



Eine historisch basierte Analyse

1

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns,
Konstantin Sasse, Björn Vetter und Paul Thomes

Um den vollständigen geschichtlichen Verlauf der Elektromobilität und seine Ursachen zu erläutern, wurde die folgende historisch basierte Analyse in fünf Teilaspekte gegliedert. Im ersten Schritt wird die Ausgangssituation der Analyse in Abschn. 1.1 dargestellt. Sie ist durch die Fragestellung nach der Ursache des Aufstiegs und der langjährigen Dominanz

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de

K. Sasse

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: k.sasse@pem.rwth-aachen.de

B. Vetter (✉)

Commissioning Engineer, Siemens Mobility, Munich, Deutschland

E-Mail: bjoern.Vetter@rwth-aachen.de

P. Thomes

em. Universitätsprofessor, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: thomes@wisotech.rwth-aachen.de

des Verbrennungsmotors gekennzeichnet, der ursprünglich in Konkurrenz zum elektrischen Antrieb stand. Dieser Vorrang mündete in einem Paradigma zugunsten des Verbrennungsmotors. Die Erklärung jener Paradigmenbildung erfolgt in Abschn. 1.2 – mit Blick auf die zeitgeschichtlichen Umstände. Die Technologie elektrischer Antriebe hatte trotz des Verbrennungsmotoren-Paradigmas kontinuierlich in Spezialanwendungen Bestand, wodurch das Know-how rund um diese Technologie erhalten geblieben ist. Die Gründe dafür und der Einfluss dieses Aspekts sind in Abschn. 1.3 beschrieben. Der in den 1990er-Jahren aufkommende Aufschwung der elektrischen Antriebstechnologie in mobilen Anwendungen und deren Etablierung als Zieltechnologie für künftige Mobilität ist Inhalt des Abschn. 1.4. Die bei dieser Entwicklung relevanten Aspekte und Erscheinungsformen werden schrittweise erläutert. Die Tragweite und die Umstände, welche die Elektromobilität zum aktuellen Zeitpunkt und in der prognostizierbaren Zukunft kennzeichnen, sind Gegenstand von Abschn. 1.5. Es stellt den Abschluss der Analyse dar und verdeutlicht, weshalb Elektromobilität als Schlüssel zu einer nachhaltigen Mobilität gelten darf.

1.1 Motivation und Methode

Elektromotoren als Antriebsquelle von Fahrzeugen besitzen eine rund 200 Jahre alte Geschichte. Ihre Ursprünge liegen auf der Straße, der Schiene und dem Wasser und fallen unmittelbar mit der beginnenden Praxistauglichkeit des Elektromotors in den 1830er-Jahren zusammen. Bereits 1838 entwickelte Hermann Jacobi einen 220 W starken Elektromotor und stattete ein 14 Personen fassendes Boot damit aus. Bedeutende Innovationen wie geeignete Bleiakkumulatoren in den 1850ern und die Entwicklung des dynamoelektrischen Prinzips durch Siemens im Jahr 1866 verhalfen dem Elektromotor zum Durchbruch. Das Konzept elektrischer Mobilität ist damit sogar älter als die mobile Anwendung des Verbrennungsmotors. Mit diesem waren erste Mobilitätslösungen in den 1860er-Jahren zu Wasser und mit Hilfe des Lenoir'schen Gasmotors zu Land unterwegs. Den Durchbruch schaffte das Konzept des Verbrennungsmotors 1885/1886 in den Fahrzeugkonstruktionen von Daimler und Benz, die auf dem 1876 patentierten Ottomotor basierten.

Der Verbrennungsmotor ist ein weitaus jüngerer Antriebskonzept als das der Dampfmaschine. Diese realisierte erstmals das Konzept des ermüdungsfreien Antriebs, dessen Anfänge durch James Watt sich bis in die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts zurückverfolgen lassen. Die Dampfisenbahn katapultierte seit den 1820er-Jahren, ausgehend von Großbritannien als Wiege der Industrialisierung, die Effizienz und die Qualität des Transports von Menschen und Gütern in ungeahnte Dimensionen. Sie bildet damit zweifelsohne einen Meilenstein in der technischen Geschichte. Dieser Erfolg setzte indes neue Anreize für den bis dato überwiegend pferdebewegten Straßenverkehr.^{1,2}

Auch „La Mancelle“, das erste seriengefertigte Auto, war mit einem Dampfmotor ausgestattet. 1878 wurden 50 Exemplare produziert und verkauft. Nur ein Jahr später

¹ Vgl. Schiedt 2010.

² Vgl. Weiher und Goetzler 1981.

präsentierte Siemens die weltweit erste elektrisch betriebene Lokomotive. Das erste Elektroauto fand in Frankreich spätestens 1881 seinen Weg auf die Straße – als Dreirad und als Vierrad. Noch im selben Jahr ging die erste Straßenbahn, wiederum ein Produkt von Siemens, dauerhaft in Betrieb. Nur ein Jahr später folgte mit dem „Elektromote“ in Berlin der weltweit erste Oberleitungsbus. Die erste Ober-Buslinie startete 1900 im Kontext der Pariser Weltausstellung. Ein Elektroauto mit dem bezeichnenden Namen „La Jamais Contente“ (Französisch für „Die nie Zufriedene“) bewegte 1899 erstmals einen Menschen auf der Straße schneller als 100 Stundenkilometer. Ein elektrischer Wagen des französischen Herstellers Krieger, der erstmals Rekuperationsbremsen verbaute, legte 1901 eine Strecke von mehr als 100 km mit einer mittleren Geschwindigkeit von knapp 20 km/h ohne Nachladen zurück. Die 200-Stundenkilometer-Marke wurde bereits 1896, jedoch zuerst von einem Dampfwagen, erreicht.^{3,4,5,6}

Die gezeigten Meilensteine verdeutlichen: Mobilität ist ein menschliches Grundbedürfnis, für das hohe Anstrengungen erbracht wurden und immer noch werden. Die Erfindung des motorischen Antriebs erhöhte die Geschwindigkeit im Landverkehr rasant, die zuvor über Jahrtausende hinweg konstant gewesen war, und führte zu einem vollkommen veränderten Mobilitätskonsum und -verhalten. Neue Aktivitäten auf einem sich gerade entwickelnden Wachstumsmarkt kamen auf. Im Bereich der Automobile entstand dadurch die Konkurrenz zwischen den Antriebskonzepten Elektromotor, Dampfmotor und Verbrennungsmotor. Dieser Wettbewerb dauerte rund zwei Jahrzehnte an, bis der Verbrennungsmotor im frühen 20. Jahrhundert zu Wasser und zu Land die Märkte zu dominieren begann. Prägend für den Ausgang des Wettstreits der Antriebskonzepte ist das von KUHN sogenannte Verbrenner-Paradigma.^{7,8,9} Die ursprünglich verheißungsvolle Marktchance durch das „Golden Age“ des Elektroautos zwischen 1900 und 1920 fiel in sich zusammen.

Der Technikhistoriker GJMS MOM hat sich auf der Suche nach den Ursachen für den damaligen Karrierebruch „des Autos von morgen“ systematisch und philosophisch mit den historischen Zusammenhängen auseinandergesetzt. Er macht eine Mischung technischer und soziokultureller Faktoren für die Paradigmenentscheidung zugunsten des Verbrennungskonzepts verantwortlich, die gleichzeitig das Auto als Mobilitätssystem zum Erfolg führte.^{10,11,12}

³Vgl. Abt 1998.

⁴Vgl. Kirsch 2000.

⁵Vgl. Mom 2004.

⁶Vgl. Weiher und Goetzler 1981.

⁷Vgl. Zapf 2016.

⁸Vgl. Dienel und Trischler 1997.

⁹Vgl. Rammler und Weider 2011.

¹⁰Vgl. Mom 2004.

¹¹Vgl. Canzler und Knie 1994.

¹²Vgl. Möser 2002.

Ausgehend von der Annahme einer Mensch-Technologie-Beziehung, lässt sich das Auto als soziotechnisches Konstrukt definieren. Daher kommt hier ein methodischer, technik- und kulturverbindender Erklärungsansatz zur Anwendung.^{13,14} Er bezieht sich weitgehend auf die industrialisierte Welt und umfasst alle automobilen Nutzungsarten, die aufgrund spezifischer Rahmenbedingungen eine bestimmende Rolle spielten und spielen. Das Ziel ist die Analyse der Faktoren und Bedingungen von Elektromobilität im Vergleich zum auf fossilen Energiequellen basierenden Verbrenner-Paradigma. In diesem Zusammenhang existieren zwei Leitfragen. Zum einen, weshalb Elektrik und Elektronik seit der Etablierung des Automobils zunehmend zum Einsatz kommen, die Antriebsquelle aber bis in die 2000er-Jahre hinein fast ausschließlich der Verbrennungsmotor darstellt. Zum anderen: Warum findet ein regenerativ-energetischer Paradigmenwechsel, verbunden mit der Elektrifizierung der Antriebsquelle, erst jetzt – in den 2020er-Jahren – statt, wenn die Dringlichkeit einer nachhaltigen Mobilität mit Blick auf den Klimawandel und seine Auswirkungen bereits einen kritischen Punkt erreicht hat?

1.2 Paradigmenbildung – Öl statt Strom

Den Ausgangspunkt für die Untersuchung der Paradigmenbildung bildet eine vergleichende quantitative Bestandsaufnahme und eine Stärken-Schwächen-Analyse der Antriebskonzepte Verbrennungs- und Elektromotor. Die Untersuchung erfasst zunächst die Phase vor dem Ersten Weltkrieg, in der der Ursprung des Verbrenner-Paradigmas lag.

Ein Blick auf die USA als Treiber der automobilen Fortbewegung zu Beginn des 20. Jahrhunderts zeigt, dass vor dem Ersten Weltkrieg noch kein Antriebskonzept absolut dominant gewesen ist. Ungefähr 40 % der Kraftfahrzeuge wurden mit Dampf, 38 % mit Strom und 22 % mit Benzin angetrieben. 1901 lagen in New York die Elektroautos mit einem Anteil von 50 % an der Spitze, gefolgt von Dampfautos mit etwa 30 %. In absolute Zahlen konnten 1912, auf dem Höhepunkt des frühen E-Mobilitätsbooms in den USA, beachtliche 33.842 Elektroautos von 20 Herstellern verbucht werden. Allein in Detroit, im damaligen Zentrum der US-Elektromobilität, waren 1913 rund 6000 Einheiten zugelassen. Andererseits rollten im selben Jahr landesweit mindestens 80.000 Einheiten des seit 1908 von Ford gebauten „Model T“ auf die Straße. 1914 war das Typenspektrum genauso vielfältig wie es die Antriebskonzepte waren. Zu dieser Zeit gab es bereits alle im privaten und kommerziellen Bereich wesentlichen Varianten – vom Sportauto bis hin zum Zehn-Tonner-Schwerlastwagen.^{15,16,17,18}

¹³ Vgl. Abt 1998.

