

Kapitel 1 – Die Tesla Energie-Revolution

»Wir wollen, dass Volkswagen bis 2025 das in der Welt führende Unternehmen der Elektromobilität wird – und wir werden dieses Ziel erreichen ... Die Transformation unserer Industrie ist nicht aufzuhalten.«

Matthias Müller, 2017, Vorstandsvorsitzender von Volkswagen

»Wasserstoff herzustellen, zu speichern und in einem Auto zu nutzen ist sehr schwer. Wenn man ihn aus Wasser mithilfe von Strom erhält, ist das äußerst ineffizient. Es ist ungefähr halb so effizient wie Strom direkt zu verwenden. Es ist schrecklich. Die im Idealfall herstellbare Wasserstoff-Brennstoffzelle gewinnt nicht gegen die derzeit verwendete Batterie.«

Elon Musk, 2015, Vorstandsvorsitzender von Tesla

»All die Genies hier bei General Motors haben immer gesagt, dass die Lithium-Ionen-Technologie erst in zehn Jahren kommt, und Toyota war unserer Meinung – und bumm, da kommt Tesla. Deshalb sagte ich: Wie ist es möglich, dass ein winziges kalifornisches Start-up, das von Leuten geführt wird, die nichts vom Autogeschäft verstehen, das schaffen kann und wir nicht?«

Robert Lutz, 2007, ehemaliger Vizepräsident von General Motors, sagt, dass Tesla ihn inspirierte, GM dazu zu bringen, das Elektroauto Chevrolet Volt Plug-in zu entwickeln.

Einführung

In unserer Welt dreht sich alles um Energie. Billiger Strom, Transport und Wärme sind inzwischen das wahre Rückgrat unserer Wirtschaft. Billigen Strom brauchen wir 24 Stunden am Tag, sieben Tage die Woche. Die Gesellschaft bricht fast zusammen, wenn der Strom ausfällt. Kein Fernsehen, kein Internet, keine Klimaanlage – und in ein paar Stunden spielen die meisten Menschen verrückt. Fabriken, in denen unsere Waren produziert werden, kommen zum Stillstand. Als 2005 nach dem Hurricane Katrina in New Orleans das Netz zusammenbrach, wurden innerhalb von 24 Stunden sogar Polizisten beobachtet, die Läden plünderten.

Wir vertrauen heutzutage auf schnellstmöglichen Transport in die entlegensten Orte der Welt – nicht nur für uns, sondern auch für die Sachen, die wir in unserer Just-in-time-Wirtschaft verbrauchen. Als 2016 auf Island ein Vulkan ausbrach, steckten Millionen Flugpassagiere in ganz Europa tagelang fest. Und als 2008 Bauern aus Protest gegen hohe Benzinpreise in Frankreich wichtige Autobahnen blockierten, waren innerhalb weniger Tage die Lebensmittelregale in den Supermärkten leer.

Die ständige Verfügbarkeit von billigem Strom, Transport und Wärme aus fossilen Brennstoffen wird in Ländern mit hohem Einkommen für selbstverständlich gehalten. Große Versorgungsketten stellen aus billigem Erdöl, Erdgas oder Kohle billige Energie rund um die Uhr sicher. Die Energiewende, die aus dieser Welt der fossilen Brennstoffenergie ein voll erneuerbares schadstoffarmes System machen soll, ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit.

1. Hat Tesla dafür gezahlt, um im Titel dieses Buches genannt zu werden?

Wir haben keine Geschäftsbeziehungen zu Tesla, aber wir haben beschlossen, den Namen für den Titel unseres Buches zu verwenden, da die globale Transformation am besten von Tesla verkörpert wird, einem Unternehmen, das 2007 als kleiner Hersteller von Elektroautos begonnen hat und sich nur zehn Jahre später zu einem Unternehmen der integrierten erneuerbaren Elektrizität und Mobilität entwickelt hat. In unserem ersten Buch über Energie im Jahr 2008 beschrieben wir Tesla als Nischenanbieter, der mit dem Roadster-Sportwagen gerade sein erstes Fahrzeug auf den Markt gebracht hatte.

Teslas Mission, den weltweiten Übergang auf erneuerbare Energien zu beschleunigen, steht im Zentrum einer Energierevolution. In den Worten von Musk: »Da wir in eine Zukunft der erneuerbaren Energie kommen müssen, ist es besser, dorthin so schnell wie möglich zu kommen.«^[1] Tesla kann als eines der wenigen Unternehmen angesehen werden, die heute im Mittelpunkt dieser Revolution stehen, so wie vermutlich auch der intelligente junge Ingenieur Nikola Tesla zu seiner Zeit vor circa 120 Jahren. Zunächst wollen wir uns anschauen, worum es bei den einzelnen Phasen dieser Revolution geht:

- **Phase 1:** Die Welt erlebt das erste große Wachstum bei der Erzeugung sauberer Energie wie zum Beispiel Wind- und Sonnenenergie (2000-2020).
- **Phase 2:** Das Wachstum des Energiebedarfs der Welt wird jetzt überwiegend aus erneuerbaren Energiequellen und nicht mit fossilen Brennstoffen abgedeckt (2020-2050).
- **Phase 3:** Saubere Energie ist weltweit im Energiemix vorherrschend und übersteigt die Menge der aus Erdgas, Kohle und Erdöl erzeugten Energie (2050-2080).
- **Phase 4:** Der Endpunkt der Transformation des globalen Energiesystems, wenn praktisch die gesamte erzeugte Energie

aus erneuerbaren Quellen kommt, und nur durch Atomstrom ergänzt wird (2080-2100).

