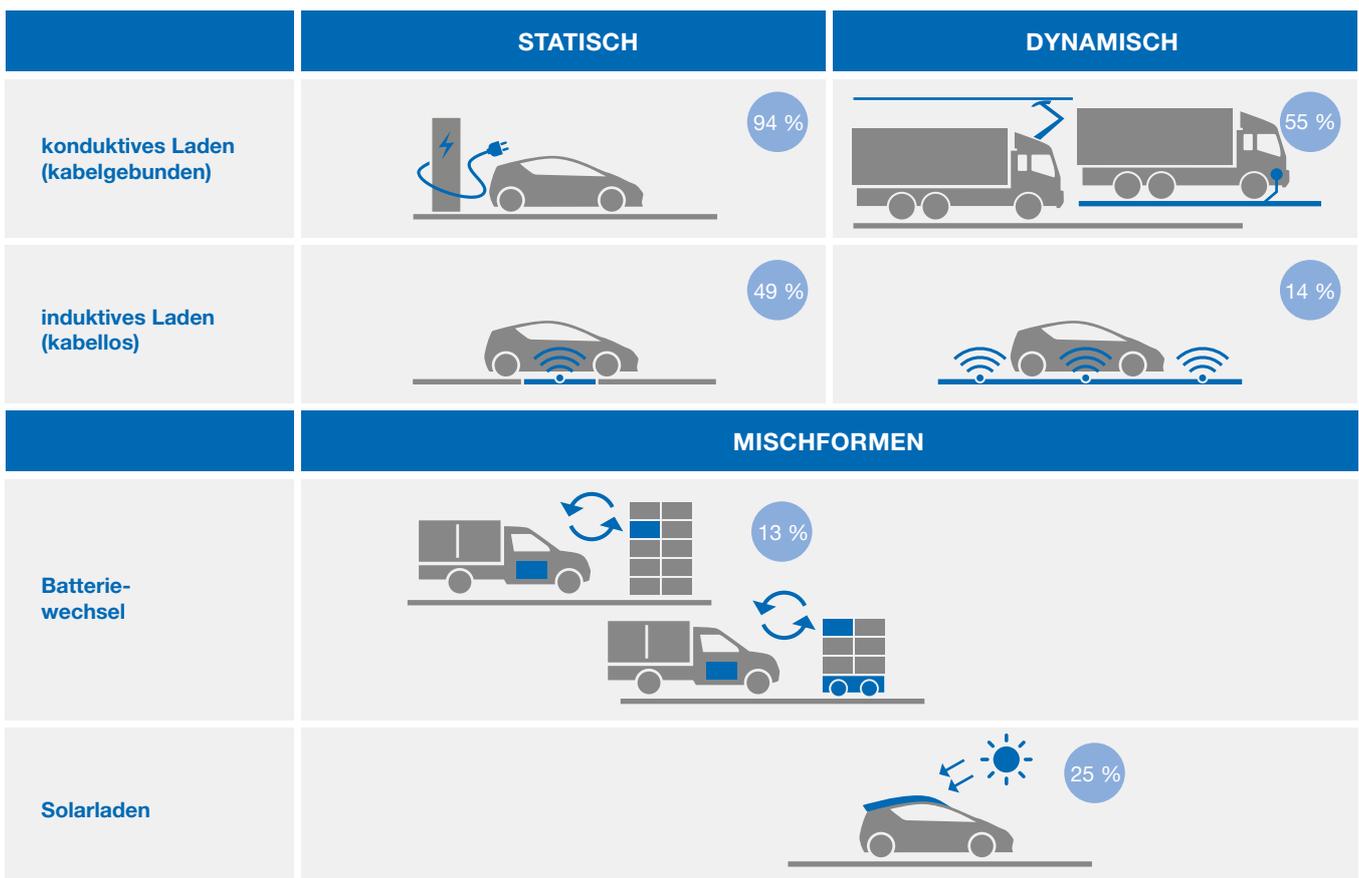


Abbildung 17: Wahrscheinlicher Einsatz von Ladetechnologien 2030 (Prozentangaben – Expertenmeinungen ¹⁰¹)

100 <https://www.dke.de/resource/blob/988408/a2b8e484994d628b515b56376f809e28/technischer-leitfaden-ladeinfrastruktur-elektromobilita-et---version-3-data.pdf>

101 <https://www.bayern-innovativ.de/seite/studie-ladeinfrastruktur-technologien-trends> (Abruf am 26.10.2020)

	AC-Laden	DC-Laden
Normalladen	3,7 kW  ~35 h	
	7,4 kW	
	11 kW	10 kW
	22 kW  ~3,5 h 95 %	20 kW
Schnellladen	43 kW 28 %	50 kW 76 %
Hochleistungsladen		150 kW 88 %
		250 kW  ~0,5 h
		300 kW
Ultra-Hochleistungsladen		350 kW 85 %
		450 kW
		500 kW 40 %
		800 kW

95 % Expertenbewertung der Technologiewahrscheinlichkeit

   ~0,5 h Ladeorte (Normale Steckdose / Schnellladesäule / Ultra-Schnellladesäule); berechnete Ladedauer (für 80 % Kapazität und max. Batterie-Reichweite 100 kWh) für Tesla S

Abbildung 18: Übersicht Lademöglichkeiten^{102, 103, 104}

Entsprechend groß sind die Unterschiede bei den Investitionskosten. So sind umfassende bauliche Maßnahmen in Form von Oberleitungen oder Bodenspulen bei der Straßenkonstruktion in der Erstellung gesamtwirtschaftlich wesentlich teurer als Wallbox-Systeme, die quasi als standardisierte Massenware genutzt werden. Das dynamische, induktive Laden wird 2030 vermutlich eine eher untergeordnete Rolle spielen. Seitens der EU fehlen dafür bisher einheitliche Regularien und die notwendige Technik ist vergleichsweise teuer in der Erstellung. Auch Wechselbatteriemodelle werden eher eine Nischenanwendung bleiben. Gründe dafür sind nach heutiger Einschätzung fehlende Systemstandards, die zumindest aktuell hohen Kosten für den Aufbau der Wechselstationen, Einschränkungen beim

Fahrzeugdesign und Batteriepackaging sowie die zu klärende Problematik des Batterieeigentums und damit verbundene Rechtsfolgen. Das induktive Laden mit assistierter Positionierung und das manuelle konduktive Laden werden nach Meinung von Branchenexperten weit bis flächendeckend verfügbar sein. Diese beiden Ladeoptionen gelten als günstig, effizient und im Vergleich zu den anderen Technologien als vergleichsweise einfach zu realisieren. Das dynamische, konduktive Laden wird sich vermutlich nur in ganz spezifischen, räumlich eng begrenzten Anwendungsbereichen wie bei Oberleitungsbussen durchsetzen (→ Abbildung 17). Die Elektrifizierung kompletter Fernstrecken auch nur abschnittsweise erscheint zum jetzigen Zeitpunkt als unwirtschaftlich und zu störanfällig.¹⁰⁵

102 <https://www.vde.com/resource/blob/1896388/8dc2a98adff3baa259d9e8ec2800bd4/fnn-hinweis--e-mobilitaet-download-data.pdf> (Abruf am 13.11.2020)

103 <https://www.bayern-innovativ.de/seite/studie-ladeinfrastruktur-technologien-trends> (Abruf am 26.10.2020)

104 <https://efahrer.chip.de/ladezeitenrechner> (Abruf am 13.11.2020)

105 <https://www.bayern-innovativ.de/seite/studie-ladeinfrastruktur-technologien-trends> (Abruf am 26.10.2020)

Neben den beschriebenen Ladekonzepten ist auch die bereitgestellte Ladeleistung und die Entwicklung bis 2030 von besonderer Bedeutung (→ Abbildung 18). Dabei lassen sich in der Abschätzung der wahrscheinlich verbreiteten Ladeleistung zwei Extreme beobachten. Zum einen ist da das vergleichsweise langsame Normalladen mittels Wechselstrom (AC-Laden). Es erfolgt meist über Nacht oder am Arbeitsplatz mit bis zu 22 kW. Zum anderen wird das schnelle Hochleistungsladen ab 150 kW Gleichstrom (DC-Laden)¹⁰⁶ in ad-hoc situativ genutzt werden, vergleichbar mit dem Tanken konventioneller Kraftstoffe.

Im Bereich der Wechselstromanwendung werden 2030 die höheren Leistungsbereiche des Normalladens (11 bzw. 22 kW) als wahrscheinlich verbreitet eingeschätzt. Die niedrigen Leistungsbereiche 3,7 bzw. 7,4 kW werden künftig eher weniger genutzt. DC-Heimladelösungen mit vergleichsweise niedriger Leistung ergänzen 2030 die dort bisher typisch verwendeten Wechselstromanwendungen (AC-Laden). Gleichstrom-Lösungen für den eher privaten Gebrauch mit Leistungen von 22 bzw. 24 kW^{107, 108} können auch direkt aus Heimenergiesystemen, beispielsweise einer Kombination aus Photovoltaikanlagen und Batteriepufferspeichern, Ladestrom beziehen. So lassen sich Selbstversorger-Einheiten etablieren, die auch unabhängig vom Stromnetz sein können (→ Kapitel 4).

Im Bereich des Gleichstroms (DC-Laden) wird bis 2030 eine flächendeckende Nutzung im dort eher niedrigen Leistungsbereich zu erwarten sein, auch wenn technologische Entwicklungen bis zu 800 kW grundsätzlich angedacht werden. Für den Gleichstrombereich wird die weite Verbreitung mittlerer Leistungsbereiche zwischen 150 und 350 kW erwartet. Mit Schnelllade- und Hochleistungsladetechnologien sind kurze Ladezeiten auch spontan und in größeren Ladeparks möglich (→ Abbildung 18).¹⁰⁹

Innerhalb der nächsten zehn Jahre ist eine große Dynamik und Vielfalt in der Entwicklung verschiedener Konzeptsätze und Prototypen im Bereich der Ladetechnologien und der damit verbundenen Interaktions-, Kommunikations- und Vernetzungstechnologien für zukünftige Ladeinfrastrukturen zu erwarten. Im Jahr 2030 ist dann ein entsprechend breites und innovatives Marktangebot geprägt durch die zunehmende Digitalisierung, Vernetzung von Systemelementen und den Datenaustausch zu erwarten. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden erarbeiten die Fachexperten der Energietechnischen Gesellschaft (ETG) im VDE eine detaillierte Studie unter dem Titel „intelligente Ladeinfrastruktur der Zukunft“. Die Ergebnispräsentation ist zur Jahresmitte 2021 geplant.

5.2 Lade- und Lastmanagement im Stromnetz 2030

Die Ladevorgänge und die dadurch zusätzlich entstehende Last auf das Stromnetz müssen zwingend gemanagt werden, um kritische Netzsituationen zu vermeiden. Die volatile Einspeisung von 65 % erneuerbarer Energien (gemäß Koalitionsvertrag zur Bildung der Deutschen Bundesregierung 2018) kann zu daraus resultierenden Überkapazitäten im Stromnetz führen. Das würde die Netzstabilität gefährden. Um die sehr gute Netzstabilität Deutschlands¹¹⁰ auch weiter zu erhalten, müssen langfristig die Verbrauchsgeräte, dazu gehören auch ladende bzw. ans Stromnetz angeschlossene Fahrzeuge, gesteuert werden. Die beabsichtigten 10 Mio. Elektrofahrzeuge benötigen 2030 eine Ladeleistung von 10 GW, was bei einer Gesamtlast von ~80 GW im Übertragungsnetz bereits 12,5 % beträgt. Bezogen auf die Daten von 2018 mit ~83.000 E-Fahrzeugen und einer Ladeleistung von ~250 MW ist das eine Steigerung um den Faktor 40.¹¹¹ Insofern sind eingehende Untersuchungen und realistische Abschätzungen der Auswirkungen ladender Fahrzeuge auf das Stromnetz zwingend notwendig. Der Einfluss von Bedarfsladen und regelmäßigem Laden auf den Gleichzeitigkeitsfaktor und weiterer Leistungsannahmen müssen für die Zukunft bestimmt werden. So können auf Grundlage von Erfahrungswerten und Simulationen Entscheidungen bzgl. der Netzdimensionierung getroffen werden. Erste valide Ergebnisse dazu sind Mitte 2021 zu erwarten¹¹².

Der Gleichzeitigkeitsfaktor bildet ab, wie viele elektrische Verbraucher in einem Haushalt oder Stromkreis gleichzeitig mit voller Leistung betrieben werden. Er wird mit der Leistungssumme aller zu berücksichtigenden Verbraucher verrechnet und lässt eine Aussage über die einzuplanende Gesamtanschlussleistung zu.

Beispiel: Beträgt die Summe der Leistungen aller in einem Einfamilienhaus installierten Verbraucher z. B. 25 kW und beträgt der Gleichzeitigkeitsfaktor 0,5, so ist eine Gesamtanschlussleistung von mind. 12,5 kW vorzusehen.

106 <https://www.golem.de/news/ladesaeule-tesla-bringt-supercharger-v3-mit-wasserkuehlung-in-position-1903-139870.html> (Abruf am 12.11.2020)

107 https://www.mobilityhouse.com/de_de/abb-dc-wallbox-ccs-chademo-24-kw-3-5-m.html (Abruf am 12.11.2020)

108 <https://new.abb.com/ev-charging/de/produkte/ladestationen-pkws/dc-wallbox> (Abruf am 12.11.2020)

109 <https://www.bayern-innovativ.de/seite/studie-ladeinfrastruktur-technologien-trends> (Abruf am 26.10.2020)

110 <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/weniger-stromausfaelle-in-deutschland/> (Abruf am 26.10.2020)

111 <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/vom-netz-zum-system/fnn-szenario> (Abruf am 26.10.2020)

112 <https://www.vde.com/de/fnn/aktuelles/ansturm-auf-studien-ausschreibung> (Abruf am 26.10.2020)

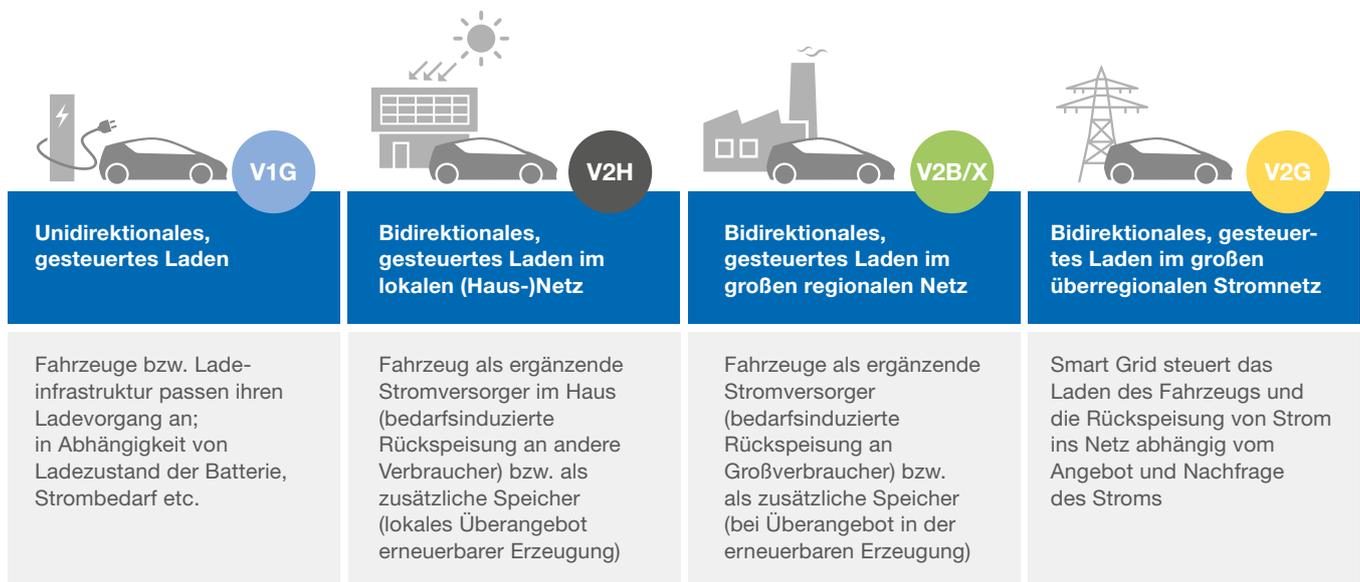


Abbildung 19: Konzepte für die Vernetzung von Verbrauchern und Stromnetz

Im Jahr 2030 werden die Hälfte aller (Haus-)Anschlüsse steuerbar sein und können somit die Flexibilität und Sicherheit des Stromnetzes sichern¹¹³. Allerdings müssen dafür frühzeitig die Weichen gestellt werden. Durch die Förderung von Ladepunkten sowohl im öffentlichen als auch privaten Umfeld wird bereits jetzt die Infrastruktur des Jahres 2030 und darüber hinaus technologisch geprägt, denn die verbauten Wallboxen sind auf mehrere tausend Steckzyklen und damit auf eine Lebensdauer von mehr als 15 Jahren ausgelegt¹¹⁴. So sollten in den kommenden Monaten einheitliche Standards für die Ausgestaltung der Steuerungshardware insbesondere auf der Seite der Netzbetreiber und Verbraucher abgestimmt werden, um ein intelligentes Lastmanagement zu ermöglichen. Dabei müssen die bereits existierenden Standards implementiert werden, um spätere Lösungen auch international verwerten zu können. Im Nachgang sollten diese Standards und prototypische Umsetzungen in der Praxis erprobt werden, um Funktionalität und Leistungsfähigkeit zu überprüfen. Anschließend sollten die Erkenntnisse in die nationalen und internationalen Expertenteams der Normung eingebracht werden. Dadurch kann es gelingen, die Ergebnisse nachhaltig zu sichern und international marktfähig zu machen. Auf diesem Weg kann sichergestellt werden, dass die als steuerbar eingebauten Wallboxen und weitere Stromabnehmer auch von außen angesprochen und mit den notwendigen Signalen erreicht werden. So wird schließlich ein mindestens netzdienliches Laden ermöglicht und ein problemloses Zusammenspiel mit weiteren Teilnehmern im Energienetz wie z. B. Energiemanagement-Systemen gewährleistet.