¹⁴ Vgl. Ropohl 1979.

¹⁵ Vgl. Banham 2002.

¹⁶ Vgl. Kirsch 2000.

¹⁷ Vgl. Möser 2002.

¹⁸ Vgl. Rao 2009.

Mit herausragenden Leistungen tat sich indes schon im Jahr 1900 der österreichisch-deutsche Konstrukteur Ferdinand Porsche hervor: Die Wiener Kutschenfabrik Lohner präsentierte zu dieser Zeit ein von Porsche entwickeltes Elektroauto bei der Pariser Weltausstellung. Der „Semper Vivus“ erregte wegen seiner innovativen Technik in Frankreich als Zentrum des europäischen Automobile-Treibens großes Aufsehen. Mit zwei Radnabenmotoren an der Vorderachse gilt das Fahrzeug als das erste transmissionslose und vorderadgetriebene Auto. Der Wirkungsgrad soll bei mehr als 80 % gelegen haben, während eine 410 kg schwere Bleibatterie für 50 Stundenkilometer Höchstgeschwindigkeit und bis zu 50 km Reichweite bei einer Normleistung von rund 2,5 PS pro Motor sorgte. Eine Rennversion mit vier Radnabenmotoren, einer Leistung von jeweils sieben PS und einem Batteriegewicht von 1800 kg gilt als das weltweit erste Allradauto.^{19,20} Einen weiteren Meilenstein markierte kurz darauf die „Mixte“, der erste serielle benzin-elektrische Hybrid. Die Preise des Lohner-Porsche begannen ab 8500 Mark – etwa der zehnfache durchschnittliche Jahreslohn eines damaligen Arbeiters. Abnehmer waren die europäische Avantgarde der Adligen sowie Unternehmer und Künstler. Insgesamt wurden 300 Einheiten des Prestigeobjekts gebaut. Zum Vergleich: Der erste Opel kostete 1899 als günstiges Benzinfahrzeug mit Luftreifen und vier PS rund 4300 Mark, der legendäre erste Mercedes im Jahr 1901 mit 35 PS rund 16.000 Mark.^{21,22,23}

Allein das Angebot der Fahrzeuge jener Zeit spiegelt bereits das ausgeprägte individuelle Mobilitätsbedürfnis der Menschen wider. Zum einen ging es von der Erfindung der jeweiligen Antriebstechnologie bis zu ihrer mobilen Anwendung rasend schnell, zum anderen zeigt sich eine prinzipielle Offenheit des Antriebsspektrums. Dieses Schema sollte sich bald ändern: Wenig später begann der Ottomotor seine Erfolgsgeschichte als dominierender Automobilantrieb, während das Dampfkonzepth vor allem aufgrund seiner eingeschränkten Handhabbarkeit für den Straßeneinsatz komplett ausschied.^{24,25,26}

Zu welchem Ergebnis gelangt nun eine Analyse der Stärken und Schwächen jener Fahrzeuge aus der Zeit der Jahrhundertwende? Als Vorzüge des Elektroautos galten vor allem sein anspruchloser und drehmomentstarker Antrieb, die einfache Bedienung, eine gut dosierbare Geschwindigkeitsregelung, die Effizienz in Form von mäßigen Betriebskosten und eine gute Zuverlässigkeit sowie seine Umweltverträglichkeit, die sich in einer geringen Geräusch- und Geruchsentwicklung offenbarte. Insbesondere die letztgenannten Eigenschaften halfen dabei, die durchaus verbreiteten Widerstände gegen das Auto-

¹⁹ Vgl. Norton 1985.

²⁰ Vgl. Lewandowski 1987.

²¹ Vgl. Barthel und Lingnau 1986.

²² Vgl. Fersen 1986.

²³ Vgl. Seherr-Thoss 1979.

²⁴ Vgl. Abt 1998.

²⁵ Vgl. Lewandowski 1987.

²⁶ Vgl. Möser 2002.

mobil zu vermindern. Jene kritische Haltung verdeutlicht der damalige „Red Flag Act“: Das bis 1896 im Vereinigten Königreich geltende Gesetz zur Verminderung von Unfällen im Straßenverkehr begrenzte die maximal zulässige Geschwindigkeit von Dampfwagen auf vier Meilen pro Stunde außerorts sowie auf zwei Meilen pro Stunde innerorts. Zusätzlich verpflichtete das Gesetz zur Führung eines Fahrzeugs durch zwei Personen sowie einer dritten Person, die mit einer roten Flagge vorangeht, um die Bevölkerung vor dem herannahenden Gefährt zu warnen. Ein Aspekt des Gesetzbeschlusses lag in der Aus handlung der Straßennutzungsrechte unter den Verkehrsteilnehmern. Das bezüglich Geräusch- und Geruchswahrnehmung angenehme Elektroauto erfuhr schließlich eine höhere Akzeptanz, ebnete damit aber indirekt auch dem Auto mit Verbrennungsmotor den Weg.²⁷

Als Schwächen kristallisierten sich die immer mehr als begrenzt empfundene Reichweite sowie die recht kurze Batteriebensdauer heraus, die sich durch Kälteempfindlichkeit und Erschütterungsanfälligkeit ergab. Der Lebenszyklus betrug bis zu 6000 km. Als psychologisches Moment wird außerdem der subjektiv geringe Spaßfaktor angeführt, der in einfacher Beherrschbarkeit und niedrigerer Geschwindigkeit begründet lag. So taugte das Elektroauto nur bedingt zum Rennsport, der schon damals ein hohes Ansehen genoss. Die spezifischen Produktionsstrukturen von Elektroautos haben ebenfalls nachteilig gewirkt: In den meisten Fällen konstruierten die Hersteller diese Autos nicht selbst, sondern bauten sie aus zugelieferten Teilen zusammen, was die technische Entwicklung gehemmt haben könnte.²⁸

Als schärfste Bedrohung des Elektroautos erwies sich jedoch die rasche Entwicklung der Verbrennungsmotorentechnologie. Das Benzinauto holte so einerseits positive Eigenschaften seines elektrischen Konkurrenten auf – vor allem die verbesserte Zuverlässigkeit und Handhabbarkeit verkürzten den Komfortvorsprung des Elektroautos. Andererseits konnten die Fahrer einer „Lust an den Vibrationen des Verbrennungsmotors“ ebenso wie dem geschwindigkeitsaffinen „joy riding“ mit steigender Begeisterung nachgehen, während die Reichweite der Autos trotz höherer Geschwindigkeiten wuchs. Diese Aspekte fielen mit sich verändernden individuellen mobilen Bedürfnissen zusammen, die ebenfalls zu Lasten des Elektroautos gingen. So sah sich das gesamte Konzept der Elektromobilität zu Beginn des 20. Jahrhunderts vor mehrere Herausforderungen gestellt: Es musste sich dem Benzinkonkurrenten anpassen, zugleich weiter an eigener Kontur gewinnen, und der Ausbau der Versorgungsinfrastruktur musste ebenso schnell vorangetrieben werden wie die Batterietechnik. Vielleicht wären auch ein erhöhtes Umweltbewusstsein und ein steigendes Einkommen in den wachsenden städtischen Ballungsräumen notwendig gewesen, um die Marktanteile zumindest zu stabilisieren – dann hätten die daraus entstandenen Skaleneffekte womöglich den sich immer mehr abzeichnenden Preisnachteil gegenüber dem Benzinauto kompensieren können. So veränderte sich das Elektroauto zwischen 1905 und 1925 in mehreren Aspekten. In dieser Zeit lassen sich alle jene Anwendungen finden, die

²⁷ Vgl. Norton 1985.

²⁸ Vgl. Rammler und Weider 2011.

auch heute Relevanz beanspruchen. So experimentierte unter anderem Porsche mit elektromotorischen Range-Extendern. Schon im Jahr 1896 setzte man in Taxis zur Verlängerung der Betriebszeiten Batteriewechselsysteme ein. Zugleich wurden die Batterien robuster und leistungsfähiger. Das erhöhte den Bewegungsradius und die Geschwindigkeit. Außerdem gab es Fortschritte bei der Schnellladung und der Weiterentwicklung der Ladeinfrastruktur. Solche Anlagen trugen einerseits dazu bei, das Elektroauto von seinem Image als reines Nahverkehrsvehikel zu befreien, und andererseits dokumentieren sie die potenzielle Investitionsbereitschaft und damit den Glauben an den Erfolg des Konzepts.^{29,30}

Allerdings gab es auch mindestens zwei gravierende Rückschläge: Der seit 1912 zunehmend in Serie verbaute elektrische Anlasser für Benzinmotoren, seit 1919 auch in Fords „Model T“, bedeutete den Verlust eines zentralen Komfortvorteils des Elektroautos. Das gerne nach außen getragene „Lady Image“ des Elektroautos verkam zum „Old Lady Image“ – einer von mehreren Misserfolgsgründen und damit gleichzeitig ein Erfolgsfaktor für die konkurrierenden Fahrzeuge mit Benzinmotor. Aber auch der Erste Weltkrieg spielte eine entscheidende Rolle. In dieser Zeit wurde die Leistungsfähigkeit von Verbrennungsmotoren in mobilen Anwendungen unter schwierigsten Bedingungen offenbart: Die fortgeschrittene Motorisierung der alliierten Truppen gilt als ein kriegsentscheidendes Kriterium. Dies hatte langfristige Folgen, da die forcierte Entwicklung von Benzinmotoren zusammen mit der Massenproduktion die Motorenpreise schnell sinken ließ und die der Elektromotoren bestenfalls stagnierten.^{31,32,33}

Zwar gab es in den frühen 1920er-Jahren noch eine kurze Erfolgsphase der Elektroautos, die im Wesentlichen auf der Wiederaufnahme der zivilen Produktion nach dem Krieg beruhte. Ein neuer Boom der Elektromobilität blieb aus. Das Konzept des Elektroautos hatte lediglich in bestimmten Nischen Bestand, wo es dem Benziner eindeutig überlegen war – und es bis heute ist –, wie das folgende Kapitel dokumentiert.³⁴

Mit Blick auf die 1920er-Jahre zeigt die Analyse also überwiegend Nachteile der damaligen Elektromobile. Die Optimierung des Konzepts reichte nicht aus, um den Markterfolg zu sichern. Zwar nahmen die Hersteller die Herausforderung an, die Erfolgsgeschichte des Verbrennungsmotors verhinderte das jedoch nicht. Vielmehr bildete sich im zweiten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts das bis heute gültige Verbrenner-Paradigma heraus. So viel ist sicher: Das Elektrofahrzeug-Konzept verhalf dem Auto entscheidend zum Markterfolg und ist daher von hoher technischer und sozioökonomischer Bedeutung. Trotz beachtlicher Technikfortschritte, vor allem aufgrund der geringen Energiedichte und Lebensdauer der Batterien sowie der hohen Kosten in einem damals unregulierten Markt, konnte es sich nicht durchsetzen.

²⁹ Vgl. Kirsch 2000.

³⁰ Vgl. Mom 2004.

³¹ Vgl. Abt 1998.

³² Vgl. Möser 2002.

³³ Vgl. Seherr-Thoss 1979.

³⁴ Vgl. Mom 2004.

1.3 Leben in einer Nische – Spezialfahrzeuge als Know-how-Speicher

Trotz der Marktdominanz von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wurde das Konzept batterieelektrischer Fahrzeuge dennoch weiterentwickelt – und zwar dort, wo es auf die Bereitstellung sauberer Leistung in vorhersehbaren Betriebsabläufen und einem fest definierten Aktionsradius ankam. In diesen Anwendungen blieb das Prinzip des „elektrischen Pferdes“ bestehen.³⁵ Seit den 1920er-Jahren wurden Elektroautos überwiegend kommerziell genutzt, etwa als Kleintransporter in geschlossenen Räumen wie Hallen und Lagern, wo lokale Emissionsfreiheit erforderlich war. Im Außeneinsatz wurden sie vor allem im urbanen Umfeld in Form von Omnibussen, Kranken-, Feuerwehr- und Müllwagen sowie bei der Auslieferung von Milch, Post und Zeitungen eingesetzt. Vorkriegsmodelle reichten sich auch nach 1945 vereinzelt in den Verkehr ein. In Ostberlin sollen noch in den 1960er-Jahren Exemplare der in den 1920er-Jahren von der Firma Bergmann gebauten 2,5-Tonner-Kleinlastwagen zu sehen gewesen sein – auch ein Indiz für die Langlebigkeit der Technologie.³⁶

Der Blick auf den deutschen Markt zeigt interessante Resultate. In der Zwischenkriegszeit existierten mindestens zwölf Hersteller. In der zweiten Hälfte der 1930er-Jahre waren rund 5000 Elektroautos zugelassen, etwa die Hälfte von ihnen für die lokale Postzustellung. Auch Elektrotraktoren gab es – eine deutsche Entwicklung. Als flexible Alternative zur zwischenzeitlich komplett elektrifizierten Straßenbahn verbreiteten sich auch Oberleitungsbussysteme. Die auf Importunabhängigkeit vom Erdöl zielende kriegsvorbereitende NS-Autarkiepolitik spielte dabei eine erhebliche Rolle. Gleiches gilt für die erstmalige Normung von Batterien. Die bekannten konzeptionellen Schwächen – niedrige Reichweite und hohe Kosten – blieben jedoch bestehen.^{37,38}

Ein besonders elektroautoaffiner Markt war in Großbritannien zu finden. Dort kam das Elektroauto ebenfalls überwiegend im lokalen „Stop-and-go“-Liefer- und Entsorgungsgeschäft zum Einsatz. Die Stadt Birmingham unterhielt von 1917 bis 1971 durchgehend Elektroautos im Fuhrpark; das letzte dieser Fahrzeuge wurde 1948 angeschafft. Das High-light bildete der „small electric van“, der als Auslieferungswagen für Milch und Brot fungierte. Anfang der 1930er-Jahre beförderte er rund 500 kg Nutzlast über eine Strecke von 30 km. 1946 waren 7828 des mit Batteriewechselsystemen ausgestatteten, als „milk float“ bezeichneten Elektroautos im Vereinigten Königreich registriert. Zwei britische Milchwagenhersteller starteten indes einen Elektroauto-Neuanfang: Ein viersitziges Coupé im „Petrol-Car Styling“, basierend auf einer 64-Volt-Batterie, brachte es 1935 auf eine Höchstgeschwindigkeit von 42 km/h bei einer Reichweite von 64 km. Es wurden nur 40 Exemplare verkauft, wofür der hohe Preis von 385 Pfund (heute rund 33.000 €) ausschlaggebend war. Er kostete nahezu doppelt so viel wie der populäre „Morris Ten“, der

³⁵ Vgl. Mom 2004.

³⁶ Vgl. Georgano und Wright 1993.

³⁷ Vgl. Abt 1998.

³⁸ Vgl. Möser 2002.

fast 100 Stundenkilometer bei praktisch beliebiger Reichweite versprach. In den USA begann zu ähnlicher Zeit – um 1930 – die bis heute währende Erfolgsgeschichte der zweisitzigen „Golf Carts“ und der verwandten „Shopping Carts“.^{39,40}

Der Zweite Weltkrieg führte aufgrund der starken Kraftstoffknappheit in Frankreich zu einer kleinen Blüte der Elektromobilität. So produzierte etwa der Hersteller „Véhicules Électriques Stéla“ ab 1941 ein Fahrzeug mit einer Reichweite von 130 km bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h – ein für diese Zeit beachtlicher Wert, der durch ein Bleiakkumulatorensystem realisiert wurde, dessen Gewicht eine Tonne betrug.⁴¹ Einen anderen Ansatz brachte Peugeot 1942 mit dem VLV auf die Straße: ein Mikroauto für den städtischen Bereich.⁴² Interessant sind diese Entwicklungen deshalb, weil man Elektroantriebe in Produkttypen verbaute, die ursprünglich für Verbrennungsmotoren entworfen wurden – ein fortan wiederkehrender Ansatz. Die nach dem Zweiten Weltkrieg ungebrochene Dominanz des Verbrenner-Paradigmas dokumentiert beispielsweise die Tatsache, dass ein 1946 beim ersten Pariser Nachkriegssalon gezeigter CGE-Tudor-Pkw nicht in Serie ging. Neue elektrische Pkw (Personenkraftwagen) scheiterten auch in den USA – trotz damals beachtlicher Reichweiten von knapp 200 km.⁴³

Die Ursachen des erneuten Scheiterns lagen wiederum im Verhältnis von Kosten und Nutzen, das sich nach 1945 noch stärker zugunsten der Automobile mit Verbrennungsmotoren veränderte. Ähnliches gilt für den Omnibus- und den Lkw-Bereich, in dem seit den 1920er-Jahren der sparsame und in der Leistungscharakteristik dem Elektromotor ähnliche Dieselantrieb vermehrt zum Einsatz kam. Unter anderem stoppte die deutsche Post aus diesem Grund ein nach dem Krieg gestartetes Projekt eines batterieelektrischen Lkw. Die seit 1955 in der Bundesrepublik Deutschland geltende Besteuerung der Elektroautos nach Gewicht unterband weitere Bestrebungen und veranlasste die verbliebenen Hersteller wie etwa Gaubshat, Lloyd und Esslingen dazu, ihre Produktion einzustellen. Dennoch: Ein Gaubshat-Elektro-Paketwagen mit Baujahr 1956, mit einem Antrieb der Aachener Firma Garbe-Lahmeyer, wurde noch bis 1984 im Aluminiumwerk Singen in der internen Postzustellung genutzt. Auch in Großbritannien blieben die Milchwagen erfolgreich: In den 1970er-Jahren erreichten sie mit mehr als 50.000 Einheiten ihren höchsten Bestand. In keinem anderen Staat waren bis dahin mehr Elektroautos im Einsatz. Auch die berühmten Londoner Doppeldecker fuhren zeitweise oberleitungsgespeist elektrisch. Außerdem erlebten die kostengünstigen Trolleybus-Systeme in den 1950er- und 1960er-Jahren weltweit eine Blüte, oft als Ergänzung oder Ersatz der elektrischen Straßenbahn.^{44,45,46}

³⁹ Vgl. Georgano und Wright 1993.

⁴⁰ Vgl. Rammler und Weider 2011.

⁴¹ Vgl. Georgano 2000.

⁴² Vgl. Manz 2019.

⁴³ Vgl. Möser 2002.

⁴⁴ Vgl. Bonin 2003.

⁴⁵ Vgl. Fersen 1986.

⁴⁶ Vgl. Barthel und Lingnau 1986.

Elektromobilitäts-„Inseln“ entstanden auch in „autofreien“ Erholungsorten der Schweiz. In Zermatt, wo seit 1931 ein Verbot von Autos mit Verbrennungsmotor gilt, wuchs die Zahl der Elektroautos seit 1947 beständig, als sich ein Privatier das erste Exemplar – wahrscheinlich aus britischer Produktion kommend – zulegte. Mehrere Kleinbetriebe bauten die Elektroautos vor Ort bei wachsender Variantenvielfalt. Da die Elektrizität zudem überwiegend aus Wasserkraft stammte, gab es dort eine der ersten Umsetzungen eines mit regenerativer Energie betriebenen und emissionsfreien Verkehrskonzepts. Die weltpolitischen Krisen der 1950er-Jahre, wie der Koreakrieg und die Suezkrise 1956, führten zu ersten Ölpreisschocks, hatten jedoch aufgrund der Kürze keine Auswirkungen auf das Paradigma. Öl überschwemmte als billige Energie zu diesen Zeiten regelrecht die Märkte. Die Wirtschaftlichkeit von Verbrennungsmotoren in Ländern mit höheren Kraftstoffpreisen wurde durch die dort zunehmende Verbreitung von Pkw-Diesel sichergestellt. Es gab daher keine triftigen Gründe, sich vom Verbrennungsmotor abzuwenden.^{47,48,49}

Zugleich begann mit dem wachsenden Wohlstand das Zeitalter der Massenmobilisierung auf individueller Basis.⁵⁰ Der Verbrennungsmotor bildete aufgrund seiner Verbreitung und seiner Wirtschaftlichkeit den idealen Antrieb dafür. Wohl deshalb fand die Präsentation des ersten einsatzfähigen Fahrzeugs mit Brennstoffzelle durch den Landmaschinenhersteller Allis-Chalmers im Jahr 1959 kaum Beachtung. Bei dem Gefährt handelte es sich um einen Traktor mit 20 PS und einem Wirkungsgrad von 90 %, der auf dem bereits seit den 1830er-Jahren bekannten Brennstoffzellenprinzip basierte. So wurde die Zukunft des Elektroautos in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ungewisser als je zuvor – abgesehen von Ausnahmen wie den britischen „milk floats“. Technik- und Gebrauchsparadigma der Mobilität formten sich wechselwirkend nach dem US-Muster in einem stabilen, fossilen und verbrennungsbasierten Automobilitätspfad.⁵¹

1.4 Renaissance eines Zukunftskonzeptes

Im Verlauf der Nachkriegszeit entwickelte sich vor allem in den USA schnell eine Gesellschaft, die im Überfluss lebte. Aus den Folgen des unkontrollierten Wirtschaftswachstums entwickelte sich ein Umweltbewusstsein in Teilen der Gesellschaft, das dem Elektroauto-Konzept eine neue Chance eröffnete. In den USA verstärkte die wachsende ökologische Sensibilisierung – Stichwort: „Smog“ – seit Mitte der 1960er-Jahre, getrieben durch einen ersten „Clean Air Act“, die Suche nach Alternativen zum Verbrennungsmotor, während der Vietnamkrieg und die Hippie-Bewegung die Gesellschaft in großer Breite kritischer gegenüber dem Status quo werden ließen. Die Giganten Ford und General Motors

⁴⁷ Vgl. Bonin 2003.