Die Vernetzung von Fahrzeugen, weiteren Verbrauchern, Stromversorgern und -erzeugern wird in Zukunft ein wichtiges Thema im Hinblick auf die Energie- und Mobilitätswende. Für die Umsetzung sind technisch verschiedene Konzepte und Ausbaustufen möglich (→ Abbildung 19).

Aktuell sind spezifische Einzellösungen für die Vernetzung der elektrischen Systeme hinter dem Hausanschlusspunkt verfügbar. Damit können **Vehicle2Home**-Anwendungen (V2H; deutsch: Fahrzeug-Haus-Kopplung) bereits realisiert werden. Hauptaugenmerk ist hier die Eigenverbrauchsoptimierung. Deren Ziel ist es, die Rückspeisung ins Netz des Energieversorgers so gering wie möglich zu halten, da sie für den (Privat-) Anwender unwirtschaftlicher ist als der Eigenverbrauch. So werden beispielsweise während der Stromproduktion mittels Solar-Anlage zusätzliche Verbraucher angesteuert, um die überschüssige Energie aufzunehmen. Das sind vor allem Verbraucher, die zeitlich flexibel eingeschaltet werden können, wie Wärmepumpe, Warmwasseraufbereitung oder Elektrofahrzeug. Die Fahrzeugbatterie wird dabei als quasi stationärer Zwischenspeicher genutzt, in den überschüssiger Solarstrom aus den Dachpanels des Hauses eingespeist wird und im Bedarfsfall auch wieder ins Haus und zu den dortigen Verbrauchern (z. B. Herd, Waschmaschine, Trockner) zurückgespeist wird. Um die verschiedenen Verbraucher und Stromquellen in einem Heimnetz zu steuern, braucht es intelligente Energiemanagement-Systeme. Diese zu standardisieren und somit eine flächendeckende Anwendung zu ermöglichen,

113 <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/vom-netz-zum-system/fnn-szenario> (Abruf am 27.10.2020)

114 <https://www.homeandsmart.de/wallbox-elektroauto-ladestation-daheim> (Abruf am 26.10.2020)

ist eine zukünftige Herausforderung und Thema in der internationalen Normung. Die Expertenteams haben bereits heute komplette Datenmodelle, „digitale Zwillinge“, für das Zusammenspiel von Elektrofahrzeugen und Energienetz sowie die dazugehörigen Architekturen erstellt (vgl. IEC/TC57 und IEC/TC69).

Die völlig flexible Nutzung der Fahrzeuge als Energiespeicher im Rahmen von **Vehicle2Grid**-Anwendungen (V2G; deutsch: Fahrzeug-Netz-Kopplung) beschreibt die Möglichkeit Fahrzeuge mit Blick auf das öffentliche Stromnetz zu steuern. Ziele sind die sichere und netzdienliche Integration des Einspeisen (Laden der Batterie) und Rückspeisen (Entladen) in ein immer volatileres Energiesystem (Netzdienstleistung auf Verteilnetzebene), Systemdienstleistungen gegenüber dem Übertragungsnetzbetreiber nach dessen Vorgaben/Bedarfen und die Vermarktung des selbst erzeugten Stroms. Um V2G zu realisieren, müssen die technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen für die unterschiedlichen Anwendungsfälle definiert werden. Dies betrifft zum einen das intelligente Messsystem mit dem zertifizierten Smart Meter Gateway als auch die sichere Kommunikation und Steuerung des Ladens und Entladens von Elektroautos durch Netz- und Energieversorger sowie neue Marktteilnehmer, wie Aggregatoren.¹¹⁵

Eine weitere Ausprägung der intelligenten Fahrzeug (-batterie)-Anbindung an Erzeuger, Verbraucher und Verteiler von elektrischer Energie wäre beispielsweise die Kopplung **Vehicle2Business** (V2B; deutsch: Fahrzeug-Unternehmens-Kopplung). Sie funktionieren ähnlich wie V2H, nur das hier größere Einheiten also das Unternehmen mit mehreren Fahrzeugen gekoppelt werden.

Ob und wie diese Konzepte in Zukunft umgesetzt werden, ist auch eine Frage der politischen Abstimmung zwischen den verschiedenen Beteiligten, die am System mitwirken. So setzen Automobilhersteller, auch aufgrund ihrer gesetzlichen Pflichten hinsichtlich Gewährleistung z. B. bei der Batterie als zentralem Element eines E-Fahrzeuges, andere Prioritäten als ein Stromversorger oder das automatisierte und selbstständig agierende Energie-Management-System innerhalb eines Hauses.

Für die Etablierung eines flexiblen europäischen Strommarktes bis 2030 und darüber hinaus und der angestrebten Nutzung von rund 10 Mio. Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 müssen Steuerungs-, Mess- und Sicherheitsmechanismen bedarfsgerecht etabliert werden, welche die Nutzung der Fahrzeugbatterien als Puffer und Speicher ermöglichen.

Kernstück der Integration von Elektrofahrzeugen und Energiesystemen sind Interoperabilität und Sicherheit durch internationale Normen und Standards, die die Zukunftsfähigkeit der erarbeiteten Lösungen sichern.

Im Sinne einer umfassenden technologischen Vorsorge sollte dabei auch an den unbefugten Eingriff von Dritten gedacht werden, die ungewollte Sicherheitslücken ausnutzen könnten. Denn sobald ein Kommunikations- und Steuerungskanal zwischen den einzelnen Akteuren eröffnet wird, muss dieser auch sicher sein. Ansonsten wird hier (unwissentlich) ein weiteres Einfallstor für unberechtigte Zugriffe eröffnet und entsprechend könnte mehr Schaden als Nutzen, sowohl für den einzelnen Verbraucher als auch für das Gesamtnetz, entstehen.

5.3 Verteilnetz und Tankinfrastruktur für Wasserstoff

Wasserstoff als Antriebsenergie kann in gasförmiger oder flüssiger Form genutzt werden. Für beide Formen existiert aktuell flächendeckend keine für den Alltagsbetrieb akzeptable Verteilinfrastruktur. Ein praktisch nutzbares Netz besteht durch die geringe Anzahl von Wasserstofftankstellen noch nicht, lediglich in sieben Regionen (Hamburg, Berlin, Rhein-Ruhr, Frankfurt, Nürnberg, Stuttgart und München) und an den verbindenden Autobahnen sowie Fernstraßen sind Wasserstofftankstellen zuverlässig verfügbar.

Bei zentraler Wasserstoffproduktion ist der Elektrolyseur nahe der Energieanlage (Windkraft oder Photovoltaik) gelegen. Dann muss der gasförmige Wasserstoff zum Nutzer transportiert werden, entweder mittels Rohrleitung oder über Straße, Schiene und Flüsse. Wasserstoff verursacht Materialversprödung und Korrosion. Aufgrund dieser werden zur rohrlungsgebundenen Verteilung von Wasserstoff bisher hochreine Edelstahlrohre genutzt, diese sind technologisch ausgereift. Die reinen Transportkosten sind vergleichbar mit denen von komprimiertem Erdgas (CNG). Eine flächendeckende Versorgung mit gasförmigem Wasserstoff mittels Rohrleitungen ist jedoch aktuell nicht verfügbar. Der Transport gasförmigen Wasserstoffs mittels Lkw steht ebenfalls vor Herausforderungen. Eine flächendeckende Versorgung über die Straße würde zu einer weiteren Verschlechterung der Energiebilanz führen, außerdem werden viele spezielle Tankfahrzeuge benötigt, die entsprechend gegen Korrosion geschützt sind. Die aktuell aussichtsreichste Lösung zur Verteilung von zentral hergestelltem Wasserstoff ist der Transport in supra-isolierten Tankwagen. Dazu muss der Wasserstoff verflüssigt werden. Das Verfahren dazu benötigt allerdings

115 https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/10/201012_NPM_AG5_V2G_final.pdf (Abruf am 03.11.2020)

zusätzlich 20 % der Ausgangsenergie. Alternativ ist auch eine dezentrale Produktion gasförmigen Wasserstoffes in unmittelbarer Nähe zum Verbraucher denkbar. Die Transportaufwände würden entfallen. Dem steht aber gesteigerter Platzbedarf und höhere Gestehungskosten bei einem dezentralen Aufbau einer Vielzahl von Elektrolyseuren gegenüber. Darüber hinaus sind die Energiekosten höher, wenn der Strom zur Wasserstoffproduktion über das Netz bezogen wird.¹¹⁶ Im Sinne einer dezentralen Produktion sind weiträumig verteilte Kleinstlösungen direkt an Windkraft- oder Photovoltaikanlagen denkbar, wenn der grüne Strom direkt und ohne Netzeinspeisung umgewandelt wird (vergleiche dazu Szenario Wasserstoff am Zug → Kapitel 4.3).

Die Bereitstellung der Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland erfolgt seit 2015 durch die H₂ MOBILITY GmbH & Co. KG. Deren Gesellschafter sind der Automobilhersteller Daimler AG, die Gashersteller Air Liquide und Linde sowie die Tankstellenbetreiber OMV, Shell und TOTAL. Stand September 2020 sind in Deutschland 85 öffentliche Tankstellen verzeichnet, weitere Tankstellen sind auf Firmengeländen.¹¹⁷ Damit ist das ursprüngliche Ziel von 100 Wasserstofftankstellen bis 2020 verfehlt.¹¹⁸ Deutschlandweit soll der Tankstellenausbau nur noch bei regionalem Bedarf erfolgen¹¹⁹. Im Gegensatz dazu sieht die Wasserstoffstrategie Bayerns bis 2023 explizit die Errichtung von 100 zusätzlichen Tankstellen im Freistaat vor. Ob dies mit einer Förderquote von 90 % für öffentliche und bis zu 60 % für Firmentankstellen gelingen kann, ist bei einem Fördervolumen von 50 Mio. € und Investitionskosten von 1 Mio. € je Tankstelle ungewiss.^{120, 121}

Die Gesamtkosten für den Umbau der Infrastruktur zu Wasserstoff werden auf 61 Mrd. € beziffert¹²². Im Rahmen der Schätzung wurden auch die Kosten für die Ladeinfrastruktur batteriebetriebener Fahrzeuge verglichen. Für eine erfolgreiche Verkehrswende sind beide Technologien notwendig, also sowohl Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge als auch Tankinfrastruktur für Wasserstofffahrzeuge. Zum Zeitpunkt der Untersuchung 2017 wurde das Ladesäulen-Netz langfristig als kostenintensiver gegenüber dem notwendigen Netz an Wasserstofftankstellen eingeschätzt¹²³. Ob diese Effekte weiterhin gelten und auch mit Blick auf das Jahr 2030 so zum Tragen kommen, ist aufgrund positiver Skaleneffekte der Elektromobilität zumindest unsicher.

Entscheidend ist vielmehr, dass beide Technologien entsprechend ihrer Eignung in spezifischen Anwendungsfeldern genutzt werden, damit sie die größten Effizienz- und Effektivitätseffekte erzielen. Dies kann durch den bedarfsgerechten und kostenoptimierten Ausbau der jeweiligen Infrastruktur noch unterstützt werden, wenn so viel wie nötig, aber so wenig wie möglich investiert wird.

116 Vortrag Dr. Werner Ponikwar, Managing Director Linde Hydrogen FuelTech auf der Hydrology Online Conference (Abruf am 08.10.2020)

117 <https://h2.live/> (Abruf am 14.11.2020)

118 <https://www.bundestag.de/resource/blob/660806/cdabebcac5d4d8f74ade53fba9bf95b8/WD-8-070-19-pdf-data.pdf> (Abruf am 14.11.2020)

119 https://content.h2.live/app/uploads/2019/07/H2M_Broschuere_Deutsch_201906.pdf (Abruf am 14.11.2020)

120 <https://www.stmwi.bayern.de/wasserstoffstrategie/> (Abruf am 14.11.2020)

121 <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/130-wasserstoff-tankstellen-ausbau/> (Abruf am 14.11.2020)

122 <https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2017/2017-03-09-h2-szenario-ires.html;nn=721054> (Abruf am 14.11.2020)

123 <https://user.fz-juelich.de/record/842477> (Abruf am 14.11.2020)

6. Fahrzeugtypen und Betriebsformen des Transportes

Bis zum Jahr 2030 werden die Assistenzsysteme in den Fahrzeugen weiter an Funktionsumfang gewinnen. Gekoppelt mit einem steigenden Maß an Sicherheit dieser Systeme werden verschiedene Stufen des automatisierten Fahrens sowohl auf abgeschlossenen Strecken als auch auf öffentlichen Straßen möglich sein. Bis zum vollautonomen Fahren sind allerdings noch technische Rahmenbedingungen und gesetzliche Leitplanken zu etablieren.

Auch im Jahr 2030 wird es weiterhin von Personen gesteuerte Pkw, Lkw und Busse geben, die mit aufwendigen Fahrerassistenzsystemen und vielen zusätzlichen Funktionen ausgestattet sind. Aber auch hochautomatisiertes Fahren auf Stufe 4 (→ Abbildung 20) wird im Jahr 2030 selbstverständlich sein.

Im Falle des Transports von Personen bietet sich eine (Teil-)Automatisierung des Fahrbetriebs an, damit der Fahrer sich erholen oder andere Aufgaben wahrnehmen kann. So ist es beispielsweise denkbar, dass die Dokumentationspflichten eines häuslichen Pflegedienstes während der Fahrt erfüllt werden und dadurch mehr Produktivzeit für die Arbeit am Patienten zur Verfügung steht oder sich über den Arbeitstag sogar mehr Patientenkontakte realisieren lassen.

Besteht die Logistikleistung aus dem Gütertransport wird im Jahr 2030 die reine Streckenüberbrückung einschließlich der in der Logistik-Branche auch „letzte Meile“ genannten Reststrecke technisch vollautonom möglich sein. Auf den letzten Metern zum Endkunden hingegen wird man auf die flexiblen Fähigkeiten menschlicher Arbeitskraft vorerst nicht verzichten wollen, falls eine persönliche Übergabe gewünscht ist und dies ggf. mit Premiumleistungen verbunden ist.

Langfristig ist damit zu rechnen, dass sich angesichts des zunehmenden E-Commerce und des damit wachsenden Paketaufkommens wie auch des demografischen Wandels eine automatisierte bis hin zur vollautonomen Logistik-Branche entwickeln kann. Abhängig von den technologischen Entwicklungen und den damit einhergehenden Nutzungsszenarien sind etablierte Hersteller