⁴⁸ Vgl. Möser 2002.

⁴⁹ Vgl. Zapf 2016.

⁵⁰ Vgl. Andersen 1997.

⁵¹ Vgl. Rammler und Weider 2011.

reagierten mit umgerüsteten Modellen wie dem Opel Kadett auf Basis von Blei- und Zinkbatterien – doch die Autos blieben Demonstrationsobjekte. Weitere Bestrebungen gab es von Unternehmen, die umgebaute elektrifizierte Renaults in geringer Stückzahl vertrieben. 1968 präsentierte General Electric einen innovativen Versuchsträger, der zur Beschleunigung Zink- und zum Fahren Nickelbatterien einsetzte. Doch das Vorhaben verlief sich in einem Show-Effekt, da die angestrebte Verfügbarkeit leistungsfähigerer Batterien ausblieb.^{52,53,54}

Ein Grund für den Misserfolg dieser Prototypen war der Mangel an verbindlichen gesetzlichen Regelungen, auf die man sich in den USA nicht einigen konnte. Daher blieb es bei unkoordinierten Initiativen einzelner Automobilhersteller und bestimmter Interessengruppen wie Elektroindustrie, Elektrizitätserzeuger und Batteriehersteller. Eine systematische Forschung kam ebenfalls nicht zustande. Ein Langstreckenwettbewerb zwischen MIT und CalTech offenbarte 1968 das katastrophale Ergebnis, dass es kaum einen Fortschritt zum Stand der 1920er-Jahre gab – denn die Durchschnittsgeschwindigkeit lag bei etwa 25 Stundenkilometern auf einer Strecke von 3300 Meilen. Der fast gleichzeitig und ebenfalls in den USA von Jerry Kugel in Kooperation mit Ford erzielte Geschwindigkeitsrekord von rund 223 Stundenkilometern hatte nur einen statistischen Wert. Zwei Jahre später motivierte die weitere Verschärfung des Umweltrechts zu Beginn der 1970er erstmals koordinierte Aktionen. Die US-Aktivitäten belebten auch global das Interesse an Elektroautos neu. Die 1972 publizierte Studie des „Club of Rome“ mit dem mahnenden Titel „Die Grenzen des Wachstums“ und die schockierende Ölpreiskrise 1973/1974 trugen dazu bei, dass elektrifizierte Nutz- und Personenwagen als Versuchsträger weltweit gebaut wurden. Beteiligt war der komplette Fahrzeug- und Zuliefermarkt. Bei den Autos handelte es sich in der Regel um umgerüstete Modelle – wie etwa 1976 die „CitySTROMer“ auf Basis des VW Golf. Zu den Ausnahmen zählten der auf der Insel Syros seit 1972 produzierte Kleinwagen Enfield-Neorion und ein 1976 hergestellter Stadtauto-Prototyp von Fiat. Die Serienproduktion von Elektroautos lag jedoch nach wie vor in weiter Ferne. Neben ungelösten Problemen wie Reichweite, Kosten und Ladeinfrastruktur egalisierte die dominante fossile Stromerzeugung das Alleinstellungsmerkmal der potenziellen Emissionsfreiheit von Elektromobilen. Die Elektromobilität war zu diesem Zeitpunkt daher noch kein praxisgerechter Ansatz zur erstmals aufkommenden Frage nach einer globalen Emissionsreduktion.^{55,56}

Elektrische Mobilität war allerdings abseits der Automobile ab den späteren Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts deutlich erfolgreicher. Beispielsweise stellte die Deutsche Bundesbahn 1977 den regulären Dampflokbetrieb ein. Alle Hauptstrecken waren seinerzeit bereits elektrifiziert. Der Fahrrad- und Motorradhersteller Hercules baute zwischen 1973

⁵² Vgl. Adams 2012.

⁵³ Vgl. Möser 2002.

⁵⁴ Vgl. Wehler 2008.

⁵⁵ Vgl. Abt 1998.

⁵⁶ Vgl. Adams 2012.

und 1977 mehrere Tausend elektrisch betriebener Kleinmotorräder des Typs E1.⁵⁷ Auch das bewies einmal mehr die prinzipiell hohe Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebs. Mitte der 1980er-Jahre, als die zweite Ölkrise die Gesellschaft erneut kurzzeitig für das Thema einer nachhaltigen Mobilität sensibilisierte, definierten Experten den Fahrzeugtyp des Vans und das Anwendungsgebiet der Elektromobilität in Unternehmensflotten als optimalen Markt für die Etablierung der Technologie. Darüber hinaus gelang eine Steigerung der Batterieenergiedichte, und mit der Wiederentdeckung der Brennstoffzelle als Antriebsmodul tauchte eine Alternative zur Batterieelektrik auf. Parallel zum langsam wachsenden Umweltbewusstsein gab es wieder Impulse durch kleinere Hersteller von Elektroautos. Größere Produzenten rüsteten vermehrt Kleinwagen um. Und dennoch: An der Marktdominanz der Automobile mit Verbrennungsmotor änderte das auch in den 1980er-Jahren nichts.^{58,59}

Im Zweiradsegment indes machte 1985 abermals Hercules mit einer Weltneuheit – einem Elektrofahrrad mit Nabenmotor und Scheibenbremse – auf sich aufmerksam. Lediglich 20 Prototypen wurden hergestellt. Nichtsdestotrotz handelte es sich um einen technischen Meilenstein, insbesondere mit Blick auf den Erfolg der heutigen Pedelecs und Elektrofahrräder. Das elektrische Leichtmofoa Electra hingegen, von dem sich etwa 19.000 Exemplare verkauften, erwies sich fünf Jahre später als großer Erfolg für Hercules.⁶⁰

Die sich verschärfende umwelttechnische Gesetzgebung, verbunden mit immer konkreteren Maßnahmen, verbesserte die Rahmenbedingungen für die Elektromobilität ab den 1990er-Jahren. Ein flächendeckender Markteintritt scheiterte auch diesmal wieder an den bekannten technischen Schwachpunkten in Verbindung mit der politischen Unentschlossenheit zu einer anreizorientierten Marktsteuerung, dem freiheitsgeprägten und damit reichweitenorientierten individuellen Mobilitätsbedürfnis, dem fehlenden Nutzermehrwert und letztlich auch der immer weiter fortschreitenden Evolution des Verbrennungsmotors.⁶¹

Ein bedeutender Akt politischer Entschlossenheit stellte 1990 das „Low Emission Program“ in Kalifornien dar, welches „Zero Emission Vehicles“, also Fahrzeuge mit lokal emissionsfreiem Antrieb, erstmals gesetzlich verankerte: Es setzte ein weltweites Zeichen, begleitet von der Forderung nach ökologischer Stromerzeugung. Als Konsequenz feierte bei der Internationalen Automobil-Ausstellung (IAA) 1991 eine Reihe von Studien und Prototypen Premiere – unter anderem von BMW, Mercedes, Opel und VW. Ein Jahr später baute Ford den „Ecostar“ mit NaS-Batterie und einer beachtlichen mittleren Reichweite von 150 km. Mehr als 100 Exemplare legten bis 1996 über 1,6 Mio. km zurück, bis Ford die Entwicklung aufgrund von Problemen mit der Batterietechnik bremste und die Entwicklung der Brennstoffzelle verstärkte. Der Konkurrent GM brachte 1996 das berühmte

⁵⁷ Vgl. Petzold 2011.

⁵⁸ Vgl. Canzler und Knie 1994.

⁵⁹ Vgl. Möser 2002.

⁶⁰ Vgl. Anderl 2021.

⁶¹ Vgl. Rammler und Weider 2011.

„EV1“ im eigenständigen „Purpose Design“ auf den Markt. Bis 1999 entstanden rund 1100 Exemplare, von denen etwa 800 an ausgewählte Kunden gingen – davon zahlreiche Prominente. Unter anderem infolge von Lobbyarbeit und erfolgreichen Klagen der größten Automobilhersteller gegen die ursprünglich radikalen Forderungen des Gesetzes „Low Emission Program“ wurde eben jenes 2003 gekippt. Verbildlicht wurde diese Thematik 2006 im Film „Who Killed the Electric Car?“, in dem das „EV1“ unfreiwillig die Hauptrolle spielte – eine erhellende, kritische Akteurs-Analyse der Ursachen für das Scheitern des Elektroautos in den 1990er-Jahren.⁶²

Ein Beispiel der neu entwickelten Elektrofahrzeuge aus den 1990er-Jahren in Deutschland ist die Neuauflage des Golf „CitySTROMer“, der 1992 in Kooperation mit Siemens entstand. Ausgestattet mit einem 20-Kilowatt-Drehstrom-Synchronmotor, Blei-Gel-Batterien und einem steckdosentauglichen Ladegerät, brachte das Fahrzeug es in drei Versionen auf insgesamt rund 120 Exemplare. Danach blieb der zwischen 1993 und 1996 gebaute Kleinwagen Hotzenblitz bis zum seit 2013 angebotenen „BMW i3“ das einzige in Deutschland entwickelte und in (Klein-) Serie produzierte Elektroauto: Rund 140 Exemplare des Fahrzeugs mit Zwölf-Kilowatt-Motor wurden damals produziert.⁶³

Die zwischenzeitliche Aufbruchstimmung der 1990er-Jahre spiegelte sich auch in neuen Flottenversuchen elektrischer Fahrzeuge von Post und Telekom wider: Auf der Insel Rügen startete 1992 ein von der Bundesregierung finanziertes Feldprojekt der Elektromobilität, an dem sich fast alle namhaften Hersteller von Fahrzeugen und Komponenten beteiligten und das bis 1996 andauerte. Impulse für die Veränderung der Mobilität waren in den 1990er-Jahren also auch in Deutschland gegeben. Doch die Auswertung des Großversuchs brachte ein negatives Ergebnis in den praxisrelevanten Kriterien Nachhaltigkeit, Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit. Infolgedessen wurde die Technologie in den nächsten Jahren nur mit wenig Nachdruck weiterverfolgt. Die enttäuschenden Resultate waren allerdings auch durch einen unökologischen Strommix und die Verwendung von umgerüsteten Fahrzeugen mit ursprünglichem Verbrennungsmotor bedingt. 15 Jahre später – Anfang 2011 – bewegten sich gerade einmal 2307 batterieelektrische Autos und lediglich 37.256 hybridelektrische Fahrzeuge auf Deutschlands Straßen.^{64,65}

Einen großen Meilenstein auf dem Weg aus der Nische elektrifizierter Fahrzeuge legte 1997 der Toyota Prius, ein Fahrzeug mit verbrauchssenkendem Hybridantrieb als System aus Benzinmotor und elektrischem Antrieb. Durch ein automatisches Energiemanagementsystem konnte das Auto Maßstäbe bei Verbrauch und Emissionen setzen. Darüber hinaus trug eine strömungsoptimierte Karosserie zur Verbrauchseinsparung bei. Der Prius verkaufte sich außerhalb von Europa hervorragend und wird bis heute in verschiedenen Generationen produziert. Weltweit veräußerte Toyota bis zum Jahr 2020 mehr als

⁶²Vgl. Rammler und Weider 2011.

⁶³Vgl. Wittler 2020.

⁶⁴Vgl. Rammler und Weider 2011.

⁶⁵Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) und Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2021.

15 Mio. Fahrzeuge mit Hybridantrieb und erzeugte damit eine Einsparung von über 120 Mio. t CO₂ im Vergleich zu konventionellen Antrieben. Zwar lässt sich nur ein geringer Anteil der Hybridfahrzeuge von Toyota über einen Stromanschluss laden, doch war der Prius das erste in Massenproduktion gefertigte Auto, das Teilstrecken rein elektrisch zurücklegen konnte und somit den Erstkontakt mit elektrischen Automobilen für die Breite der Bevölkerung darstellte. Das Modell gilt heute daher als ein Wegbereiter der Elektromobilität.^{66,67,68}

In den 2000er-Jahren versuchten vor allem unabhängige Unternehmen, eine Verbreitung von Elektroautos zu erreichen. Spätestens 2006 setzte die Tesla Inc. mit der Präsentation des „Tesla Roadster“ neue Maßstäbe: ein Sportwagen, der mit konventionellen Modellen konkurrieren konnte. Das innovative Batteriesystem mit Lithium-Ionen-Batterie bildete die Basis für den bis heute anhaltenden Erfolg des Unternehmens und verlieh der gesamten Branche einen bedeutenden Impuls. Die Applikation von Lithium-Ionen-Batterien stellt aus heutiger Sicht einen technischen Meilenstein in der Geschichte der Elektroautos dar. Der Grund für die Leistungsfähigkeit und damit auch für den Erfolg der Fahrzeuge liegt neben der kürzeren Ladezeit in der Leistungsdichte der Lithium-Ionen-Batterien begründet: Sie entspricht dem Faktor fünf der Energiedichte der Bleibatterie, mit der die ersten Elektroautos ausgestattet worden waren. Tesla gelang es, die Anzahl der Verkäufe innerhalb von sieben Jahren um mehr als den Faktor 100 zu steigern, von 3100 Verkäufen im Jahr 2012 auf 367.000 im Jahr 2019. Zwei Jahre später betrug die Reichweite des Spitzenmodells 628 km und steht konventionellen Fahrzeugmodellen damit kaum mehr nach. Tesla zählt überdies zu den Erfindern des autonomen Fahrens. Letztlich war es also Innovationskraft, die die Elektromobilität in den 2000er-Jahren aus der Nische in den Massenmarkt beförderte.^{69,70}

Inzwischen haben sämtliche Automobilhersteller ihr Portfolio um Serienmodelle mit batterieelektrischem Antrieb ergänzt. Die Ursachen liegen in einer Mischung aus verschärfte Umweltgesetzgebung und öffentlichen Subventionen sowie sinkenden Preisen – insbesondere für Batterien bei gleichzeitig höherer Leistungsfähigkeit, was bedeutet: mehr Geschwindigkeit und größere Reichweite bei zunehmend konkurrenzfähigen Preisen.⁷¹

Entsprechend stieg die Zahl elektrifizierter Fahrzeuge mit Stromanschluss, also der rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuge (BEV) und der Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV), seit 2012 weltweit beträchtlich an. 2013 fuhren global gezählt rund 431.000 Elektro- und Hybridautos auf den Straßen. Bis 2015 erhöhte sich der Gesamtbestand bereits auf etwa 1,4 Mio.. Diese Dynamik setzte sich fort, sodass 2020 knapp elf Millionen Fahrzeuge zum weltweiten Bestand zählten. Die jährliche Entwicklung ist in Abb. 1.1

⁶⁶Vgl. Rammler und Weider 2011.

⁶⁷Vgl. Toyota Deutschland GmbH 2021.

⁶⁸Vgl. ecomento.de 2020.

⁶⁹Vgl. Statista 2021.

⁷⁰Vgl. Tesla 2021.

⁷¹Vgl. Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC) 2021.

Jährliche Bestandszahl von E-Autos (BEV & PHEV) weltweit in Millionen

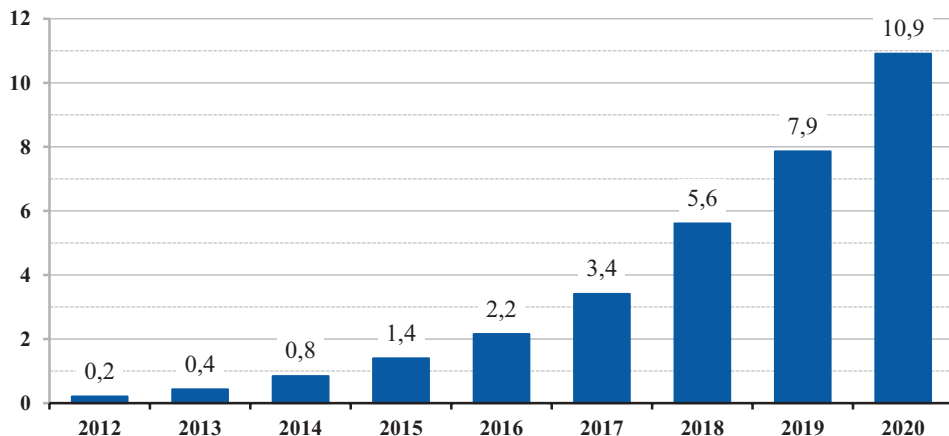


Abb. 1.1 Weltweite Entwicklung der Anzahl von Elektroautos (2012 bis 2020). (Vgl. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) 2021)

dargestellt. Das beinahe exponentielle Wachstum der jüngeren Vergangenheit zeigt: Die Elektromobilität boomt seit Beginn der 2020er-Jahre, und gleichzeitig steigt der Marktanteil in Massen Anwendungen stetig.^{72,73,74}

Bei der Verbreitung der Elektromobilität gibt es regional deutliche Unterschiede. Abb. 1.1 stellt die Marktdurchdringung von Elektroautos weltweit im Jahr 2020 anhand des Anteils von Fahrzeugen mit Stromanschluss (BEV und PHEV) an den registrierten Neuzulassungen dar. Norwegen ist dabei seit langer Zeit Spitzenreiter. Der Anteil betrug dort etwa drei von vier (74,8 %) – weltweit lag er lediglich bei knapp eins von 20 (4,6 %). Die Staaten Island, Schweden, Niederlande und Finnland folgen auf Norwegen, wenn auch mit teilweise deutlichem Abstand. Der Erfolg in diesen Ländern resultiert aus einem umfassenden öffentlichen Anreizsystem, das Steuer-, Maut- und Energiekostensubventionen miteinander kombiniert.

In Deutschland betrug der Anteil 13,5 % – gleichbedeutend mit dem weltweit achten Platz. Der Anteil ist zwar im Vergleich zu den Spitzenreitern deutlich niedriger, allerdings wächst er rasant. Bereits im Jahr 2021 (Stand: November) verzeichnete das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 25 % der Neuzulassungen von Elektroautos – eine Steigerung um 85 % im Vergleich zum Vorjahr.⁷⁵

⁷²Vgl. Irle 2021.

⁷³Vgl. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) 2021.

⁷⁴Vgl. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) 2021.

⁷⁵Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) und Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2021.

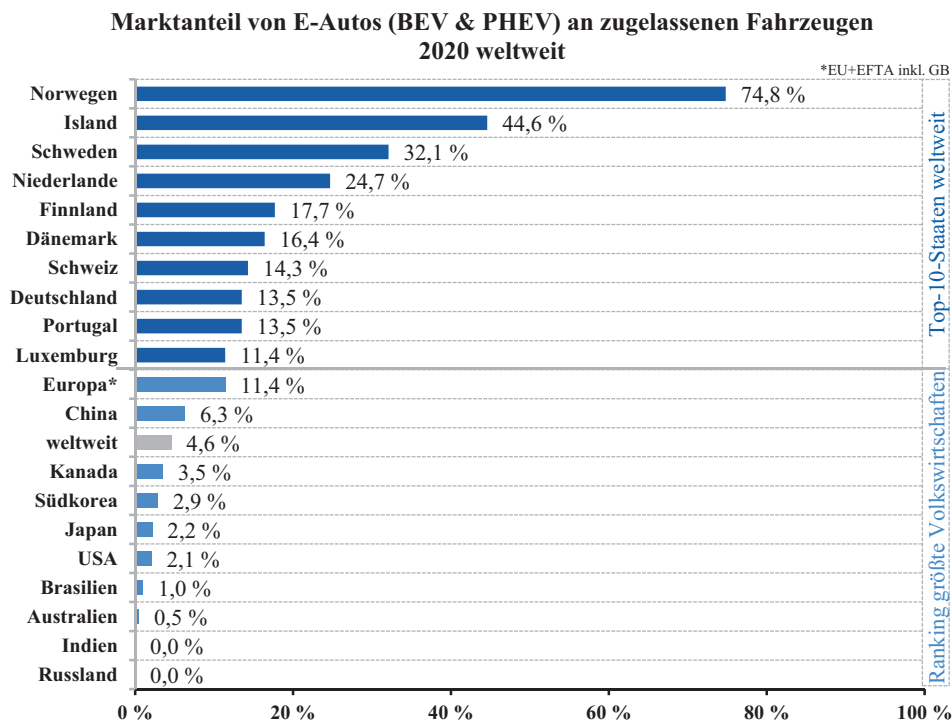


Abb. 1.2 Marktdurchdringung von Elektroautos weltweit im Jahr 2020. (Vgl. Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) 2021; International Trade Administration | [Trade.gov](https://www.trade.gov) 2021; Employment and Social Development Canada (ESDC) 2021; ABTRA – Associação Brasileira de Terminais e Recintos Alfandegados 2021; Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) und Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2021)

Interessant ist, dass die Top-10-Staaten allesamt im europäischen Wirtschaftsraum liegen. Dadurch betrug der gemittelte Anteil jener Zone 11,4 %. Dieses Ergebnis ist im direkten Vergleich mit den größten Volkswirtschaften der Welt führend. Der Anteil auf dem chinesischen Markt war mit 6,3 % nur etwa halb so groß und derjenige auf dem US-Markt mit 2,2 % noch weiter abgeschlagen. Die Ausbreitung der Elektromobilität in Europa wuchs 2020 im internationalen Vergleich folglich am stärksten. Die vergleichsweise geringsten Anteile mit einem oder weniger als einem Prozent waren in Brasilien, Australien, Indien und Russland zu finden. Die globale Ausbreitung der Elektromobilität divergierte 2020 somit zwischen null und 74,8 % signifikant (Abb. 1.2).