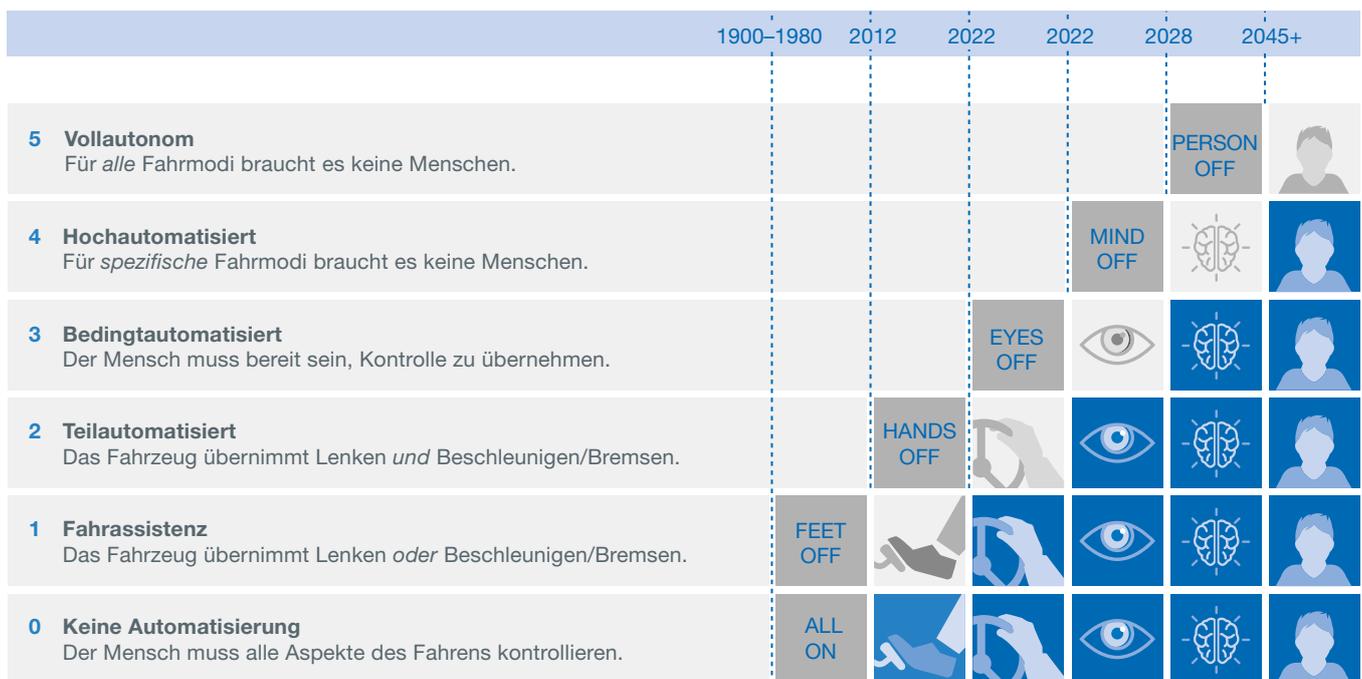


Abbildung 20: Stufenkonzept des autonomen Fahrens

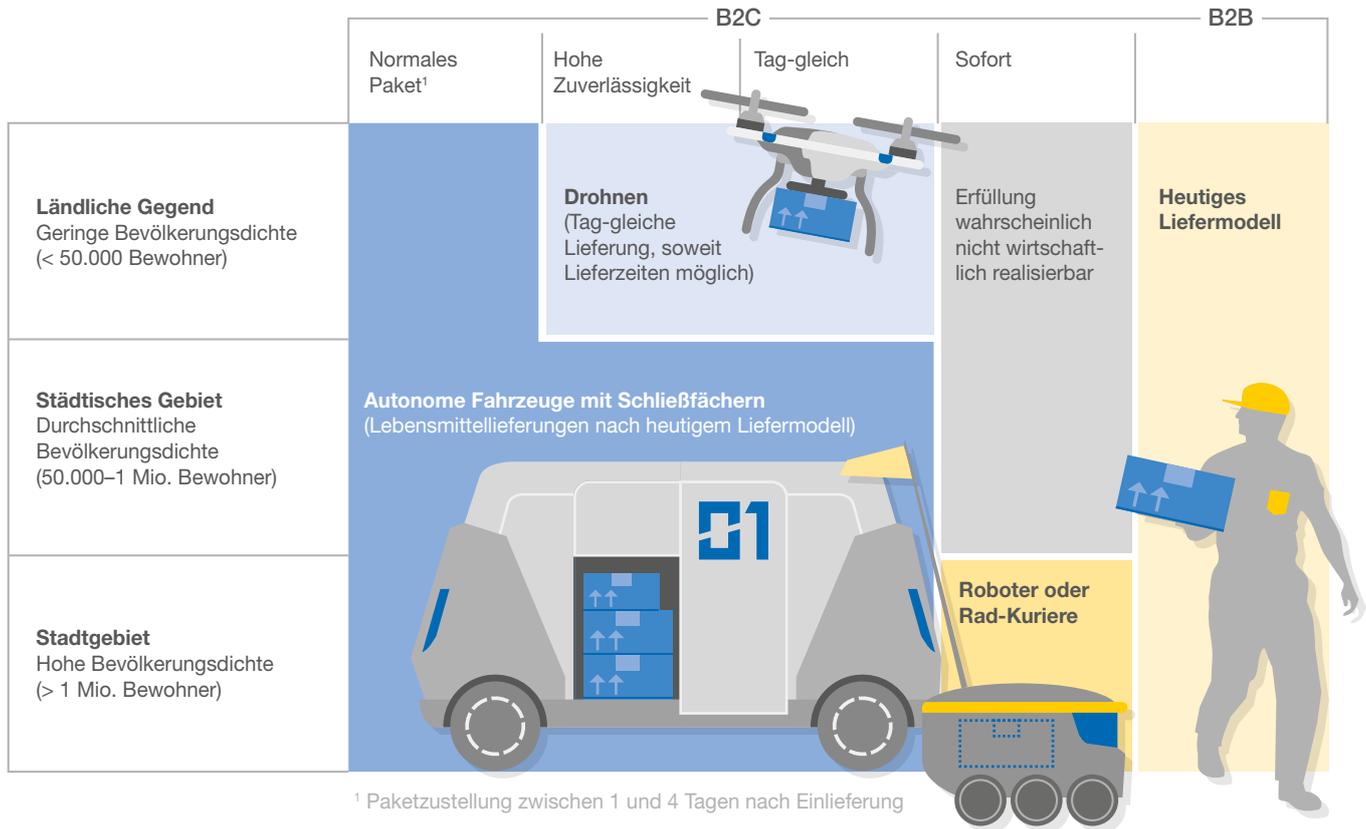


Abbildung 21: Zustelloptionen der Zukunft (in Anlehnung an McKinsey) ¹²⁴

von Fahrzeugen sowie Dienstleistungsanbieter schon heute gefordert, ihr Angebot zu überdenken. Eine interessante Anwendung könnte die „autonome Fahrzeugflotte“ sein, die beispielsweise den öffentlichen Nahverkehr oder die innerstädtische Güterzustellung organisiert. Für die Zukunft bieten sich also je nach Anforderungen der Empfänger und abhängig von deren räumlicher Verortung unterschiedliche Zustelloptionen an (→ Abbildung 21 ¹²⁵).

Die Vielfalt möglicher Einsatz- und Anwendungsszenarien für autonome Fahrzeuge ist insbesondere im Bereich der Elektromobilität interessant, da gerade hier das Thema IKT relevant ist. Ein serienmäßiger Einsatz von vollautonomen Fahrzeugen scheitert momentan sowohl an Land als auch in der Luft an der Gesetzgebung. Für das vollautonome Fahren ist eine weitere Änderung des im März 2017 angepassten Straßenverkehrsgesetzes notwendig. ¹²⁶

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur erstellte zum zweiten Halbjahr 2020 einen Entwurf für den Regelbetrieb autonomer Fahrzeuge. Der Entwurf liegt im Dezember 2020 den beteiligten Ressorts zur Abstimmung vor. Darin wird kein völlig personalloses, vollautonomes Fahren propagiert, sondern ein betreiberbasierter Ansatz, bei dem die Fahrzeuge überwacht werden, also eine technische Beaufsichtigung und im Notfall ein Eingreifen erfolgt. Sollte die Novellierung in der vorgeschlagenen Form angewandt werden, wäre Deutschland dadurch das erste Land der Welt mit einer Gesetzgebung für vollständig fahrerlose Fahrzeuge. Gelänge es den hiesigen Unternehmen, diese Anforderungen technisch und wirtschaftlich umzusetzen, bietet sich ihnen die Chance, als Innovationsführer am globalen Markt eine Pionierposition zu belegen. ^{127, 128, 129, 130}

124 <https://www.rolandberger.com/de/Publications/FreightTech-Die-Zukunft-der-Logistik.html> (Abruf am 23.10.2020)

125 www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/travel%20transport%20and%20logistics/our%20insights/how%20customer%20demands%20are%20reshaping%20last%20mile%20delivery/parcel_delivery_the_future_of_last_mile.ashx (Abruf am 03.05.2018)

126 www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2017/01/2017-01-25-automatisiertes-fahren.html (Abruf am 03.05.2018)

127 <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/gesetzesvorhaben-betriebserlaubnis-fuer-autonomes-fahren-soll-81-992-euro-kosten/26172020.html?ticket=ST-4876910-pikZ02idjuS7eHfzWXaq-ap5> (Abruf am 01.12.2020)

128 <https://www.heise.de/news/Gesetzesentwurf-Scheuer-will-Regelbetrieb-autonomer-Fahrzeuge-einleiten-4920962.html> (Abruf am 01.12.2020)

129 <https://background.tagesspiegel.de/mobilitaet/gesetz-zum-autonomen-fahren-bettvorleger-oder-sprungbrett-fuer-den-oepnv-der-zukunft> (Abruf am 01.12.2020)

130 <https://www.all-electronics.de/erster-gesetzesentwurf-zum-autonomen-fahren-vorgestellt/> (Abruf am 01.12.2020)

Neue Anbieter drängen in den Markt und realisieren schon heute innovative Konzepte, wie Shared Logistic (z. B. die Fracht- und Laderaumbörse Timocom). Hier teilen sich Unternehmen entweder Infrastruktur, beispielsweise zur Lagerung oder zum Warenumsatz, oder lasten Transportkapazitäten stärker aus, indem sie ihre Verkehre bündeln. Für die Zustellung sind auch Crowd Logistic Anwendungen denkbar (→ Kapitel 9.5). Hier erfolgt die Verlagerung der Transporttätigkeiten von klassischen Logistikdienstleistern auf Privatpersonen, die über freie Kapazitäten verfügen. Die Crowd Logistic bearbeitet im meist urbanen Raum Punkt-zu-Punkt-Zustellungen, also den direkten Transport der Waren vom Versandort zum Zielort.

Im dicht besiedelten urbanen Raum und in einem Umkreis von ca. 150 km werden sich für Logistik und Mobilität rein Batterie-elektrische Fahrzeuge einsetzen lassen, die hinsichtlich ihrer Größe mit heutigen Sprinter-Modellen vergleichbar sind. Idealerweise sind in 2030 bereits kleine vollautonome Fahrzeuge mit Geschwindigkeitsbegrenzungen und eingeschränkten Bewegungsradien im Einsatz und unterstützen damit den anstehenden technologischen Sprung auf vollwertige autonome Fahrzeuge.

Für die Personenbeförderung könnten 2030 vermehrt teil- bis hochautomatisierte und vollautonome People-Mover bzw. Kleinbusse zum Einsatz kommen. Hier sind insbesondere Lösungen im Sinne von Zubringer- bzw. Verteilerverkehren durch eine intelligente Vernetzung mit bestehenden Verkehrsangeboten vielversprechend. Technisch müssen autonome Fahrzeuge dafür an den bereits fließenden Verkehr angepasst werden. Insbesondere im Hinblick auf Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit der Fahrzeuge sind hohe technische Hürden zu nehmen und anschließend wird eine regulatorische Freigabe durch den Gesetzgeber erforderlich sein. Ob die Zeit bis 2030 ausreicht, lässt sich wegen der nicht absehbaren Entwicklungsgeschwindigkeit der zugrunde liegenden Technologie nicht vorhersagen.

Obwohl Tesla bereits 2020 mit einem Autopiloten für seine Fahrzeuge und auch mit autonomem Fahren wirbt, so sind dies doch eher Fahrassistenzsysteme¹³¹. Herbert Diess, Volkswagen-Konzernchef, erwartet erste marktreife, vollautonome Fahrzeuge zwischen 2025 und 2030, wenn auch nicht zwingend aus dem eigenen Haus¹³².

Das vollautonome Fahren, also Level 5, wird wahrscheinlich erst langfristig, bis 2045 (in Deutschland), zur Realität gehören, während Vereinfachungen für

den Fahrer bereits heutzutage verfügbar sind und das Anwendungsspektrum der Assistenzsysteme weiter ausgebaut wird. Für autonome Zustellkonzepte müsste, je nach detaillierter Ausgestaltung der eigentlichen Übergabe, auch das Postdienstleistungsgesetz novelliert werden. Damit ließe sich der Einsatz autonomer Zustellsysteme in Deutschland vereinfachen, denn Fracht- bzw. Logistik-Dienstleister würden entlastet und eine unpersönliche Zustellung in Form einer (verschließbaren) Ablage zum Standard erhoben.

Über diesen vielfältigen Einsatz von batteriebetriebenen Fahrzeugen hinaus werden in 2030 auch Brennstoffzellenfahrzeuge zum Einsatz kommen (→ Abbildung 14). Sie haben auf langen Strecken im Fernverkehr das bessere Kosten-Nutzen-Verhältnis und können die bisher üblichen Diesel-Lkw annähernd Eins-zu-eins ersetzen. Denn sollte eine vollständige Elektrifizierung auch des Fernverkehrs ohne die Nutzung von Brennstoffzellenfahrzeugen angestrebt werden, würden rund 1/3 mehr Fahrzeuge zur Erbringung der gleichen Transportleistung benötigt¹³³. Im ÖPNV konkurrieren Elektrobusse und Wasserstoffbusse aktuell auf dem Markt. Berlin strebt bis 2030 die Umstellung der Busflotte auf batterieelektrische Antriebe an und investiert dafür und für die benötigte Infrastruktur über den neuen BVG-Verkehrsvertrag 2 Mrd. €¹³⁴. Im Gegensatz dazu zielt Nordrhein-Westfalen mit seiner Wasserstoff-Roadmap bis 2030 auf die Nutzung von 3.800 Brennstoffzellen-Bussen für den ÖPNV im Bundesland ab¹³⁵. Eine klare Tendenz ist im ÖPNV aktuell und auch perspektivisch bis 2030 also weder für die eine noch für die andere Technologie ersichtlich.

131 https://www.tesla.com/de_DE/autopilot (Abruf am 11.12.2020)

132 <https://www.wiwo.de/my/unternehmen/auto/herbert-diess-herr-osterloh-weiss-was-er-an-mir-hat/26681784.html> (Abruf am 11.12.2020)

133 Frank Dreeke, Vorsitzender des Vorstands BLG LOGISTICS GROUP AG & Co. KG, Vortrag auf dem Deutschen Logistik Kongress 2020, 21.10.2020

134 <https://www.berlin.de/rbmskzl/aktuelles/pressemitteilungen/2020/pressemitteilung.957313.php> (Abruf am 14.11.2020)

135 <https://www.land.nrw.de/pressemitteilung/wasserstoff-roadmap-fuer-nordrhein-westfalen-vorgestellt> (Abruf am 14.11.2020)

7. Verkehrsträger

Transportleistungen werden über die Verkehrsträger Wasser, Schiene, Straße und Luft erbracht. Diese vier Verkehrsträger bieten unterschiedliche Möglichkeiten der Elektrifizierung. So sind Schienenwege technisch einfacher zu elektrifizieren als Autobahnen. Bei Wasserwegen ist dies zumindest leitungsgebunden annähernd unmöglich. Hier müsste eine Elektrifizierung, ähnlich wie bei Flugzeugen, im Schiff selbst über Batterien oder die Nutzung von Wasserstoff erfolgen. Für Luftfahrt und Schifffahrt besteht nach aktuellem Entwicklungsstand weiterhin der Bedarf an Flüssigkraftstoffen (→ Abbildung 22). Der Schwerpunkt der Betrachtungen im Technologieprogramm IKT für Elektromobilität liegt auf dem urbanen Lieferverkehr bzw. den dafür notwendigen Nutzfahrzeugen, die ein großes Potenzial zur Elektrifizierung bieten. Kopplungen mit anderen Verkehrsträgern (fachsprachlich Modal Split) werden im Programm auch mitgedacht.

7.1 Steigerung der Verkehrsleistung

Für das Jahr 2030 ist auf allen Verkehrsträgern ein Wachstum zu verzeichnen. Sowohl das Transportaufkommen (in Tonnen) als auch die Transportwege (in Kilometern) werden zunehmen. Im Schienen- und Straßenverkehr steigt die Transportleistung (tkm) prozentual mehr als die Transportaufkommen (t), was auf insgesamt längere Wege zurückgeführt wird. Doch insgesamt werden die Verkehrsträger Wasser und Schiene ein stärkeres Aufkommenswachstum verzeichnen als die Straße.¹³⁶

7.2 Nutzung vorhandener Netze

Für die Leistungserbringung ausschlaggebend ist die Verfügbarkeit des zugrundeliegenden Netzes, also die Dichte und Ausbaugüte.

Für die Mobilität und Logistik im urbanen Umfeld ist die Straße primärer Verkehrsträger und das enge inner- und außerstädtische Straßennetz mit seinem Verkehr das wichtigste Verteilnetz. Die bereits stark genutzten Straßenwege sind mit den aktuellen technischen Möglichkeiten kaum enger zu belegen und befinden sich

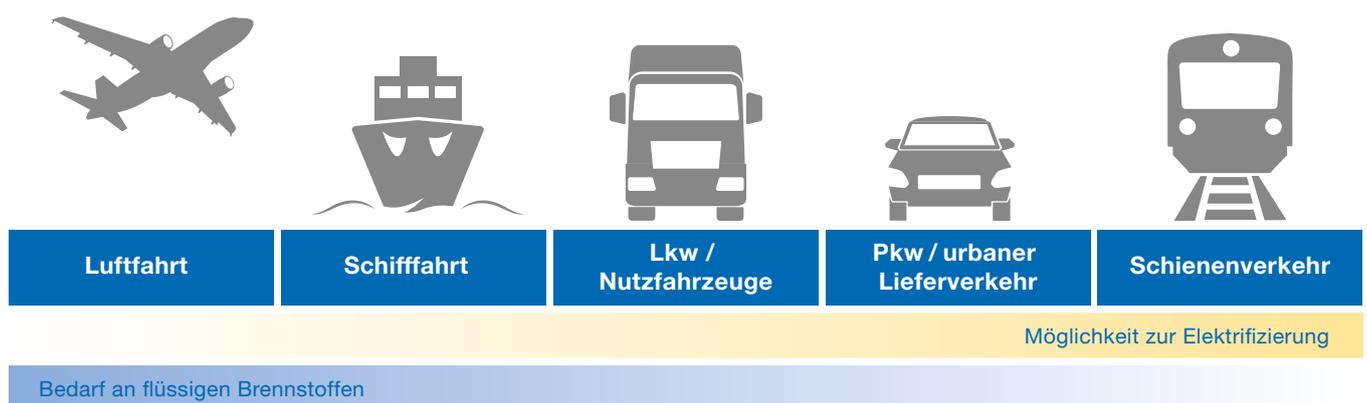


Abbildung 22: Verkehrsträger und Antriebsenergie

136 https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?__blob=publicationFile (Abruf am 30.10.2020)

vielfach an ihrer Kapazitätsgrenze. Autonome Fahrzeuge mit Platooning-Option, also stark zusammengrückte Einzelfahrzeuge, ermöglichen deutlich mehr Fahrzeuge auf dem vorhandenen Straßennetz.

Der Verkehrsträger Schiene wird im städtischen Logistikverkehr kaum genutzt. Ende 2020 wird das ehemalige Vorzeigeprojekt VW-Cargotram in Dresden zur Belieferung der Gläsernen Manufaktur von Volkswagen in zentraler Innenstadtlage eingestellt¹³⁷. Doch unabhängig von diesem Rückschlag sind kombinierte Verkehre Straße/Schiene durchaus interessant im Sinne der städtischen Versorgung. Insbesondere in den Tagesrandzeiten sind die städtischen Netze meist eher locker belegt, so dass hier zusätzliche Transportleistungen über die Schiene erbracht werden könnten. Alternativ bieten Schienenfahrzeuge oder Busse die Möglichkeit eines Huckepack-Verkehrs, indem beispielsweise Drohnen auf ihnen landen und energiesparend einen Streckenabschnitt mitfahren können. Der Einsatzradius der Drohnen und das durch sie erschlossene Liefergebiet könnten durch die Mitnahme vergrößert werden, weil hier Strecken zurückgelegt werden, ohne die in der Drohne vorhandene Antriebsenergie zu nutzen. Realistisch ist dieses erweiterte „Trittbrettfahren“ allerdings aktuell nicht, da Fahrzeuge der heutigen Bauart im Dachbereich technisch eng bebaut sind (z. B. Lüftungs- und Klimatechnik, Pantografen, Akkumulatoren) und über kaum bzw. keinen freien Raum zur Mitnahme verfügen.

In Deutschland gibt es nur wenige innerstädtische Wasserstraßen. Und üblicherweise sind die Losgrößen beim Transport auf dem Wasser sehr groß. In Deutschland sind Wasserstraßen deshalb kaum für eine Stadtlogistik nutzbar. Dennoch könnten auch hier Konzepte zur Sammlung mehrerer klein- und mittelvolumiger Güter Anwendung finden, soweit die nötigen Umschlagplätze innerorts bereits vorhanden sind oder bereitgestellt werden können. So ist es für Berlin denkbar, dass zumindest die zentral an der Spree bzw. am Landwehrkanal gelegenen Gebiete ihre Entsorgung ausschließlich über den Wasserweg vornehmen.

Der Verkehrsträger Luft wird 2030 innerstädtisch wohl eher eine Nischenposition belegen. Drohnen sind in Zustellszenarien denkbar (→ Kapitel 9.2) und diese werden in einzelnen, kleinen Projekten bereits prototypisch erprobt und genutzt.¹³⁸ Doch bedarf es hier intelligenter Konzepte, die Drohnen mit anderen Fahrzeugen kombinieren, um den Radius des Einsatzgebietes (unabhängig von der Batteriegröße) zu vergrößern. Darüber hinaus sind die (noch) relativ strikten legislativen Beschränkungen hinderlich für eine flächendeckende

Nutzung. So müssten auch hier die notwendigen Vereinfachungen realisiert werden. Dies ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht absehbar.

Angesichts der steigenden Transportleistung ist unabhängig vom zugrundeliegenden Verkehrsträger eine bessere Auslastung anzustreben. So werden die wichtigsten Straßen- und Schienenwege, insbesondere rund um Ballungsräume, zunehmend überbelegt¹³⁹. Da kein unbegrenzter Ausbau möglich ist, muss an einer Optimierung der Auslastung der bestehenden Netze gearbeitet werden. Konzepte und Technologien zur dichteren Belegung sind erforderlich. Andernfalls wird das Transportvolumen wegen Staus auf Autobahnen, stehender Güterzüge und festsitzender Binnenschiffe nicht mehr wachsen können.

137 <https://www.saechsische.de/dresden/lokales/dresden-cargotram-ende-einer-aera-5297894-plus.html> (Abruf am 26.10.2020)

138 www.post.ch/de/ueber-uns/unternehmen/innovation/innovationen-der-post-fuer-sie/drohnen (Abruf am 30.10.2020)

139 https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030-netzumlegungen.pdf?__blob=publicationFile (Abruf am 30.10.2020)

8. Akteure in Transport und Logistik

Die Akteure in Transport und Logistik sind Versender und Empfänger sowie Spediteur, Transporteur oder KEP-Dienstleister. Im Bereich der Personenbeförderung sind es Kunden und Dienstleister. In beiden Fällen können weitere Anbieter hinzukommen, die Teile der Abwicklung übernehmen.

8.1 Logistikakteure und deren Entwicklungspotenziale

Üblicherweise erfolgt die Abholung der Waren in Losgrößen > 1 beim Hersteller oder Versender, wobei Sonderanfertigungen herstellungsbedingt auch andere Transportumfänge nach sich ziehen können (→ Abbildung 23). Über die erste Meile als Zubringerverkehr erfolgt die Anlieferung in ein (Sammel-)Lager. Es schließt sich der Fernverkehr an und ein erneuter Umschlag in einem weiteren Lager und schließlich die Zustellung über die letzte Meile zum Empfänger bzw. (End-)Kunden. Betrachtet man die Möglichkeiten zur Elektrifizierung dieser Transportkette ist insbesondere die erste und letzte Meile hervorzuheben. Der Fernverkehr kann dann elektrisch erfolgen, wenn er über die Schiene abgewickelt wird. Alternativ bietet sich für den Fernverkehr auch die Nutzung von Wasserstoff, respektive E-Fuels, an.

Der **Versender** (1) fordert ein Tür-zu-Tür-Angebot an. Abweichend vom bisherigen Vorgehen, bietet die zunehmende Digitalisierung hier Möglichkeiten zu Online-Ausschreibungen, Preisanfragen und Vergaben bis zur Nutzung von Transportbörsen (→ Kapitel 9.5). Für den Auftragnehmer kann die Nutzung von Preistransparenz-Software oder intelligenten Abstimmungssystemen ebenfalls vorteilhaft sein. Sie führen, wie beim Versender, auch zu einer Beschleunigung der organisatorischen Auftragsprozesse. Erfolgt der Versand über standardisierte Einheiten (z. B. Päckchen, Pakete) kann der Versender auf bestehende Dienstleistungsangebote durch verschiedene Postunternehmen zurückgreifen.

Der Transport auf der **ersten Meile** (2) kann autonom erfolgen, sollten derartige Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Der Fahrer kann aber auch in einem klassischen Fahrzeug durch ein dynamisches Routing unterstützt werden. Gleichzeitig bieten intelligente Labeling-Systeme bereits heute die Möglichkeit, den aktuellen Status und den geographischen Ort der Sendung an alle Beteiligten im Sinne einer transparenten Transportkette zu übermitteln.

Bei der **Lagerhaltung** können verschiedene Systeme zur Anwendung kommen (3). Von den bisher eher üblichen Methoden Just-in-time oder Just-in-Sequence

bis zur chaotischen oder vollautomatisierten Lagerhaltung sind je nach organisatorischen Spezifika unterschiedliche Ansätze denkbar. Auch die Lagerung kann durch die Digitalisierung optimiert werden, beispielsweise durch ein Inhouse-Routing der einzelnen Picker bei einer chaotischen Lagerhaltung, die zu einer Zeit- und dadurch Kostenoptimierung führen kann.

Die zunehmende Digitalisierung im **Fernverkehrstransport** ermöglicht durch Telematiksysteme bereits heute eine Vorhersage der Ankunftszeit (4). Auch hier können alle Beteiligten über Status und Ort der Lieferung informiert werden. Platooning, selbstfahrende Lkw, mindestens aber der verstärkte Einsatz von Fahrerassistenzsystemen, führen hier zu einer Effizienzsteigerung.

Die **Lagerung** vor der Auslieferung zum Empfänger (5) ermöglicht erneut Optimierungspotenziale wie bei der Lagerhaltung beschrieben. Es können aber auch weitere Potenziale entlang der gesamten Transportkette erschlossen werden; beispielsweise durch digitale Frachtbriefe, intelligente Verträge, wertschöpfende Versicherungs- und Finanzdienstleistungen. So ist bereits heute eine Kopplung von Telematik-Informationen mit einzelnen Versicherungsnehmern möglich, was sich in einer Flexibilisierung der Versicherungsprämien niederschlägt.

Die Zustellung der **letzten Meile** vom Lager zum Empfänger (6) wird wieder durch automatische Routings, Tourenführungen abhängig von Störungen (z. B. Baustellen, Staus, Sperrungen), durch Fahrerassistenzsysteme bis hin zu autonomen Fahrzeugen und vollautonomer Zustellung bestimmt. Entsprechende Optimierungspotenziale ergeben sich hier wieder durch die Digitalisierung.

Der **Empfänger**, ggf. (End-)Kunde (7), kann aufgrund der immer weiteren Verbreitung von Informations- und Kommunikationstechnologien auf den Lieferprozess Einfluss nehmen. So kann er bereits bei seiner Bestellung die Auswahl der Transportdienstleister beeinflussen, sei es indem er konkrete Unternehmen auswählt oder ausschließt oder sei es, dass er über die Kosten (-Pauschale) die Versandleistung beeinflusst. Darüber hinaus kann der Empfänger auch während

8.3 Einflussfaktoren zukünftiger Transportleistungen

Zukünftige Transportdienstleistungen werden von drei Faktoren bestimmt: intelligenten Systemen, der Automatisierung und der Integration der beiden vorgenannten Faktoren.¹⁴²

Intelligente Systeme zeichnen sich durch Sensoren und Konnektivität (IoT – Internet der Dinge) aus, um Daten zu erfassen und zu senden. Um sie einzusetzen, sind Standards für die Nahbereichskommunikation und solche für Weitverkehrsnetze notwendig. Die von den Sensoren generierten Daten (Big Data) können durch weitere Technologien (z. B. Computervision, Bilderkennung, Künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen) ergänzt werden. Erst die konsequente Verarbeitung und Analyse aller Daten ermöglicht den zielgerichteten Umgang mit den zu erwartenden großen Datenmengen und deren sinnvollen Nutzung.

Daten werden vielfach als Währung des 21. Jahrhunderts beschrieben; die Komplexität und inhärente Vernetztheit der Logistik bieten zahlreiche Chancen für datengestützte Entscheidungen und Optimierung¹⁴³. Je mehr Daten vorhanden sind, desto valider können die Entscheidungen sein, wenn die Flut von Daten hinreichend gemanagt wird.

Die Automatisierung kann aufbauend auf den intelligenten Systemen mittels statischer und mobiler Automatisierungssysteme erfolgen. Hier sind u. a. selbstfahrende Pkw und Lkw, unbemannte Luftfahrzeuge (z. B. Drohnen) und andere fahrerlose Transportfahrzeuge zu nennen. Mit längerer Lebensdauer, fallenden Preisen und steigender Produktivität werden Robotersysteme in der Logistik immer gängiger, hauptsächlich jedoch zunächst in geschlossenen Systemen, wie Lagern zur effizienten Kommissionierung, und das unabhängig von Pausen- und Arbeitszeiten oder Lohnkosten.¹⁴⁴

Der Integration der intelligenten Systeme dienen Technologien wie Cloud Computing, digitale Ökosysteme, Logistikplattformen, digitale Zwillinge und Blockchain. Die Plattformlösungen der Logistik- und Mobilitätsanbieter müssen in der Lage sein, eine Vielzahl von Stakeholdern aus den verschiedenen Branchen und mit unterschiedlichen Digitalisierungsgraden zu integrieren.¹⁴⁵ Und so müssen insbesondere digitale Ökosys-

teme für die einzelnen Akteure gut durchschaubar und intuitiv sein, damit sie Vertrauen in diese haben und sie entsprechend nutzen.

Gemeinsam können die drei Faktoren (intelligente Systeme, Automatisierung und Integration) die Transparenz und Effizienz zukünftiger Transportleistungen steigern. Zukünftig werden sich die am Markt befindlichen Akteure, seien es traditionelle Anbieter oder innovative Start-ups, bei konsequenter Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien weiterentwickeln. Perspektivisch sind große Logistik- bzw. Mobilitätsplattformen zu erwarten, die dem Kunden ein barrierefreies One-Stop-Shop-Erlebnis bieten. Die Marktplätze reichen von einfachen Zusatzangeboten bis hin zu umfassenden „Logistics-as-a-Service“-Lösungen und benötigen eine konsequente und kontinuierliche automatische Abstimmung und Optimierung zwischen den Beteiligten. Daneben werden sich Netzwerkspezialisten etablieren, die insbesondere eng verflochtene und vielfältige Transportdienstleistungen abdecken können. Die Anbieter sind dabei auf eine Branche oder Region spezialisiert. Dieses hohe Maß an Spezialisierung erschwert die Übertragung auf übergeordnete, allgemeinere digitale Plattformen, stellt aber gleichzeitig ein sehr klares Alleinstellungsmerkmal dar, welches monetarisiert werden kann. Eine dritte Form der Anbieter im zukünftigen Ökosystem der Logistik und Mobilität sind Asset-Betreiber – also digitalisierte, effiziente Infrastrukturbetreiber, die über ein hohes Maß an Analyse-, Automatisierungs- und Integrationsfähigkeit verfügen. Sie stellen ihre Infrastruktur andauernd und in optimaler Form zur Verfügung und sorgen damit dafür, dass der Güter- und Personentransport reibungslos erfolgen kann. Als vierte und vollkommen integrierte Form sind schließlich Meta-Plattformen denkbar, die Informationen aus verschiedenen Quellen aggregieren. Aufgrund der damit verbundenen Marktdominanz müsste es in Zukunft mehrere dieser Meta-Plattformen geben, um zumindest ein ausgleichendes Oligopol auf dem Markt zu wissen. Alternativ könnten sich auch mehrere, parallel existierende regulierte Plattformen ergeben.^{146, 147}

Alle Anbieter werden dabei um den direkten Kontakt zum Kunden bemüht sein, bietet er doch die Möglichkeit, den Kunden unmittelbar für sich zu gewinnen und so Geschäft, höhere Margen und entsprechende Gewinne zu realisieren.

142 <https://www.rolandberger.com/de/Publications/FreightTech-Die-Zukunft-der-Logistik.html> (Abruf am 02.11.2020)

143 <https://www.rolandberger.com/de/Publications/FreightTech-Die-Zukunft-der-Logistik.html> (Abruf am 02.11.2020)

144 <https://www.rolandberger.com/de/Publications/FreightTech-Die-Zukunft-der-Logistik.html> (Abruf am 02.11.2020)

145 <https://www.rolandberger.com/de/Publications/FreightTech-Die-Zukunft-der-Logistik.html> (Abruf am 02.11.2020)

146 <https://www.rolandberger.com/de/Publications/FreightTech-Die-Zukunft-der-Logistik.html> (Abruf am 02.11.2020)

147 Ulrich Müller-Steinfahrt, Leiter des Instituts für angewandte Logistik (IAL), Hochschule für Angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Vortrag auf dem Deutschen Logistik Kongress 2020, 23.10.2020

9. Logistikszenerarien 2030

Die Entwicklung zukünftiger Logistikangebote ist abhängig von den bereits beschriebenen Einflussgrößen wie beispielsweise Antriebsenergie, Energiemarkt und Ladetechnologien. Dazu kommen noch weitere gesellschaftliche und handelsspezifische Trends, welche die Mobilität und Logistik zukünftig beeinflussen. In ihrem Zusammenspiel und durch gegenseitige Wechselwirkungen lassen sich anschauliche Szenarien ableiten, die verschiedene Teilaspekte der Logistik im Jahr 2030 beleuchten. Schließlich zeigen sich einige Anhaltspunkte für nachhaltige Mobilität und Logistik in der Zukunft.

9.1 Trends in der Logistik

Die städtische Logistik unterliegt vier maßgeblichen Trends:

1. **Urbanisierung** – bis 2030 werden ca. 79 % aller Bewohner Deutschlands in Städten wohnen – das entspricht einem Zuwachs der Stadtbevölkerung von 1,6 Mio. Menschen gegenüber 2018. Zum Vergleich: das entspricht der Bevölkerung der Stadt München – die sich zusätzlich auf alle Städte verteilt.
2. **E-Commerce** – der Online-Handel nimmt beständig zu. Die KEP-Branche geht von einem stetigen Wachstum der Sendungsanzahl aus, so betrug diese Zunahme im Jahr 2019 3,8% gegenüber dem Vorjahr. Täglich werden in Deutschland rund 7 Mio. Empfänger mit mehr als 12 Mio. Sendungen bedient; knapp 30 % davon sind gewerbliche Kunden.¹⁴⁸
3. **Kundenzufriedenheit** – Kunden vergleichen zunehmend Anbieter und deren Lieferanten. Aktuell herrscht eine ausgeprägte „Sofort“-Mentalität. Der Kunde erwartet möglichst eine taggleiche oder 24-Stunden-Lieferung, jedoch ohne eine entsprechende Zahlungsbereitschaft auf Kundenseite insbesondere für alternative Lieferoptionen und innovative Zustellservices.¹⁴⁹
4. **Einzelhandelskampf** – Der Einzelhandel überlässt den Endkundenmarkt nicht kampflos dem Online-Handel. Innerorts-Lieferungen auch von Klein- und Kleinstmengen bis hin zur Stückzahl 1, zumal in flexiblen Zeitfenstern, führen zu steigendem Verkehr, einerseits durch die Belieferung der stationären Händler innerorts und andererseits zu den Endkunden.