Auch die Emissionen der Elektromobilität und damit Ökologie-Aspekte unterscheiden sich aufgrund der Differenzen im Energiemix je nach Region. Während in Norwegen die regenerative Energie in Form von Wasserkraft bereits seit 2008 einen Anteil von 98 % am Energiemix hält, betrug der Anteil in Deutschland im ersten Halbjahr 2021 nur rund 47 % – Tendenz: steigend. So wundert es nicht, dass Norwegen auf dem Weg zur Klimaneutralität massiv auf Elektromobilität setzt und bereits für das Jahr 2025 ausschließlich

Neuzulassungen von lokal emissionsfreien Fahrzeugen anstrebt – ein Ziel, das die EU für das Jahr 2035 vorsieht.^{76,77,78,79}

Die Treiber der Elektromobilität waren in den 2010er-Jahren vor allem Anbieter von Carsharing und Logistikdienstleister,⁸⁰ die einen wichtigen Beitrag dazu erbrachten, die Technologie einem breiteren Publikum nahezubringen. Als ein Vorreiter profiliert sich unter anderem die Deutsche Post DHL Group. Sie setzt auf dem „Weg zurück in die Zukunft“ systematisch auf lokal emissionsfreie Fahrzeuge. Mangels eigener elektrischer Kleintransporter wurde das Unternehmen im Jahr 2014 durch den Kauf der StreetScooter GmbH vorübergehend selbst zum Produzenten von Elektroautos. Die StreetScooter-Flotte ist die mit Abstand größte in Europa und soll bis Ende 2022 auf insgesamt 21.500 Fahrzeuge erweitert werden. In der darauffolgenden Stufe soll sie bis zum Jahr 2030 zusammengekommen 80.000 elektrische Transporter umfassen und damit 60 % der Fahrzeuge für den Verteilerverkehr ausmachen. Einen wichtigen Bestandteil der klimaneutralen Zustellung der Deutschen Post bilden mit Stand vom April 2021^{81, 82} außerdem rund 8000 E-Bikes und 9000 E-Trikes.

Davon abgesehen, feiern E-Bikes in sämtlichen Varianten generell beachtliche globale Erfolge. Während sich in Deutschland 2016 etwas mehr als 600.000 Käufer für ein elektrifiziertes Fahrrad entschieden, waren es 2020 schon knapp zwei Millionen. Das bedeutete einen Anteil von 39 % am gesamten Fahrradmarkt. Auch in diesem Bereich ist ein fast exponentielles Wachstum zu beobachten (vgl. Abb. 1.3).

Dieser Erfolg ist auch im Kontext der Mobilitätswende von zentraler Bedeutung: Er belegt, dass die Technologie der Elektromobilität den Markt mit hoher Geschwindigkeit durchdringt, wenn die Verbraucher durch den Erwerb eines entsprechenden Produkts einen innovativen Nutzwert erhalten, wie es bei elektrischen Fahrrädern aufgrund des motorischen Antriebs der Fall ist. Dies ist beim Elektroauto gegenüber Autos mit Verbrennungsmotor offensichtlich nicht so – ein Grund dafür, dass die Bundesregierung den Verkauf von elektrischen Fahrzeugen seit Mai 2016 finanziell fördert (mehr zu dieser Maßnahme und Einblicke in weitere politische Instrumente zeigt Abschn. 3.3). Auch an dieser Stelle ist ein Wachstum zu verzeichnen: Anfangs betrug die Kaufprämie 2000 € für batterieelektrische Fahrzeuge, seit Juni 2020 waren es bereits 6000 €. Bei einem Fördervolumen von 2,09 Mrd. € ermöglicht das eine Kaufprämie für etwa 350.000 Fahrzeuge. Die Entwicklung der Zulassungszahlen von batterieelektrischen Fahrzeugen in Deutschland bestätigt die Wirksamkeit dieser und weiterer absatzfördernder Maßnahmen. Abb. 1.4 zeigt das annähernd exponentielle Wachstum der neuzugelassenen batterieelek-

⁷⁶ Vgl. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE 2021.

⁷⁷ Vgl. AHK Norwegen I Netzwerk für bilateralen Erfolg 2021.

⁷⁸ Vgl. tagesschau 2019.

⁷⁹ Vgl. tagesschau 2021.

⁸⁰ Vgl. Deffner et al. 2012.

⁸¹ Vgl. Deutsche Post DHL Group 2021.

⁸² Vgl. ecomento.de 2021.

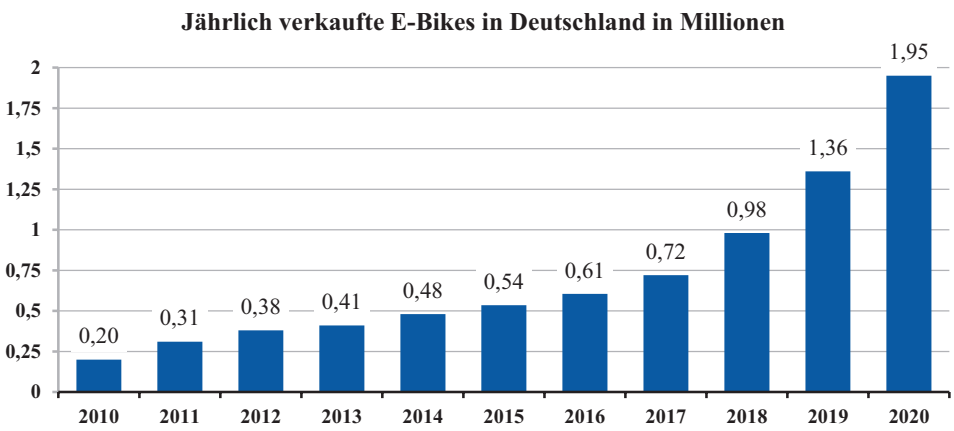


Abb. 1.3 Verkäufe von E-Bikes in Deutschland von 2010 bis 2020. (Vgl. Zweirad-Industrie-Verband (ZIV) [2021](#))

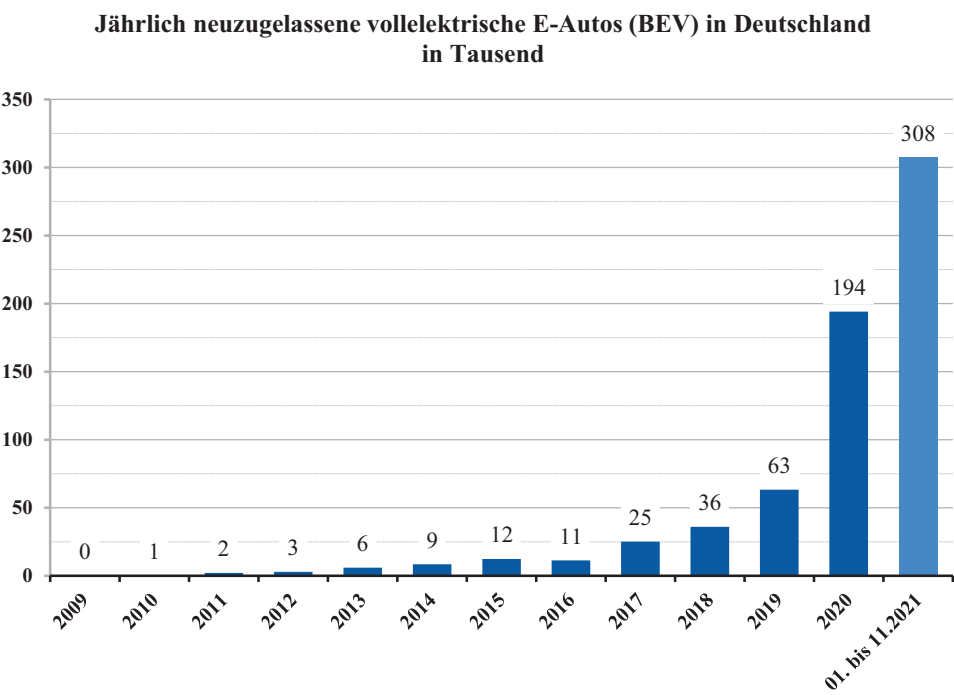


Abb. 1.4 Neuzulassungen von Elektroautos (BEV) in Deutschland von 2009 bis 11/2021. (Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) [2021](#))

trischen Fahrzeuge in Deutschland von 2009 bis November 2021. Im Jahr 2009 wurden noch weniger als 100 solcher Fahrzeuge zugelassen. Sechs Jahre später waren es immer noch kaum mehr als 11.000 Neuzulassungen. Im Jahr 2017 jedoch lag die Zahl jedoch bereits mehr als doppelt so hoch wie im vorherigen Jahr. 2017 wurde somit zum Startpunkt für eine hohe Wachstumsgeschwindigkeit, die sich in den folgenden Jahren fortsetzte. 2020 waren es knapp 200.000 Zulassungen – fast 20-mal so viele wie noch 2016. Die Wachstumsgeschwindigkeit blieb trotz Lieferengpässen und weiterer Komplikationen durch die Corona-Pandemie auch 2021 auf einem hohen Niveau. Mit Stand vom November 2021 erreichten die Neuzulassungen bereits ein Wachstum von rund 60 % gegenüber dem Vorjahr.⁸³

Offensichtlich gehört das Verbrenner-Paradigma also mit dem Beginn des dritten Jahrzehnts der 2000er-Jahre der Vergangenheit an. Die Elektromobilität wächst auf allen Märkten und lässt neue Mobilitätskonzepte entstehen – beispielsweise E-Scooter. Nicht zuletzt die rasante Digitalisierung von Technik, Wirtschaft und Gesellschaft eröffnet völlig neue, disruptive Potenziale der Mobilität. Angesichts der globalen Erderwärmung ist diese Entwicklung relevanter als jemals zuvor, denn noch immer trägt der Verkehr mit einem Anteil von rund 20 % maßgeblich zu den weltweiten CO₂-Emissionen bei.⁸⁴

1.5 Vom Zukunftskonzept zum Paradigma

Die historische Analyse zeigt, dass die technischen Grundlagen der Formen von Elektromobilität – abgesehen von der Luftfahrt – schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts bekannt waren und erprobt wurden. Das Scheitern als Massentechnologie beruhte auf einer Kombination aus technischen, sozioökonomischen und psychologischen Faktoren. Sie führten seit den 1920er-Jahren zu einem globalen Verbrenner-Paradigma, das bis in die 2000er-Jahre hinein Bestand hatte. Elektromobilität verkam in dieser Zeit zum Nischen- beziehungsweise Zukunftskonzept. Der Schienenverkehr bildet indes eine Ausnahme, bei dem sich der elektrische Antrieb ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts als führende Technologie durchsetzte.