Für den Logistik-Bereich lassen sich aus den vorgenannten Informationen verschiedene Szenarien herleiten, die jeweils unterschiedliche Aspekte aufnehmen und widerspiegeln. Die einzelnen, differenzierten Szenarien zeigen im Folgenden verschiedene Aspekte des Transports, der Verteilung, der Zustellung und teilweise der damit verbundenen Energiebilanz im Bereich Logistik und Mobilität auf.

9.2 Flybot – der Fliegenroboter zur autonomen Einzelzustellung: ein autonomes Zustellszenario der Zukunft

Flybot ist ein autonomes Fluggerät für die Einzelzustellung in urbanen Ballungsräumen. Ein Flybot ermöglicht die Zustellung an einen spezifischen Empfänger zu einem kurzfristig vorher vereinbarten Zustellort, unabhängig vom eigentlichen Wohn- oder Arbeitsort, als typische Zustelloptionen (→ Abbildung 24). Bei Vereinbarung einer Lieferung gibt der Empfänger zunächst nur seinen Wohnort an. Ist die Sendung im Verteilzentrum eingetroffen, detailliert der Empfänger in einem zweiten Schritt, wann er die Sendung wo in Empfang nehmen möchte. So sind Zustellungen auch im öffentlichen Raum möglich, z. B. im Park, beim Spaziergang oder an einem Umsteigepunkt. Diese hochflexible Zustellung vermeidet die Lagerung von nicht zustellfähigen Sendungen beim Logistikdienstleister, dessen Partnern oder auch Nachbarn.

Unwirtschaftliche zweite und dritte Zustellversuche oder Abholungen in teilweise räumlich weit entfernten Abholpunkten werden drastisch reduziert, da der Empfänger spezifisch nach seinen aktuellen Situations-, Tages- und Zeitverhältnissen erreicht werden kann. Flybot, der „Fliegen“roboter, lässt sich analog auch für Abholvorgänge, beispielsweise im Rahmen von Rücksendungen, nutzen.

148 <https://www.biek.de/download.html?getfile=2623> (Abruf am 28.09.2020)

149 <https://www.biek.de/download.html?getfile=2623> (Abruf am 28.09.2020)



Abbildung 24: Visualisierung Flybot

Anders als bei den heute üblichen Drohnen ist der Flybot nicht auf einen bestimmten Start- und Landeplatz festgelegt, sondern sucht sich diesen selbst. Als mechatronische Fliege kann Flybot überall starten und landen. Die Wartezeit bis zur Abholung überbrückt Flybot dabei hängend wie eine Fliege, also durchaus auch senkrecht oder über Kopf, an festen baulichen Objekten, beispielsweise an Laternenpfählen oder Ampelmasten. So wird öffentlicher Raum optimal genutzt, Lager- und Ladeflächen können reduziert werden. Der Wechsel zwischen landen, warten, starten wird über eine autonome horizontale sowie vertikale Lauf- und Kletterbewegung und den selbsttätigen Wechsel zwischen diesen realisiert. In der Ausführung als autonomes Zustellgerät orientiert sich Flybot mit seinem Klettermechanismus am Rise-Roboter von Boston Dynamics, ergänzt um eine Drohneneinheit für den Flugbetrieb. Die Authentifizierung kann mittels NFC, Gesichtserkennung oder persönlicher elektronischer

Signatur(-karte) erfolgen. Damit ist die ausschließliche Zustellung an den Empfänger gewährleistet, was auch den Versand von sensiblem Frachtgut (z. B. Medikamente) ermöglicht.

9.3 Litfaß-Logistik – Dienstleister-unabhängiges Locker-System als Zustellszenario im urbanen Raum

Das Szenario „Litfaß-Logistik“ nutzt die vorhandene Infrastruktur und führt sie einem zweiten Verwendungszweck zu. Die „Litfaß-Logistik“ ist dabei eine anbieter-unabhängige Variante des Mikro-Depots.

Zentrale Punkte sind dabei die Litfaßsäulen in deutschen Städten. Ursprünglich für Werbezwecke erbaut, sind heute rund 51.000 Säulen deutschlandweit in Wohngebieten und stark belebten Vierteln meist mit



Abbildung 25: Visualisierung Litfaß-Logistik

werbendem Fokus installiert. Litfaßsäulen lassen sich aber auch in anderen Ländern finden, beispielsweise in Dänemark, Frankreich, Schweiz, Kanada und den USA. Teilweise sind auch heute schon Mehrfachnutzungen für Litfaßsäulen etabliert. So sind in Stuttgart teilweise Fahrkartenautomaten, in Karlsruhe beispielsweise WC als Stadtmöbel oder in Dresden Telefonzellen in den Säulen installiert. Dessen ungeachtet ist die überwiegende Mehrheit der Litfaßsäulen lediglich leerer, umbauter Raum, jedoch mit einer bemerkenswerten Reichweite im Sinne von Personenkontakten. So sind beispielsweise in Essen von 217 Standorten 126 in Wohngebieten und 75 in Szenevierteln (mit Überschneidungen).

Wie also könnte man den leeren Raum und die hohe Verfügbarkeit sinnvoll nutzen? Als Logistiker-unabhängige Paketstationen in der Stadt! Die Paketabholung durch den Endkunden erfolgt wohnort- bzw. arbeitsnah an einer runden Packstation (→ Abbildung 25).

Die Litfaßsäule wird dafür mit einem mechanischen Handling-System ausgestattet, ähnlich den automatischen Parkrobotern in Parktürmen. Je nach Größe der Litfaßsäule können dann zwischen 75 und 110 Pakete (Richtgröße Schuhkarton) pro Standort gelagert werden. Die Befüllung der Litfaß-Paket-Säulen erfolgt durch die Logistikdienstleister selbst, aber ähnlich zu bereits etablierten Systemen wie Packstationen. Der Dienstleister profitiert, da weniger Stopps notwendig sind, um den Umfang einer vollen Ganztagestour (ca. 200 Pakete) zuzustellen. Dadurch kann sich eine Einsparung im Personal- und Fahrzeugbedarf ergeben, da sich die sehr zeitaufwendige direkte Haus- bzw. Wohnungszustellung erübrigt. Auch zweite Zustellversuche, die Abgabe im Paketshop oder die Lagerung in einer gebrandeten Packstation werden (zumindest für kleine bis mittlere Pakete) entfallen. Darüber hinaus könnten die Litfaß-Pack-Stationen auch Rücksendungen entgegennehmen, die der Mitarbeiter des Logistik-Dienstleisters

dann zurück zum Depot transportiert. Die Vermeidung von Leerfahrten wäre also ein weiterer Vorteil für den Dienstleister. Die Authentifizierung des Abholers kann beispielsweise durch das Scannen eines zuvor übermittelten QR-Codes erfolgen. So ist kein Personal erforderlich, wie beispielsweise bei Paketshops, und die Abholung könnte rund um die Uhr erfolgen.

Der Einsatz als Werbefläche ist weiterhin möglich, so dass der ursprüngliche Nutzen und eine entsprechende Finanzierung für den Außenwerber weiterhin erhalten bleiben. Für die Installation der notwendigen Technik ist eine entsprechende Anfangsinvestition erforderlich. Hier könnte ein Kooperationsnetzwerk zwischen verschiedenen Logistikdienstleistern und Außenwerbern eine stabile partnerschaftliche Grundlage liefern.

Die Säulen sind als unabhängige Locker-Systeme zu verstehen, welche durch alle Logistik-Dienstleister gleichermaßen genutzt werden können; anders als dies beispielsweise bei den Paket-Stationen von DHL oder den Amazon-Lockers üblich ist.

Mit dem Betreiberwechsel der Berliner Säulen von der Wall AG hin zu einem Stuttgarter Dienstleister Ende 2019 wurden die rund 2.500 bestehenden Säulen abgebaut, um sie im Anschluss durch 1.500 modernere Säulen zu ersetzen¹⁵⁰. Aktuell sind für Ilg-Außenwerbung GmbH ca. 1.000 Litfaßsäulen-Standorte unwirtschaftlich, da sie der „reinen Werbung“ dienen.¹⁵¹ Hier bietet sich für die Ilg-Außenwerbung als neuem Betreiber eine einmalige Gelegenheit. Das Konzept der Litfaßsäule wird an die sich ändernden Anforderungen einer sich wandelnden Gesellschaft angepasst und gleichzeitig wird ein wirtschaftlicher Mehrwert für den Betreiber generiert. Auch wenn Ilg-Außenwerbung selbst die Säulen zunächst nur für 15 Jahre betreiben wird, ist mit einer Lebensdauer von 60–70 Jahren zu rechnen. Eine Nicht-Nutzung des begrenzten urbanen Raumes erscheint mit Blick auf die vermutlich kontinuierliche Zunahme von Zustellobjekten und dem damit verbundenen notwendigen Lagerraum weder in Berlin noch in anderen Städten sinnvoll.

9.4 PC – Paket Concierge – Bündelung von Paketen und individualisierte Zustellung

Das zunehmende Paketvolumen führt zu mehr Logistik-induziertem Verkehr in den Innenstädten. Kunden bestellen bei unterschiedlichen (online-)Händlern, welche entweder eigene Kurierdienste nutzen, wie beispielsweise Amazon, oder eben andere Anbieter am Markt (z. B. UPS, DHL, DPD, Hermes). Insbesondere in dicht bewohnten städtischen Räumen sind die Touren der einzelnen Dienstleister zwar nicht unbedingt identisch, aber viele Stopps werden mehrfach bedient, sei es taggleich oder in relativ kurzen Abständen innerhalb einer Woche. Das kann einerseits beim Besteller/Empfänger zu Frustration führen, wenn dieser nicht angetroffen wird und eine erneute Zustellung erfolgen muss oder eine Abholung bei einem Paket-Shop (z. B. Nachbar, Spät-Shops, Post-Station) erfolgen muss.

Der Paket Concierge bündelt diesen Verteilerverkehr an den Endkunden. Die Logistik-Dienstleister liefern die Bestellungen an den Concierge-Service. Er ist zur schnelleren Erreichbarkeit außerhalb des Ballungsraumes mit guter Schienen-/Straßenanbindung angesiedelt. Idealerweise ist er in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Verteilzentren der Logistiker verortet. Der Paket Concierge sammelt alle zeitlich unkritischen Sendungen eines Gebietes, sortiert diese und stellt diese beispielsweise einmal wöchentlich in einem individuell vereinbarten Zeitfenster zu (→ Abbildung 26). Zeitlich kritische Sendungen werden durch den Versender gesondert markiert und als Express-Zustellung direkt zum Empfänger gebracht. Der Paket Concierge geht damit über eine reine Gebietskonsolidierung zwischen zwei Dienstleistern hinaus, welche in Fallbeispielen bisher keine positiven verkehrlichen oder logistischen Effekte zeigte.¹⁵² Zum einen kann durch den Paket Concierge der innerstädtische Lieferverkehr minimiert werden, weil Sendungen, die nicht verderblich oder anderweitig dringlich sind, dem Kunden beispielsweise gebündelt einmal die Woche zugestellt werden.

Das Projekt ILoNa – Innovative Logistik für Nachhaltige Lebensstile, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, widmete sich auch der Frage der gebündelten Zustellung. Auf die Frage, wie viel zeitliche Verzögerung sie als Besteller in Kauf nehmen würden, wenn ihre Lieferung dafür gebündelt zu ihnen geschickt würde, antworteten nur knapp 10 % der Befragten, keine bzw. eine Verzögerung von nur einem Tag in Kauf nehmen zu wollen. Die große Mehrheit der Befragten hätte auch mit längeren Verzögerungen kein Problem.¹⁵³

150 <https://www.tagesspiegel.de/berlin/werbeflaechen-in-berlin-2500-berliner-litfassaeulen-werden-abgebaut/23924682.html> (Abruf am 05.10.2020)

151 <https://www.tagesspiegel.de/berlin/werbeflaechen-in-berlin-2500-berliner-litfassaeulen-werden-abgebaut/23924682.html> (Abruf am 05.10.2020)

152 <https://www.biek.de/download.html?getfile=2326> (Abruf am: 08.10.2020)

153 Bericht Key Points nachhaltiger Lebensstile für eine innovative Logistik, Ergebnisse des ILoNa-Arbeitspakets 2.2, Stand 2016



Abbildung 26: Visualisierung Paket Concierge

Durch den Paket-Concierge entfallen Kilometerleistungen für Einzelzustellungen und der CO₂-Fußabdruck der Gesamtlieferung wird geringer als die Summe des CO₂-Ausstoßes bei Einzellieferungen. Der Paket Concierge minimiert nicht nur den CO₂-Verbrauch, sondern auch die Kosten für die einzelne Lieferung. Weniger Stoppes pro heutiger Standard-Strecke sind notwendig, denn direkte, aber erfolglose Zustellversuche entfallen und insgesamt kann das steigende Sendungsvolumen mit einer gleichbleibenden oder sogar geringeren Anzahl von Mitarbeitern bearbeitet werden. Zum anderen werden Kunden für den Service einer „Sofort“-Zustellung einen „Aufschlag“ zu den üblichen Versandkosten zahlen. So führen die entsprechenden Aufwände bei den Logistikern direkt zu höheren Erlösen und beim Endverbraucher setzt (langfristig) ein Mentalitätswandel weg vom „Jetzt-Hier-Sofort“ hin zu „Später-Gebündelt-Einmal“ ein.

Der Paket-Concierge kann ggf. Zusatzleistungen wie Retouren und Rückabwicklungen übernehmen. Dies böte dem Endverbraucher einen weiteren Zusatznutzen. Darüber hinaus kann der Paket Concierge seine freiwerdenden Pack-Volumen während der Fahrt für andere Zustellungen oder das Einsammeln von zukünftigen Lieferungen nutzen. Dadurch wäre ebenfalls eine Erweiterung des Geschäftsmodells möglich.

9.5 Last Mile Market – die Börse für ungenutztes Liefervolumen im urbanen Raum

Ungenutztes Zustellvolumen in Kurier- und Paketfahrzeugen, wie es üblicherweise im Tagesverlauf entsteht und spätestens auf Rückfahrten zum Verteilzentrum sichtbar wird, sorgt für einen nicht wirtschaftlichen Energieverbrauch. Auch wenn die Fahrzeuge dank erneuerbarem Strom und Batterie-elektrischem Antrieb CO₂-neutral

fahren, sind es doch weiterhin unwirtschaftlich eingesetzte Ressourcen, die es im Sinne einer langfristigen und umfassenden Nachhaltigkeit zu vermeiden gilt. Gleiches gilt für den Individualverkehr im eigenen Fahrzeug. Auch hier wird viel leerer Raum auf regelrechten Routen bewegt.

Hier setzt der Last Mile Market an: eine Börse für ungenutztes Liefervolumen im urbanen Raum. Ähnlich der bereits etablierten Frachtbörse für großvolumigen Güterverkehr innerhalb Europas Timocom etablieren sich in Ballungsräumen und Großstädten vergleichbare Angebote. Der Last Mile Market bringt dabei Anbieter und Nachfrager von üblicherweise innerstädtischen

Transporten zusammen (→ Abbildung 27). Freie Kapazitäten werden an eine Logistik-Börse gemeldet, ebenso wie entsprechende Nachfrage.

Auf dieser Plattform bilden sich gemäß den Marktgesetzen zwischen Angebot und Nachfrage die Preise vergleichbar einer Börse. Aufgrund einer weiteren De-Regulierung und Flexibilisierung des Post- und Paketmarktes werden die angebotenen Kapazitäten sowohl von großen gewerblichen Anbietern als auch von Solo-Selbstständigen in Vollzeit und Neben-Jobbern erbracht¹⁵⁴. Jeder Marktteilnehmer kann seine Leerkapazitäten, Standard-Strecken und finanziellen sowie



Abbildung 27: Visualisierung Last Mile Market

154 https://logistik-heute.de/sites/default/files/public/data-fachartikel/crowd_logistik_logistik_heute_summary_final_v2_pdf_11563.pdf (Abruf am 13.11.2020)

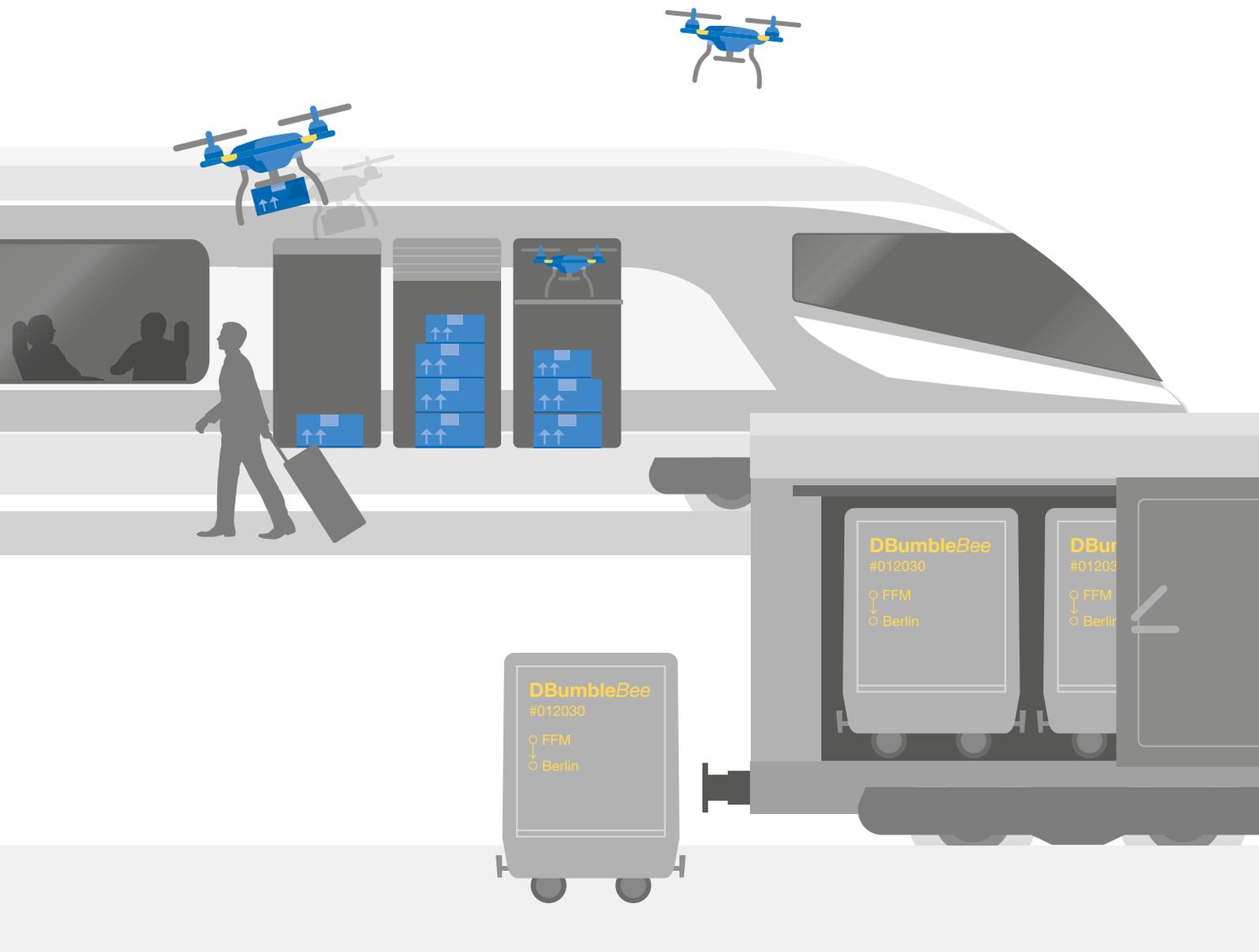


Abbildung 28: Visualisierung DBee-Logistik

zeitlichen Rahmenbedingungen an das System melden. Das Börsensystem verhandelt automatisiert über digitale Agenten die Preise in Abhängigkeit von Angebot und Nachfrage. Dem automatisiert verhandelten Preis stimmen beide Parteien explizit zu und dadurch kommt ein bindender „Frachtvertrag“ zwischen den Parteien zustande.¹⁵⁵

Der Last Mile Market öffnet vormals ungenutzte Transportkapazitäten. So können Leerfahrten vermieden werden und insgesamt sollte der reine lieferinduzierte Verkehr abnehmen, weil sich dieser mit anderen Transportleistungen kombinieren lässt.

9.6 DBee-Logistik – die multimodale Schienen-Logistik der Zukunft

Die multimodale Logistik ist das flexible Rückgrat der KEP-Branchen im Jahr 2030. Die Kombination verschiedener Verkehrsträger und Fahrzeuge ermöglicht einen noch effizienteren Transport und eine optimierte Zustellung. Für lange Strecken wird auf das Schienennetz zurückgegriffen. Ein Güterzug ersetzt 52 Lkw und kann dabei je nach Einsatzszenario ca. 1 Mio. Lkw-Fahrten pro Woche ersetzen¹⁵⁶. Ende 2020 kündigte DB Cargo die Über-Nacht-Zustellung mittels Express-

¹⁵⁵ Unter der Grundannahme eines im Großen und Ganzen gleichbleibenden Kapazitätsangebotes in Zeiten erhöhter Nachfrage wird es zu höheren Preisen aufgrund von Knappheit kommen, während in Zeiten geringer Nachfrage die Preise sinken werden. Die Annahme eines stabilen Kapazitätsangebotes beruht auf den aktuellen Restriktionen des Postgesetzes, welches den rechtlichen Rahmen für die Erbringung von entsprechenden Dienstleistungen beschreibt.

¹⁵⁶ Sigrid Nikutta, Vorstand DB Cargo, Vortrag auf dem Deutschen Logistik Kongress 2020, 21.10.2020

zug-Netzwerk an, welches auch Kunden ohne direkten Gleisanschluss an die 140 Rangier- und Knotenbahnhöfe als Verknüpfungspunkte anbinden soll¹⁵⁷. Die weihnachtliche Paketzustellung von DHL wird auch 2020 ab Oktober mit bis zu 29 Zügen an den Wochenende durch DB Cargo unterstützt¹⁵⁸.

Um dieses Potenzial weiter auszubauen verfügen in Zukunft auch Personenzüge über besondere Abteilbereiche und auch komplette Waggons für Stückgüter. Ähnlich einem Bienenstock befüllen und leeren sich diese selbst an den Umschlagbahnhöfen. Dazu werden Drohnen und kleine autonome Fahrzeuge genutzt. Beim Händler befüllt, legen sie die erste Meile zum Zug autonom zurück. Selbständig suchen sie ihren automatisiert zugewiesenen Platz im Waggon auf und werden dort über das Boardnetz während des Transports geladen. Am Zielort schließlich schwärmen sie wiederum autonom auf die letzte Meile aus, um die Lieferung final zuzustellen (→ Abbildung 28). Die Endkunden können über diesen ic:kurier 2.0¹⁵⁹ beispielsweise Express-Artikel aus allen deutschen Städten bestellen und sich, auch dank des engen Deutschlandtaktes, auf die taggleiche Zustellung verlassen. Diese kleinen, individuellen Zustelleinheiten werden von den Bahn-Mitarbeitern im kollegialen Jargon als DBees bezeichnet.

Darüber hinaus hat die Deutsche Bahn, mit ihrer Sparte DB Cargo, im Jahr 2030 den überörtlichen Postverkehr annähernd vollständig zurück auf die Schiene geholt. Die Bahnpost 2.0 befördert über Nacht alle regulären Post- und Paketsendungen, welche überörtlich innerhalb Deutschlands anfallen. Die Vor-Sortierung erfolgt dabei in der Ursprungstadt und vollautomatisch im Zielort-Container. Diese beladen sich selbstständig in die entsprechenden Post-Kurs-Waggons. Ganz nach Bedarf können diese als Einzelwaggons, über die digitale Kupplung, an andere Aufträge bzw. Züge angekoppelt werden. Für alle Orte, die nicht mit einer Direktverbindung angefahren werden können, bietet sich durch den nachts engen Güterzug-Takt von DB Cargo der automatisierte Container-Umstieg an Knotenpunkten im Schienennetz an. Am frühen Morgen treffen die DBumbleBees (englisch für Hummeln, aufgrund der größeren Einheiten) genannten Container am Zielort ein und legen den Weg zum örtlichen Nahverteilzentrum autonom zurück. Dort werden die vorsortierten Sendungen überorts und innerorts miteinander „verheiratet“. Damit ist jeweils nur eine Zustellung pro Adressat und Tag notwendig. Durch das klimapolitische Verbot von Nachtluftpost und die stark gestiegene Zuverlässigkeit

der DB Cargo Sparte ist die Deutsche Post annähernd vollständig zu ihrem ursprünglich sehr engen Logistikpartner zurückgekehrt. Auch, weil die Zustellung über die Schiene eine vollständig grün elektrifizierte Lieferkette darstellt, wie die Endkunden sich dies im Jahr 2030 wünschen.

9.7 Ansatzpunkte für nachhaltige Logistik

Wie in den – teilweise konkurrierenden – Logistik-Szenarien 2030 beschrieben, sind die übergeordneten Ziele einer nachhaltigen Transportlogistik ein geringerer Energie- bzw. Ressourcenverbrauch und geringere CO₂-Emissionen pro Transport.

Um diese Ziele zu erreichen bieten sich fünf aufeinander aufbauende Schritte zur Beeinflussung des Verkehrs an^{160, 161}:

1. Steigerung der Transportauslastung durch Reduzierung der Leerkilometer
2. Reduzierung des Transportaufkommens, der Anzahl der Fahrten
3. Reduzierung der durchschnittlich zurückgelegten Transportwege
4. Verlagerung auf umweltfreundliche Verkehrsträger
5. Umweltverträgliche Abwicklung des Transports

Als Ultima Ratio bleibt schließlich der Ausgleich der verbliebenen Belastungen über ein Programm zur „Neutralisierung“.

Die Betrachtung der Nachhaltigkeit von Logistik- und Mobilitätsangeboten kann bis zu Klimabilanzen einzelner Touren erfolgen. Zukünftig auch denkbar wäre der Ausweis der Klimabilanz bis hin zur einzelnen Sendung bzw. der einzelnen Fahrt. Für derartige Nachweise sind bilanzierende Betrachtungen der Antriebsenergie notwendig. Ein Ansatz ist die Well-to-Tank Betrachtung („vom Bohrloch bis zum Tank“), hier werden insbesondere bei Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen die teilweise sehr komplexe energetische Vorkette bis zur Bereitstellung an der Tankstelle betrachtet. Der Ansatz Well-to-Wheel untersucht die gesamte Wirkungskette für die Fortbewegung. Hier wird die Gewinnung und Bereitstellung der Antriebsenergie bis zur Umwandlung in kinetische Energie untersucht. Am umfassendsten, aber auch am komplexesten sind Untersuchungen über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes

157 <https://www.md.de/wirtschaft/expresszug-netzwerk-der-deutschen-bahn-so-will-db-cargo-chefin-neue-kunden-gewinnen-SMZRSXHPBFYPO6UJWWC4U5HJl.html> (Abruf am 11.12.2020)

158 https://www.linkedin.com/posts/db-cargo-ag_dbcargofaeuhr-logistik-transport-activity-6743204155990515712-kMMX (Abruf am 11.12.2020)

159 https://www.bahn.de/p/view/angebot/zusatzticket/ic_kurier.shtml (Abruf am 02.11.2020)

160 Ulrich Müller-Steinfahrt, Leiter des Instituts für angewandte Logistik (IAL), Hochschule für Angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Vortrag auf dem Deutschen Logistik Kongress 2020, 23.10.2020

161 Christoph Bornschein, CEO TLGG Group, Vortrag auf dem Deutschen Logistik Kongress 2020, 21.10.2020

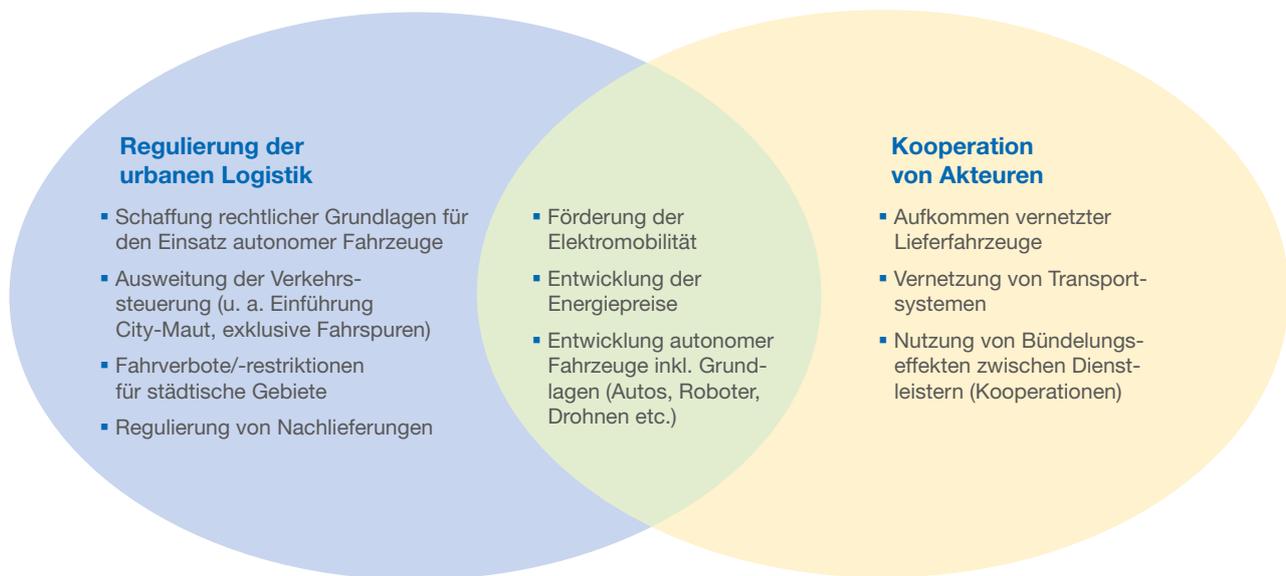


Abbildung 29: Dimensionen für Logistikszenerien 2030 (in Anlehnung an Roland Berger) ¹⁶²

(Cradle-to-Grave, von der Wiege bis zur Bahre). Im Bereich der Mobilität und Logistik müssten diese wiederum auf einzelne Touren oder Sendungen heruntergerechnet werden. Das erscheint aktuell nicht realistisch, wäre aber eine vielschichtige Herausforderung für zukünftige Forschungsvorhaben. Im Idealfall ließe sich darüber ein einfach nachvollziehbares Nachhaltigkeitssiegel bzw. eine Nachhaltigkeitsklasse (analog zur Energieeffizienzklasse) auch für Endverbraucher und Kunden gestalten.

Um nachhaltige, möglichst CO₂-neutrale Mobilität und Logistik mit Blick auf 2030 und 2050 zu erreichen muss einerseits regulierend von staatlicher Seite eingegriffen werden und andererseits sollten sich die Marktteilnehmer bereits heute auf freiwillige Kooperationen einstellen (→ Abbildung 29)¹⁶³. Mit dem Förderprogramm IKT für Elektromobilität kann auf die Erreichung nachhaltiger Mobilität und Logistik hingearbeitet werden, denn hier werden konkrete Kooperationen von Wirtschaftsakteuren und innovative Vorhaben unterstützt.

162 <https://www.rolandberger.com/de/Publications/Wie-wird-urbane-Logistik-2030-aussehen.html> (Abruf am 03.11.2020)

163 <https://www.rolandberger.com/de/Publications/Wie-wird-urbane-Logistik-2030-aussehen.html> (Abruf am 03.11.2020)

10. Aktuelle Trends

Die bereits vorgestellten Aspekte werden zumindest teilweise durch die Corona-Pandemie beeinflusst. Inwieweit dieser Einfluss mittel- und langfristig anhält, lässt sich noch nicht einschätzen. Als weiteres Regulativ sind staatliche Maßnahmen zur Förderung des CO₂-neutralen Verkehrs zu nennen. Diese können einerseits direkt zur Förderung der Elektromobilität oder andererseits indirekt im Sinne restriktiver Verbote umweltschädlicher Technologien wirken.

10.1 Implikationen und Herausforderungen durch Corona

Das Apian-Projekt des britischen Gesundheitswesens (NHS) stellt als Start-up innerhalb kürzester Zeit einen Drohnenservice zwischen einzelnen Kliniken sicher, um Laborproben, aber auch Schutzausrüstung über jeweils bis zu 100 km auszutauschen.¹⁶⁴ Damit ist es in seiner Anwendung sehr nah am Szenario des Fly-bots (→ Kapitel 9.2).

Andere Annahmen, wie der Energieverbrauch, sowohl insgesamt als auch Ladestrom-spezifisch, werden gegenüber den bisherigen Prognosen nur kurzzeitig zurückfallen. So erwartet die internationale Energie Agentur (IEA) einen weltweiten Rückgang des Energiebedarfs um 5 % absolut, wobei insbesondere fossile Energieträger betroffen sind, während regenerative Energien sogar ein leichtes Wachstum verzeichnen könnten. Besonders eindrücklich ist allerdings der Investitionsrückgang um 18 % auf dem Energiesektor.¹⁶⁵

Der Mobilitätsbedarf hat sich durch COVID-19 zumindest kurzfristig gewandelt. So ist er während des ersten Lockdowns im Frühjahr 2020 auf allen Verkehrsmitteln eingebrochen, weil kaum mehr die Notwendigkeit zum berufs- und freizeitinduziertem Verkehr bestand¹⁶⁶. Die normalerweise rund 40 Kilometer pro Person und Tag gingen in der letzten Märzwoche auf rund 15 Kilometer zurück, ein Rückgang um fast zwei Drittel. Durchgeführt wurden die verbliebenen Verkehre zunehmend mit dem Fahrrad, während die ÖPNV-Nutzung schrumpfte. Die vermutete Ansteckungsgefahr ließ die Fahrgastzahlen einbrechen. Sie bewegen sich lediglich auf einem

Niveau zwischen 20 und 30 % gegenüber dem gleichen Zeitraum des Jahres 2019. Eine geringfügige Steigerung ist bei den zu Fuß zurückgelegten Wegen und bei der Nutzung des Pkw zu verzeichnen.¹⁶⁷ Ausgehend von einer mittelfristigen Normalisierung der Nachfrage ist zukünftig auch wieder mit steigenden Nutzungszahlen für den ÖPNV zu rechnen. Um dies zu erreichen, unterstützen Bund, Länder und die Nahverkehrsunternehmen, Verkehrsverbünde sowie zahlreiche Verbände und weitere Partner aus der gesamten Mobilitätsbranche den Wiedereinstieg in Busse und Bahnen mit einer bundesweiten Kampagne¹⁶⁸.