Seit dem Ende der 1960er-Jahre verschoben sich die Rahmenbedingungen leicht zugunsten der Elektromobilität, da ökologische Aspekte zwischenzeitlich immer wieder Debatten über die Form der Mobilität anregten. Der System-Lock-in-Effekt verhinderte in Verbindung mit einer statischen Gesetzeslage jedoch den Durchbruch der Technologie. Lediglich in akuten Krisensituationen gab es Veränderungsansätze, die das Verbrenner-Paradigma grundlegend hinterfragten, dann allerdings gestoppt wurden, wie beispielsweise das „Low Emission Program“ durch Klagen von Industrie und Handel.

Das Zusammenspiel aus technischen Innovationen, unternehmerischen Innovatoren und den sich aufgrund des anthropogenen Klimawandels entschlosseneren politischen Be-

⁸³ Vgl. Bundesregierung 2021.

⁸⁴ Vgl. Bundesregierung 2021.

strebungen nach Emissionsreduktion ebnete der Elektromobilität seit den 2000er-Jahren schließlich den Weg aus der Nische in den Massenmarkt. Daraus entstand einerseits ein quasi-exponentielles Wachstum der Elektromobilität in Form von E-Autos, E-Bikes und E-Scootern, andererseits wird der Fahrzeugmarkt spätestens Anfang der 2020er-Jahre stärker reguliert. Politisch wurden und werden Verbote von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor in weiten Teilen der Erde in Aussicht gestellt (siehe Abschn. 3.3). So fordert beispielsweise die EU-Kommission im Rahmen des Klimaprogramms „Fit for 55“ die ausschließliche Zulassung von lokal emissionsfreien Fahrzeugen ab dem Jahr 2035 – was im Umkehrschluss das Verbot von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ausgenommen E-Fuels und Biokraftstoffe) bedeutet. Mit Stand von September 2021 müssen die EU-Länder und das EU-Parlament dem Vorschlag noch zustimmen.^{85,86}

Die Automobilindustrie hat die klimapolitischen Maßnahmen in den 2020er-Jahren – anders als zuvor in der Geschichte – nicht abgelehnt, sondern durch Strategien für die Elektrifizierung der Produktportfolios angenommen. Die Übersicht der bis 2035 geplanten Bestrebungen zur Elektrifizierung der Produktportfolios (BEV & FCEV), gelistet nach Automobilherstellern, ist in Abb. 1.5 dargestellt.⁸⁷ Gelistet sind konkrete Ziele für vollständige oder teilweise lokal emissionsfreie Portfolios für rein batterieelektrische (BEV) und auf der Brennstoffzelle (FC) basierende Fahrzeuge mit Stand von September 2021. Dort nicht aufgeführte Hersteller hatten zu diesem Zeitpunkt entweder keine entsprechenden Ziele veröffentlicht oder übernehmen auch Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) in die angestrebten Elektrifizierungsziele. PHEV wurden hier bewusst nicht aufgenommen, da sie nicht als lokal emissionsfrei gelten können und insofern die Vergleichbarkeit der Pläne verhindern. Außerdem ist zu beachten, dass die Elektrifizierung von Automobilen aufgrund der gesetzlich reglementierten Emissionsreduktion für alle Hersteller erforderlich ist.

Die Breite der Bestrebungen im Marktumfeld verdeutlicht: Die Elektromobilität wartet nicht mehr auf den Durchbruch, sondern sie ist inzwischen selbst zum Paradigma geworden. So wird dem Verbrennungsmotor für das Jahr 2030 in Europa nur noch ein Anteil von rund 40 % prognostiziert – und damit auch der Technologie, die die Mobilität der Menschheit mehr als 100 Jahre lang geprägt hat.⁸⁸

Das neue Paradigma der Elektromobilität unterscheidet sich allerdings in der Tiefe vom Verbrenner-Paradigma, das sich in erster Linie auf die Antriebstechnik als solche beschränkte. Die Elektromobilität zeichnet sich in der aktuellen Zielvorstellung vor allem durch die angestrebte Entkopplung von fossiler Energie und Verkehrsleistung aus und geht damit weit über das Produkt des Elektroautos hinaus. Dafür ist eine strukturelle Neudefinition der Mobilität notwendig. Gefragt sind sämtliche Verkehrsformen komplementär integrierender Lösungen, verbunden mit einer kollektiv-individuellen

⁸⁵ Vgl. European Automobile Clubs 2021; Vgl. Europäische Kommission 2021.

⁸⁶ Vgl. tagesschau 2021.

⁸⁷ Vgl. Rammler und Weider 2011.

⁸⁸ Vgl. Kampker et al. 2021.

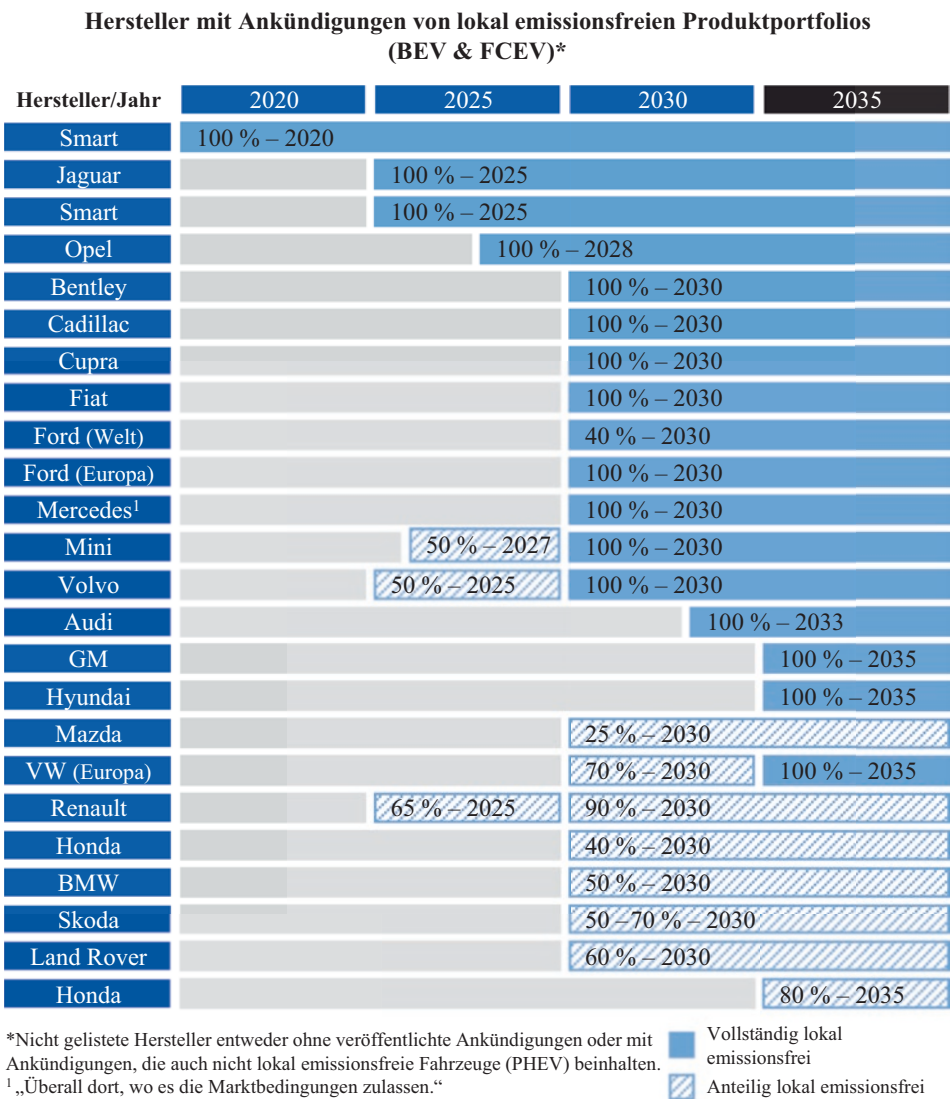


Abb. 1.5 Zielsetzungen der Hersteller von ursprünglich konventionell angetriebenen Automobilen für lokal emissionsfreie Produktportfolios bis 2035 (Stand: September 2021). (Vgl. Kölner 2021b; Fasse et al. 2021)

Bedarfoptimierung. Ein wichtiges Element dabei ist die Digitalisierung, die durch die Steuerung des Verkehrs und des Zusammenspiels von Energiebedarf und Energieerzeugung einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann, der den Anteil der einzelnen elektrifizierten Fahrzeuge weitaus übersteigt. Letztlich bedeutet das: Die aktuelle Marktdurchdringung elektrischer Fahrzeuge ist lediglich ein Zwischenziel auf dem Weg zur dekarbonisierten Mobilität.

Literatur

Teil I: Einführung in die Elektromobilität

- Abt, D.** *Die Erklärung der Technikgenese des Elektroautomobils* (Europäische Hochschulschriften Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft, 2295). Frankfurt am Main, Berlin: Lang, 1998. Zugl.: Frankfurt (Main), Univ., Diss., 1997
- ABTRA – Associação Brasileira de Terminais e Recintos Alfandegados** **ABTRA – Associação Brasileira de Terminais e Recintos Alfandegados 2021: Brazilian Automotive Industry Yearbook. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2021.** In: ABTRA – Associação Brasileira de Terminais e Recintos Alfandegados, 12.05.2021
- Adams, W. P.** *Die USA im 20. Jahrhundert* (Oldenbourg Grundriss der Geschichte, Band 29). 2. Auflage Aufl. Munich, Germany: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2012
- AHK Norwegen I Netzwerk für bilateralen Erfolg Erneuerbare Energien I Fokus I AHK Norwegen.** <https://norwegen.ahk.de/kernbereiche/erneuerbare-energien>. Abruf 16.07.2021
- Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC)** *Elektroauto kaufen: Übersicht aktueller E-Autos* | ADAC. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/kaufen/elektroautos-uebersicht/>. Abruf 16.07.2021
- Anderl, V.** *Hercules Electra – Die Ur-Mutter aller E-Bikes* | 2Rad Anderl | E-Bike- und Fahrrad-Fachmann im Ruhrgebiet. <https://www.zweirad-anderl.de/sortiment/hercules-electra%2D%2D-die-ur-mutter-aller-e-bikes.html>. Abruf 16.07.2021
- Andersen, A.**: *Der Traum vom guten Leben. Alltags- und Konsumgeschichte vom Wirtschaftswunder bis heute.* 1. Aufl. Aufl. Frankfurt/Main, New York: Campus-Verl., 1997
- Banham, R.**: *The Ford century. Ford Motor Company and the innovations that shaped the world.* 1. ed. Aufl. New York, NY: Artisan, 2002
- Barthel, M; Lingnau, G.**: *100 Jahre Daimler-Benz.* Mainz: v. Hase u. Koehler, 1986
- Bonin, H. (Hrsg.)**: *Ford, 1903–2003. The European history.* Collection Ecoclio, Paris: P.L.A.G.E, 2003
- Bundesregierung:** *Kaufprämie für Elektroautos erhöht.* <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/kaufpraemie-fuer-elektroautos-erhoeht-369482>. Abruf 16.07.2021
- Bundesregierung:** *Mehr E-Mobilität.* <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/verkehr-1672896>. Abruf 16.07.2021
- Canzler, W; Knie, A.**: *Das Ende des Automobils. Fakten und Trends zum Umbau der Autogesellschaft* (Umwelt aktuell). 1. Aufl. Aufl. Heidelberg: Müller, 1994
- Deffner, J; Birzle-Harder, B; Hefter, T; Götz, K.**: *Elektrofahrzeuge in betrieblichen Fahrzeugflotten – Akzeptanz, Attraktivität und Nutzungsverhalten. Ergebnisbericht im Rahmen des Projekts Future Fleet,* 2012
- Deutsche Post DHL Group:** 06. Jul. 21: *DHL Express elektrifiziert Zustellung in Berlin.* <https://www.dpdhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2021/dhl-express-elektrifiziert-zustellung-in-berlin.html>. Abruf 16.07.2021
- Dienel, H.-L; Trischler, H.**: *Geschichte der Zukunft des Verkehrs. Verkehrskonzepte von der frühen Neuzeit bis zum 21. Jahrhundert* (Beiträge zur historischen Verkehrsforschung, 1). Frankfurt/Main: Campus-Verl., 1997
- ecomento.de:** *Toyota: Weltweit 15+ Millionen Hybridfahrzeuge verkauft.* In: ecomento, 27.04.2020
- ecomento.de:** *Deutsche Post DHL plant 37.000 E-Transporter bis 2025, neue StreetScooter-Version.* In: ecomento, 23.04.2021
- Employment and Social Development Canada (ESDC):** *The Daily – Zero-emission vehicle registrations down slightly in 2020.* <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/210422/dq210422e-eng.htm>. Abruf 08.12.2021

- Europäische Kommission:** *Umsetzung des europäischen Grünen Deals*. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_de. Abruf 08.09.2021
- European Automobile Clubs:** *Green Deal: Sustainable batteries*. <https://www.eaclubs.org/post/green-deal-sustainable-batteries>. Abruf 27.05.2021
- Fasse, M; Tyborski, R; Menzel, S.:** *Audi, VW, BMW: Welche Hersteller ab wann auf Verbrenner verzichten*. In: Handelsblatt, 08.07.2021
- Fersen, O. von (Hrsg.):** *Opel. Räder für die Welt*. Automobile Quarterly Publications. 3., erw. Aufl. Aufl., Stuttgart: Princeton Inst. for Histor. Research, 1986
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE:** *Anteil erneuerbarer Energien|Energy-Charts*. https://energy-charts.info/charts/renewable_share/chart.htm?l=de&c=DE. Abruf 16.07.2021
- Georgano, N. (Hrsg.):** *The Beaulieu encyclopedia of the automobile*, Chicago, Ill.: Fitzroy Dearborn, 2000
- Georgano, N; Wright, N.:** *100 Jahre amerikanische Automobile*. 1. Aufl. Aufl. Stuttgart: Motorbuch-Verl., 1993
- International Trade Administration|Trade.gov:** *Japan Transition to Electric Vehicles*. <https://www.trade.gov/market-intelligence/japan-transition-electric-vehicles>. Abruf 08.12.2021
- Irle, R.:** *EV-Volumes – The Electric Vehicle World Sales Database*. <https://www.ev-volumes.com/>. Abruf 08.12.2021
- Kampker, A; Offermanns, C; Heimes, H; Bi, P.:** *Metaanalyse zur Marktentwicklung elektrifizierter Fahrzeuge*. In: ATZ Automobiltech Z, Jg. 123, 2021, Nr. 7–8Nr., S. 60–64
- Kirsch, D. A.:** *The electric vehicle and the burden of history*. New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 2000
- Köllner, C.:** *Verbrenner-Ausstieg: Die Pläne der Autohersteller*. In: springerprofessional.de, 13.07.2021b
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Jahresbilanzen 2009 bis 2021*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/fz_b_jahresbilanz_node.html. Abruf 08.12.2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA); Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Monatliche Neuzulassungen – Neuzulassungsbarometer im November 2021*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2021/202111_Glmonatlich/202111_nzbarometer/202111_n_barometer.html?nn=3504038&fromStatistic=3504038&yearFilter=2021&monthFilter=11_November&fromStatistic=3536106&yearFilter=2021&monthFilter=11_November. Abruf 08.12.2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA); Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Statistik – Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Segmenten und Modellreihen 2011*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz11/fz11_gentab.html. Abruf 08.12.2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA); Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Jahresbilanz 2020*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Jahresbilanz_Neuzulassungen/jahresbilanz_node.html. Abruf 08.12.2021
- Lewandowski, J.:** *Das Jahrhundert des Automobils*. München: Südwest, 1987
- Manz, V. C.:** *ZF E-Fahrzeug Historie – ZF*. In: ZF, 29.05.2019
- Mom, G.:** *The Electric Vehicle. Technology and Expectations in the Automobile Age*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2004
- Möser, K.:** *Geschichte des Autos*. Frankfurt/Main: Campus-Verl., 2002
- Norton, N.:** *100 Jahre Automobile. Autos, Rennen, Rekorde*. Hannover: Weichert, 1985
- Petzold, M.:** *Oldtimer aus der Zukunft*, 16.09.2011
- Rammler, S; Weider, M.:** *Das Elektroauto. Bilder für eine zukünftige Mobilität (Mobilität und Gesellschaft, 5)*. Berlin: Lit, 2011

- Rao, H.:** *Market rebels. How activists make or break radical innovations.* Princeton: Princeton University Press, 2009
- Ropohl, G.:** *Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der allgemeinen Technologie.* München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1979
- Schiedt, H.-U.:** *Verkehrsgeschichte. Histoire des transports* (Schweizerische Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialgeschichte, 25). Zürich: Chronos Verl., 2010
- Seherr-Thoss, H. C. G. von:** *Die deutsche Automobilindustrie. Eine Dokumentation von 1886 bis 1979.* (2., korrigierte u. erw. Aufl.) Aufl. (Stuttgart:) DVA, (1979)
- Statista:** *Tesla – Verkaufszahlen bis 2020*|Statista. Abruf 16.07.2021
- tagesschau:** *Ende des Verbrennungsmotors: Norwegen gibt das Tempo vor.* In: tagesschau.de, 09.04.2019
- tagesschau:** „Fit for 55“-Paket: Wie die EU-Klimaziele erreicht werden sollen. In: tagesschau.de, 14.07.2021
- tagesschau:** *Klimapaket der Kommission: EU fordert Aus für neue Verbrenner bis 2035.* In: tagesschau.de, 14.07.2021
- Tesla:** *Model S.* https://www.tesla.com/de_de/models. Abruf 16.07.2021
- Toyota Deutschland GmbH:** *Toyota verkauft 2018 weltweit 10,59 Millionen Fahrzeuge – Toyota Deutschland Media-Website.* <https://www.toyota-media.de/blog/unternehmen/artikel/toyota-verkauft-2018-weltweit-1059-millionen-fahrzeuge/text>. Abruf 16.07.2021
- Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA):** *Erstes globales E-Mobility-Ranking*|VDA. <https://www.vda.de/vda/de/presse/Pressemeldungen/210423-Erstes-globales-E-Mobility-Ranking>. Abruf 08.12.2021
- Wehler, H.-U.:** *Bundesrepublik und DDR 1949–1990* (Deutsche Gesellschaftsgeschichte, /Wehler, Hans-Ulrich; 5). broschiierte Studienausgabe Aufl. München: Beck, 2008
- Weiher, S. von; Goetzeler, H.:** *Weg und Wirken der Siemens-Werke im Fortschritt der Elektrotechnik, 1847–1980. Ein Beitrag zur Geschichte der Elektroindustrie.* 3. Aufl. Aufl. Berlin: Siemens AG, 1981
- Wittler, M.:** *Schönes Ding: Hotzenblitz: Schwarzwälder Pirschsorte.* In: DER SPIEGEL, 25.10.2020
- Zapf, H.:** *Thomas S. Kuhn: The Structure of Scientific Revolutions, University of Chicago Press: Chicago 1962, 172 S. (dt. Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, Suhrkamp: Frankfurt 1967, 226 S.).* In: Salzborn, S. (Hrsg.): *Klassiker der Sozialwissenschaften: 100 Schlüsselwerke im Portrait* 2. Auflage Aufl. Wiesbaden: Springer VS, 2016, S. 221–224
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW):** *Elektroautos: Bestand steigt weltweit auf 10,9 Millionen,* 09.03.2021
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW):** *Zahl der Elektroautos steigt weltweit von 3,4 auf 5,6 Millionen.* <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/zahl-der-elektroautos-steigt-weltweit-von-34-auf-56-millionen.html>. Abruf 08.12.2021
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW):** *Zahl der Elektroautos steigt weltweit von 5,6 auf 7,9 Millionen.* <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/zahl-der-elektroautos-steigt-weltweit-von-56-auf-79-millionen.html>. Abruf 08.12.2021
- Zweirad-Industrie-Verband (ZIV):** *Zahlen – Daten – Fakten zum Deutschen Fahrrad- und E-Bike-Markt 2020.* <https://www.ziv-zweirad.de/presse-medien/pressemitteilungen/detail/article/zahlen-daten-fakten-zum-deutschen-fahrrad-und-e-bike-markt-2020/>. Abruf 08.12.2021

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