Der Lieferverkehr hat durch den Corona-bedingten Lockdown in der ersten Jahreshälfte insbesondere im Bereich der Waren des täglichen Bedarfs (Lebensmittel, Drogerieartikel, Tierbedarf) zugenommen. So war das Wachstum großer Kategorien wie Bekleidung und Unterhaltung eher unterdurchschnittlich und das bisher „schwache Segment“ konnte aufholen¹⁶⁹. Der Bundesverband E-Commerce und Versandhandel sieht naturgemäß keine Begrenzungen für den online-Handel: „Wir glauben, dass es im E-Commerce keine Grenzen für die Warenarten und Warenkörbe gibt.“¹⁷⁰ Aktuell ist nicht absehbar, inwieweit sich diese signifikante Veränderung des Kaufverhaltens auch verstetigen wird oder mit einer Rückkehr zur Normalität auch der Online-Handel wieder in eher gewohnten Bahnen und bei den bisherigen Branchen punkten wird.

Die Einschränkungen aufgrund der Corona-Pandemie führten 2020 zu einem Rückgang der CO₂-Emissionen um 7 %. Zur Umsetzung des Pariser Klimaabkommens wären allerdings jährliche Reduzierungen von 7,6 % notwendig.¹⁷¹

164 <https://www.gov.uk/government/news/space-company-takes-to-the-skies-alongside-the-nhs> (Abruf am 21.10.2020)

165 <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020#executive-summary> (Abruf am 02.11.2020)

166 https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/11/PD20_441_p001.html (Abruf am 13.11.2020)

167 https://www.infas.de/fileadmin/user_upload/PDF/Tracking-Report_No1_infas-Motiontag_09042020.pdf (Abruf am 03.11.2020)

168 <https://www.besserweiter.de/>

169 <https://www.dvz.de/rubriken/logistik/detail/news/bevh-praesident-im-e-commerce-gibt-es-keine-grenzen-fuer-warenarten.html> (Abruf am 03.11.2020)

170 Gero Furchheim, BEVH-Präsident und Vorstandssprecher der Cairo AG, Vortrag auf dem Deutschen Logistik Kongress 2020, 21.10.2020

171 <https://www.spiegel.de/wissenschaft/medizin/corona-krise-bringt-rekord-rueckgang-der-co2-emissionen-a-81f70390-624d-4717-ba35-f3bc130ad8df> (Abruf am 11.12.2020)

Es bedarf also weiterer Anstrengungen, sowohl seitens der Politik (über ambitionierte Zielvorgaben und finanzielle Unterstützung mittels Forschungsprogrammen) als auch seitens der Wirtschaft (durch innovative Geschäftsideen und Technologien), um die Klimaziele für 2030 und die Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Nach Aussage von Bundeskanzlerin Angela Merkel Anfang November 2020 sind die Klimaziele dabei nicht Wachstumshindernis, sondern -treiber und bieten neue Marktchancen, u. a. beim Einsatz erneuerbarer Energien und Technologien zur Effizienzsteigerung¹⁷².

10.2 Förderung des CO₂-neutralen Verkehrs

Gemäß Vorgabe der EU-Kommission zur Senkung der CO₂-Grenzwerte sollen bis zum Jahr 2025 Neuwagen im Schnitt 15 % weniger Kohlendioxid ausstoßen, bis 2030 dann 30 % weniger. Zudem sollen bis 2030 möglichst 30 % der Neuwagen mit Elektro- oder einem anderen alternativen Antrieb zugelassen werden.¹⁷³ Elektromobile Fahrzeuge können einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Reduzierungsziele des Verkehrssektors erbringen (→ Abbildung 30).

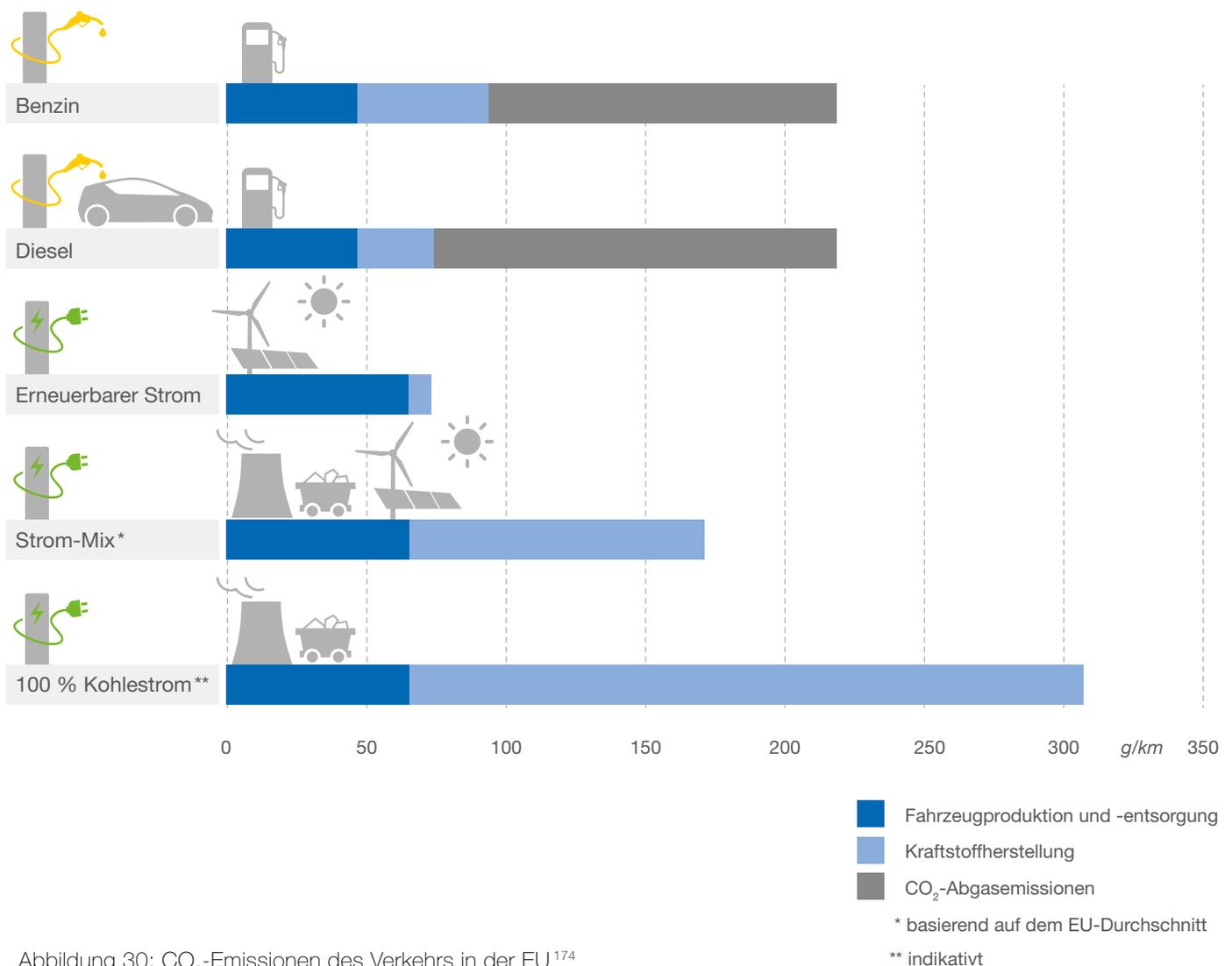


Abbildung 30: CO₂-Emissionen des Verkehrs in der EU¹⁷⁴

172 <https://www.boerse-online.de/nachrichten/aktien/merkel-nennt-den-klimaschutz-einen-wachstumstreiber-1029771387> (Abruf am 13.11.2020)

173 <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/co2-grenzwerte-eu-kommission-will-co2-ausstoss-bis-2030-um-30-prozent-senken-a-1177001.html> (Abruf am 20.10.2020)

174 <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/priorities/klimawandel/20190313STO31218/co2-emissionen-von-autos-zahlen-und-fakten-infografik> (Abruf am 20.10.2020)

Beschränkungen durch Mautzahlungen gibt es in ganz Europa bereits in vielfältiger Ausgestaltung. Meist sind sie verbunden mit den Kosten für Straßenunterhalt oder einer intendierten Begrenzung eines hohen touristischen Aufkommens. Ähnlich verhält es sich mit der Verkehrsvermeidung durch zeitliche oder lokale Beschränkungen für bestimmte Fahrzeuge. Diese mittelbaren Beschränkungen zielen nicht direkt auf die Elektromobilität ab. Aber durch Ausnahmeregelungen für Batterie-elektrische Fahrzeuge können diese Regelungen ebenfalls zum Kauf und damit der Nutzung von Elektrofahrzeugen anregen.

Die direkte Förderung von Batterie-elektrischen Fahrzeugen, wie sie durch die Bundesregierung zuletzt im Sommer 2020 aktualisiert wurde, bilden ebenfalls Anreize zu elektromobilem Verkehr. Die Erhöhung der E-Auto-Prämie auf maximal 9.000 € bis Ende 2021 trat am 7. Juli 2020 in Kraft und gilt rückwirkend für Autokäufe seit dem 3. Juni 2020. Zusätzlich profitieren Käufer dieser Fahrzeuge, wie alle anderen auch, von der bis Ende 2020 begrenzten Senkung der Mehrwertsteuer von 19% auf 16%. Staatliche Förderprogramme für Elektromobilität, teilweise auch die dazu notwendige Infrastruktur, gibt es mehr als hundert: je nach Region, Förderobjekt und Antragsteller (also Privat- oder Geschäftskunden) unterscheiden sich die Fördermöglichkeiten und Förderhöhen.

Nach 4-jähriger Anlaufzeit sind die Zulassungszahlen von E-Fahrzeugen seit der Erhöhung des Zuschusses durch die Innovationsprämie im Sommer 2020 spürbar gestiegen. Bis Ende September 2020 gingen beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle seit der Einführung des Umweltbonus im Juli 2016 genau 284.482 Förderanträge ein, im September 2020 allein 27.436. Auf reine E-Autos entfielen 176.298 Anträge, 108.015 auf Plug-in-Hybride und 169 auf Wasserstoff-Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle.¹⁷⁵

Das entspricht gegenüber dem Vorjahresmonat (mit geringerer Förderung; 1.951 PEHV, 0 FCEV, 4280 BEV) einem Antragszuwachs von rund 340 %¹⁷⁶. Ob die aktuell sichtbaren Zuwächse im Bereich der strombasierten Fahrzeuge ausreichen, um das Ziel von 10 Mio. E-Fahrzeugen in 2030 zu erreichen, ist noch nicht abzusehen.

Durch die im November 2020 beschlossene Ausweitung der Innovationsprämie bis 2025 könnte der Trend hin zur Elektromobilität weiter verstetigt werden.

Ein ergänzender Beitrag zur direkten monetären Förderung von Elektrofahrzeugen ist der Wegfalls des erst im Sommer 2020 eingeführten Kumulationsverbotes ab 16.11.2020. Dadurch können, unter bestimmten Voraussetzungen, verschiedene Förderprogramme miteinander kombiniert werden. Das führt zu einer höheren Gesamtförderung und kann in den Augen der Nutzer einen weiteren Attraktivitätsgewinn der Elektromobilität darstellen.¹⁷⁷

Die Bundesregierung fördert ebenfalls den Einsatz und die Erforschung alternativer Kraftstoffe auch direkt finanziell (→ Kapitel 3.3). Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert Forschung und Entwicklung zu strombasierten Kraftstoffen. So werden beispielsweise in der Förderinitiative „Nachhaltige Mobilität dank synthetischer Kraftstoffe“ (NAMOSYN) Herstellungsverfahren und Nutzung insbesondere von Oxymethylenether (OME) erprobt und optimiert. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie fördert im Energieforschungsprogramm mit der Forschungsinitiative „Energiewende im Verkehr“ 16 Forschungsverbände mit über 100 beteiligten Forschungsgruppen und Industriepartnern. Im Fokus steht bei allen Projekten die Herstellung bzw. Nutzung innovativer, strombasierter Kraftstoffe wie beispielsweise Methanol, Ethanol, Oxymethylenether-Kraftstoff (OME), Kerosin, synthetisch hergestelltes Erdgas und Biogas mit Wasserstoffanteilen. Einige dieser alternativen Kraftstoffe können direkt dem Kraftstoff in heutigen Autos, Lkw, Flugzeugen oder Schiffen beigemischt werden. Andere erfordern eine Anpassung der Motorentechnologie.¹⁷⁸

Im Rahmen der Internationalen Klimaschutzinitiative (IKI) fördert das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit in Brasilien sowie in Marokko, Südafrika, Argentinien/Chile unter anderem Machbarkeitsstudien und den Bau sowie Betrieb von PtX-Anlagen zur Erprobung der nachhaltigen und großtechnischen Produktion und Nutzung von PtX. Für Entwicklung und Förderung von Anlagen zur Erzeugung strombasierter Kraftstoffe stehen in den Jahren 2020 bis 2023 bis zu 1,3 Mrd. Euro aus dem Energie- und Klimafond zur Verfügung, u. a. explizit für den Luftverkehr. Zu erarbeitende Förderprogramme adressieren als Schwerpunkt den Markthochlauf, aber auch Forschung und Entwicklung. Durch ein steigendes internationales Interesse ergeben sich für Deutschland auch industriepolitische Interessen (Technologieführerschaft), die im Rahmen von internationalen Energiepartnerschaften adressiert werden.¹⁷⁹

175 <https://www.autobild.de/artikel/e-autos-infos-zur-innovationspraemie-kaufpraemie-umweltbonus-foerderung-8535657.html> (Abruf am 27.10.2020)

176 <https://www.electrive.net/2020/11/02/318-694-umweltbonus-antraege-bis-ende-oktober/> (Abruf am 01.12.2020)

177 <https://www.electrive.net/2020/11/04/umweltbonus-brmwi-hebt-kumulationsverbot-zum-16-november-auf/> (Abruf am 01.12.2020)

178 https://www.energiesystem-forschung.de/foerdern/energiewende_im_verkehr (Abruf am 09.11.2020)

179 <http://dipbt.bundestag.de/doc/btd/19/186/1918648.pdf> (Abruf am 15.09.2020)

11. Herausforderungen für das Technologieprogramm IKT für Elektromobilität bis 2030

Aus den vorgestellten Aspekten und möglichen Entwicklungsrichtungen des Verkehrssektors und der erbrachten Logistik- sowie Mobilitätsleistungen lassen sich für Technologieprogramm IKT für Elektromobilität einige mögliche Schwerpunkte für zukünftige Projekte ableiten und Anhaltspunkte für weitere grundlegende Aktivitäten, auch über das IKT-Programm hinaus, bestimmen.

Fahrzeugkommunikation und Daten

Die Kommunikation der Fahrzeuge mit ihrer Umgebung und die Nutzung der generierten Daten kann ein Schwerpunkt der zukünftigen Ausrichtung sein. Die rund um ein Fahrzeug entstehenden Daten, ihre Nutzung und der Umgang mit ihnen ist Schwerpunkt im Projekt „Datenraum Mobilität“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. Das von acatech durchgeführte Projekt will bis zum ITS World Congress

Mitte 2021 in Hamburg erste Anwendungen implementieren. Hier sollte eine möglichst enge Verzahnung mit anderen zukünftigen Projekten erfolgen, um größtmöglichen Nutzen aus den bisherigen Erfahrungen und aufgewendeten Geldern zu ziehen.¹⁸⁰

Folgende Kommunikationswege sind mittels Informations- und Kommunikationstechnologien im Bereich der Elektromobilität rund um Fahrzeuge denkbar (→ Abbildung 31):

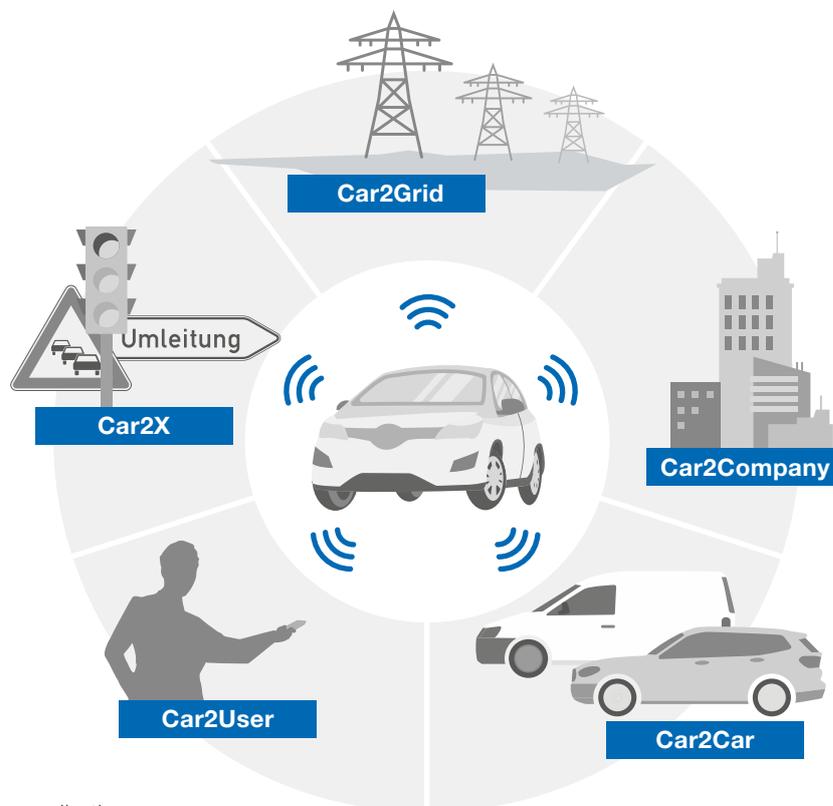


Abbildung 31: Car2...-Kommunikation

180 <https://www.acatech.de/projekt/datenraum-mobilitaet/> (Abruf am 02.12.2020)

- **Car2Car** – Platooning, z. B. höhere Auslastung der vorhandenen Infrastruktur, Optimieren des Verkehrsflusses
- **Car2X** – Ampeln, Verkehrsschilder, z. B. Optimieren und Steuern des Verkehrsflusses
- **Car2User** – Mobilitätsbedarfe melden, z. B. Abholen und Bringen, Fahrservices abstimmen / abrufen / bezahlen
- **Car2Grid** – z. B. Optimieren des Ladens, netzverträglich und optimal abgestimmt auf Nutzerverhalten
- **Car2Company** – Fahrzeug funkt in das Unternehmen, beispielsweise für Re-Routings (beinhaltet auch Informationen aus Car2Grid/User-Kommunikation)

Die Fahrzeuge der Zukunft werden eine wahre Flut an Daten produzieren. Für die Fahrzeugkommunikation und die damit verbundenen Daten muss dabei gelten: so viel wie möglich – so wenig wie nötig. Hier gilt es einerseits die relevanten Daten beispielsweise für die Energiebereitstellung zu nutzen und andererseits achtsam mit den Daten umzugehen, so dass der Verbraucher keinen Schaden nehmen kann, aber gleichzeitig größtmöglicher Nutzen für den Einzelnen und im Idealfall für das wirtschaftliche und energetische Gesamtsystem erzielt wird. Insgesamt werden durch die Digitalisierung mehr Daten u. a. des Fahrzeuges, der Sendung, des Passagiers generiert. Diese Daten miteinander abzustimmen und eine energetisch, wirtschaftlich oder zeitlich optimierte Dienstleistung zu erbringen wird eine große Herausforderung der Zukunft.

Fahrzeugauslastung

Die Steigerung der Fahrzeugauslastung kann dazu beitragen, die stetig steigende Menge an Gütern mit der gleichen Anzahl an Fahrzeugen zu transportieren, um so dem Verkehrskollaps in den (Innen-)Städten entgegen zu wirken.

Fahrzeug (und Fahrer) werden als Container verstanden, der von unterschiedlichen Organisationen beladen werden kann. So ist über einen Zeitraum von 24 Stunden an sieben Wochentagen eine möglichst hohe Auslastung des Fahrzeuges zu erreichen. Dafür wären beispielsweise Konzepte einer Fahrzeugflotte in städtischer, öffentlicher Hand denkbar. Die Durchführung der letzten Meile wird vom bisherigen Transportdienstleister an diese Fahrzeuge ausgelagert. Hierfür wären Umschlagflächen im „Speckgürtel“ des urbanen Raums notwendig, um die Güter aus dem Fernverkehr auf die Fahrzeuge der letzten Meile umzuschlagen (→ Kapitel 9.4).

Ergänzend benötigt man für dieses Konzept auch innerstädtische Kommissionierzentren für Lieferungen innerhalb des Stadtgebietes. Ein zweiter Anwendungsfall für die Steigerung der Fahrzeugauslastung im Logistikbereich ist die zeitlich parallele oder nachgelagerte Mehrfachnutzung eines Fahrzeuges für verschiedene Gütergruppen als Hybrid-, Multi-Use- oder Verbundzustellung. So kann morgens die kombinierte Zustellung von Zeitungen und Postsendungen erfolgen. Mittags und abends erfolgt die Nutzung für Essenslieferungen. Und in den Nachmittags- und Abendstunden werden Paketsendungen und verderbliche Waren wie Blumen und Lebensmittel zugestellt.

Auch die Fahrzeugauslastung von Personenfahrzeugen sollte weiter optimiert werden. So ist es in aktuellen Shuttle-Konzepten wie dem BerlKönig immer öfter möglich, Fahrten mehrerer voneinander unabhängiger Fahrgäste zu kombinieren. Dennoch werden Shuttle-Fahrzeuge eher als Konkurrenz zu regulären Taxi-Angeboten wahrgenommen und genutzt. Deshalb werden sie sowohl von etablierten Mobilitätsdienstleistern als auch von der Politik kritisch betrachtet¹⁸¹. Um sie langfristig zu etablieren sind kluge Konzepte notwendig, beispielsweise als Zubringer- oder Verteilverkehre, bei denen möglichst viele Einzelfahrten kombiniert werden, um die Auslastung der Fahrzeuge zu steigern. Sie müssen einen klaren Mehrwert für die Nutzer bieten, beispielsweise indem sie Randgebiete des urbanen Raumes ohne Linienverkehre erschließen.

Entwicklung von Ladetechnologien

Automatisierte konduktive Ladelösungen werden ein sehr eingeschränktes Nutzenspektrum aufweisen. Die notwendigen Aufwendungen müssen als Premiumprodukt einen entsprechenden Nutzerkreis finden. Dies könnten beispielsweise kombinierte Lade- und Parklösungen sein, in denen das Fahrzeug automatisiert, ähnlich einem Hochregallager, geparkt wird und dort dann auch automatisiert die Zuleitung des Ladestromes erfolgt. Hier könnte durch die besondere Form der „Fahrzeug-Lagerung“ gleichzeitig Mehrwert gestiftet werden, indem urbaner Raum dafür enger als bisher üblich genutzt wird. So können die wertvollen Innenstadtfächen für eine alternative Nutzung zur Verfügung stehen.

Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes

Eine Reform des EEG über den aktuellen Kabinettsentwurf hinaus ist notwendig, um die Potenziale der existierenden Solaranlagen auszuschöpfen und die wie von Hamburg avisierte Pflicht zu Solaranlagen auf

181 <https://www.berliner-zeitung.de/mensch-metropole/dem-berlkoenig-der-bvg-droht-schon-bald-das-aus-ii.75611> (Abruf am 13.11.2020)

Neubaudächern¹⁸² zu unterstützen. Die notwendigen Reformen sollten deshalb die folgenden, naheliegenden Themen abdecken:

- Private Solarstromer (auch Wind- und Wasserstromer) können ihren selbstproduzierten, ökologischen Strom günstig (also deutlich unter den aktuellen Marktpreisen) an die Nachbarn abgeben. Dafür sollte dieser Strom vollständig von der EEG-Umlage befreit werden.
- Wohnungsbaugesellschaften, Wohnungsbaugenossenschaften und Vermieter dürfen den auf eigenen Wohnobjekten und zugehörigen Gebäuden sowie sonstigen Flächen erzeugten Ökostrom künftig ohne EEG-Umlage günstig an ihre Mitglieder und Mieter weitergeben, so dass deren Strompreis entsprechend niedriger ausfällt.

Auch wenn das Technologieprogramm IKT für Elektromobilität keinen Einfluss auf die entsprechenden Gesetzgebungsverfahren nimmt, besteht hier zumindest die Chance der inhaltlichen Begleitung und prototypischen Entwicklung. Die inhaltliche Begleitung war bis einschließlich 2020 insbesondere im Bereich Rechtsrahmen mit Workshops und Empfehlungen u. a. zum Mess- und Eichrecht als erfolgreiches Instrument etabliert. Die prototypischen Entwicklungen von Lösungen, wie sie in den geförderten Projekten des Technologieprogramms bisher erfolgten, können als Beispiele, Impulse und Ansätze für zukünftige Novellierungen der gesetzlichen Grundlagen dienen.

Bedarfsgerechte Entwicklung

Immer im Mittelpunkt der Betrachtungen sollten dabei die Bedarfe der unterschiedlichen Beteiligten stehen. Das Netz der Akteure und Themen ist eng miteinander verknüpft, so dass ein Mobilitätsbedarf unabdingbar mit dem dazu notwendigen Strombedarf verbunden ist. Hier sind frühzeitige Untersuchungen notwendig, um beispielsweise den Anteil direkter Stromnutzung in elektromobilen Fahrzeugen und den Anteil der Stromnutzung (beispielsweise über Wasserstoff) in Brennstoffzellenfahrzeugen zu bestimmen. Denn darüber kann wiederum der Bedarf für inländische, regenerative Energien, aber auch der Bedarf sowie die Kosten für entsprechende Energieimporte¹⁸³ und schließlich auch die Auswirkungen auf die Stromnetze abgeleitet werden. Langfristig gilt es hier auch, die Prognosen bzgl. der Energieproduktion noch detaillierter zu nutzen. Die zugrundeliegenden Wettermodelle werden kontinuierlich optimiert. Die Integration von aktuellen Wetterdaten

und hochaufgelösten Prognosemodelle kann einen Beitrag zur optimalen, weil planbareren direkten Nutzung von erneuerbaren Energien liefern. Besonders die Rückschlüsse auf die Bereitstellung der verschiedenen Energieträger und die Produktion des für Mobilität und Logistik notwendigen Stroms sind nicht mit einem zeitlichen Horizont von zehn Jahren zu betrachten. Hier gilt es vielmehr die weitaus langfristige Perspektive 2050 im Blick zu behalten, denn entsprechende Forschungsvorhaben und daraus resultierende Investments lassen sich aufgrund ihrer Komplexität nicht kurzfristig realisieren.

Erfolgskontrolle

Für die Wahl der ökonomisch, ökologisch und sozial sinnvollsten Lösungen ist eine frühe Erprobung in Innovationsprojekten mit entsprechend realitätsnahen „Pilot-Anwendungen“, wie sie im Rahmen des IKT-Programms erfolgen, sinnvoll. Hier ist aber auch das langfristige Monitoring der durchgeführten Projekte notwendig. Nur über eine spätere Erfolgskontrolle kann, mit hinreichendem Abstand und unter Betrachtung der eingetretenen Realbedingungen, erkannt werden, inwieweit das Projekt am Markt zu einer wirklichen Innovation gereift ist.

182 <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/erneuerbare-energien-was-eine-solarpflicht-fuer-neubauten-bringt-und-was-daran-kritisiert-wird/26252848.html?ticket=ST-1240803-KUN2t0ILzurcBvDKdvzs-ap4> (Abruf am 02.11.2020)

183 Christian Breyer, LUT University und Global Alliance Powerfuels, Vortrag auf der Hydrology Online Conference (08.10.2020)

12. Ausblick und Fazit

Mitte Oktober 2020 haben die Abgeordneten des Europaparlamentes die bisherigen Forderungen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen nochmals verschärft und streben nun, mit knappem Mehrheitsbeschluss, eine Reduzierung um 60% bis 2030 an.¹⁸⁴ Das bisherige Ziel lag bei 40% und wurde bereits von der Kommission auf 55% verschärft, jeweils zum Vergleichsjahr 1990. Während Wirtschaftsvertreter die immer ambitionierteren Klimaziele der Legislative sowohl auf regionaler als auch auf nationaler und internationaler Ebene als wirtschaftsfeindlich beschreiben, begrüßen unabhängige Nicht-Regierungs-Organisationen diese Schritte.

Dass ein „Weiter-so“ im Hinblick auf die Emission von Treibhausgasen möglich ist, steht gesamtgesellschaftlich nicht zur Debatte, wohl aber das wann und wieviel. Doch je länger der Klimawandel voranschreitet, desto gefährlicher werden die damit verbundenen Auswirkungen auf die Natur als menschliche Lebensgrundlage.

Das Technologieprogramm IKT für Elektromobilität des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie fördert bereits seit 10 Jahren ambitionierte Vorhaben rund um das Thema Elektromobilität. Um die Klimaziele zu erreichen sind erhebliche Anstrengungen notwendig. Dazu kann die Elektromobilität einen entscheidenden Beitrag leisten, denn der Verkehrssektor ist einer der energieintensivsten.

Aktuell befinden sich Gesellschaft und Wirtschaft in einem Umbruch, der, unabhängig von der akuten Bedrohung durch Corona, weitreichende Änderungen in Energiewirtschaft, Logistik und Mobilität nach sich ziehen wird. Die erneuerbaren Energien müssen unabhängiger von ihrer volatilen Verfügbarkeit gemacht werden. Batterien als Speichermedium sind bereits seit langer Zeit im Einsatz. Hier gilt es, die Verteilung des Stroms über das Netz sicherzustellen, langfristig neue Batterietypen zu entwickeln und die Nachhaltigkeit der Batterie, ggf. durch eine Zweitverwertung, zu steigern. Wasserstoff als mögliche Speicherform des aus erneuerbaren Energien hergestellten Stroms erscheint insbesondere für den Fernverkehr über lange Strecken eine grüne Alternative zum bisherigen Einsatz von Diesel und Benzin.

Die gezielte Weichenstellung zu neuen Technologien, die frühzeitige Erprobung dieser und die Umsetzung im Rahmen prototypischer Projekte in einer realen Umgebung sind essenzielle Vorgehensweisen, um den Wirtschaftsstandort Deutschland auch für die Zukunft

zu wappnen. In den kommenden zehn Jahren wird der bereits eingeläutete technologische Wandel verstärkt zu Tage treten. Deshalb ist es auch weiterhin wichtig, neue Technologien zu erproben und Anwendungsszenarien für diese zu entwickeln.

Die technologische Transformation vom klassischen Verbrennungsmotor der letzten hundert Jahre hin zu umweltfreundlichen Antrieben wird – und das ist bereits jetzt absehbar – keine Möglichkeiten für einen reinen Eins-zu-eins-Tausch der Technik bieten. Vielmehr stehen für verschiedene Einsätze unterschiedlich relevante Möglichkeiten zur Verfügung. Die geschickte Auswahl einer optimalen Lösung trägt zu deren größtmöglichem Nutzen bei.

Um diesen Nutzen zu stiften sollte das Technologieprogramm IKT für Elektromobilität auch weiterhin Möglichkeiten für den Einsatz neuer Technologien rund um das Thema Elektromobilität ausloten. Das in den Forschungsprojekten generierte Wissen kann ein zentraler Baustein für die Absicherung des Wirtschafts- und Wissensstandortes Deutschland sein und dadurch langfristig auch über 2030 hinaus die ökonomische, ökologische und soziale Zukunft sichern.

184 [https://www.handelsblatt.com/politik/international/kampf-gegen-die-globale-erwaermung-eu-parlament-verschaerft-klimaziel-auf-minus-60-prozent-heftige-kritik-aus-der-wirtschaft/26253056.html? \(Abruf am 16.10.2020\)](https://www.handelsblatt.com/politik/international/kampf-gegen-die-globale-erwaermung-eu-parlament-verschaerft-klimaziel-auf-minus-60-prozent-heftige-kritik-aus-der-wirtschaft/26253056.html? (Abruf am 16.10.2020)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schlüsselthemen der Metastudie 2030	2
Abbildung 2: Potential zur CO ₂ -Reduzierung	4
Abbildung 3: Endenergieverbrauch im Verkehrssektor nach Energieträgern	5
Abbildung 4: CO ₂ -Emissionen der EU	6
Abbildung 5: Anzahl der Elektrofahrzeuge „Global“ und „Europäisch“	7
Abbildung 6: Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle beim Entladevorgang	8
Abbildung 7: Phasendiagramm Mischung der Übergangsmetalle Ni, Co und Mn	9
Abbildung 8: Batteriezellfertigung in Deutschland	11
Abbildung 9: Farbschema zu den Grundlagen der Wasserstoffherstellung	13
Abbildung 10: Vergleich Antrieb in E-Fahrzeug und Brennstoffzellenauto	17
Abbildung 11: Einsatzszenarien Batterie versus Wasserstoff-Brennstoffzelle in Fahrzeugantrieben	18
Abbildung 12: Übersicht alternativer Kraftstoffe	19
Abbildung 13: Vergleich konventioneller und alternativer Kraftstoffe	20
Abbildung 14: Antriebstechnologien der Zukunft	22
Abbildung 15: Energiemarkt 2030 (Auszug mit Fokus auf E-Mobilität)	25
Abbildung 16: Energieszenario 2030	28
Abbildung 17: Wahrscheinlicher Einsatz von Ladetechnologien 2030	30
Abbildung 18: Übersicht Lademöglichkeiten	31
Abbildung 19: Konzepte für die Vernetzung von Verbrauchern und Stromnetz	33
Abbildung 20: Stufenkonzept des autonomen Fahrens	36
Abbildung 21: Zustelloptionen der Zukunft	37
Abbildung 22: Verkehrsträger und Antriebsenergie	39
Abbildung 23: Logistikakteure	42
Abbildung 24: Visualisierung Flybot	45
Abbildung 25: Visualisierung Litfaß-Logistik	46
Abbildung 26: Visualisierung Paket Concierge	48
Abbildung 27: Visualisierung Last Mile Market	49
Abbildung 28: Visualisierung DBee-Logistik	50
Abbildung 29: Dimensionen für Logistikszenerarien 2030	52
Abbildung 30: CO ₂ -Emissionen des Verkehrs in der EU	54
Abbildung 31: Car2...-Kommunikation	56

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e. V.

Stresemannallee 15
60596 Frankfurt am Main
Tel. +49 69 6308-0
service@vde.com
www.vde.com

VDE