Die zweite Phase, in der das Wachstum des Energieangebots hauptsächlich aus sauberen erneuerbaren Quellen statt aus fossilen Brennstoffen stammt, ist ein bahnbrechender Punkt in der Geschichte. Auch wenn die erneuerbare Energie an diesem Punkt immer noch einen relativ kleinen Anteil hat, ist dieser nicht zu unterschätzen, da er das Energiegleichgewicht völlig verändert und zu einer schnelleren Zunahme der bereits kritischen Menge Menschen und Investitionen führt, die sich in die erneuerbaren Energiesysteme bewegen.

Wir erwarten, dass diese Phase in den nächsten zehn Jahren für alle Verwendungsformen von Energie erreicht wird: Verkehr, Heizen und Elektrizität – und bei der Elektrizität und beim Heizen haben wir diesen Punkt möglicherweise schon erreicht. Man könnte sagen, dass wir bereits an einem Wendepunkt stehen. Stellen Sie sich ein Elektrofahrzeug vor, das das Gleiche wie ein herkömmliches Auto kostet, aber geringere Betriebskosten für Fahren und Wartung hat. Oder ein mit Solarenergie betriebenes Stromsystem, das aus Ihrem Haus einen Stromproduzenten macht – zu geringeren Kosten als mit den vorherrschenden fossilen Brennstoffen.

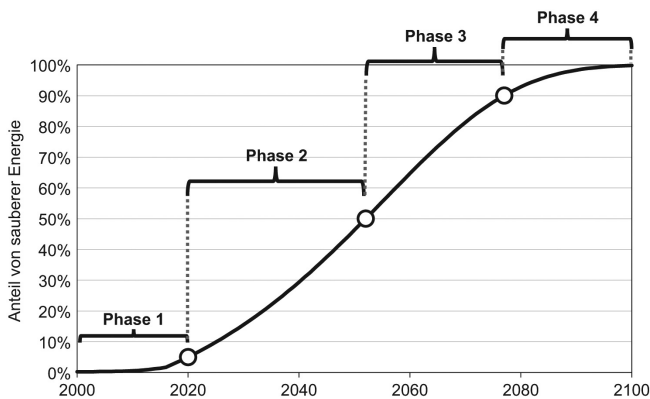


Abbildung 1: Konzeptionelle Darstellung der vier Phasen der Energierevolution.

2. Warum gibt es noch keinen »deutschen« Tesla?

Die Gründung von Tesla Motors im Jahr 2003 und ihr enormer Erfolg ist in vielerlei Hinsicht so einmalig wie die erste Auto-revolution. Der deutsche Ingenieur Karl Benz erfand 1886 in Mannheim¹ das erste Auto mit einem Verbrennungsmotor. Darauf folgte der große Durchbruch des Amerikaners Henry Ford, dessen erste Autofabrik 1903 die Tore öffnete.^{[2], [3]}

Nach der Entdeckung von Spindletop, dem ersten riesigen Ölfeld in Texas im Jahr 1901, schossen zum ersten Mal jeden Tag Millionen Liter Erdöl aus dem Bohrloch.^[4] Doch im Gegensatz zu dem Kinofilm *There Will be Blood* aus dem Jahr 2007 wusste niemand, was mit so großen Mengen Öl anzufangen war, außer der Verwendung für Lampen und dem Betrieb von ein paar schwerfälligen Autos, die damals herumfuhren. Es war Henry Ford in den Vereinigten Staaten, der den Markt genau verstand und mit seinem Können in Bezug auf technische Innovationen zum ersten Mal in der Geschichte die Marke von einer Million verkaufter Autos mit seinem berühmten Model T erreichte. Durch die Erfindung der Massenproduktion war dieses Auto in der Herstellung vier Mal billiger als das Oldsmobile, das Konkurrenzmodell, das ihm am nächsten kam. Es kam ohne Probleme mit den nicht asphaltierten Landstraßen zurecht und war zwei Mal so schnell (65 km/Stunde). Da die meisten Amerikaner in ländlichen Gebieten lebten, war das ein großer Vorteil für die Verkäufe. Die Autoregistrierungen stiegen steil an, von nur 2,3 Prozent der Haushalte mit eigenem Auto im Jahr 1900 auf 90 Prozent im Jahr 1930.^[5] In Deutschland ließ der Anstieg der Autoverkäufe wegen der Wirtschaftskrise nach dem Ersten Weltkrieg zunächst länger auf sich warten. Später war der Appetit der Nationalsozialisten auf Militärfahrzeuge und nicht auf Privatautos unersättlich,

1 Mercedes Benz übernahm 2010 für 50 Millionen US-Dollar einen Anteil von zehn Prozent an Tesla.^[213]

und die Fahrzeugfabriken wurden im Zweiten Weltkrieg bombardiert.^[6]

Die Ära der Massenmotorisierung in Deutschland begann erst so richtig mit dem Erfolg von Volkswagen 1950, der das Ford-Prinzip der Massenproduktion übernahm und so 1961 über eine Million Fahrzeuge des beliebten Käfer und von Transporter Modellen verkaufen konnte, 1970 waren es bereits über zwei Millionen Fahrzeuge.^[7] Der Anteil der Autobesitzer stieg bis 1980 in Westdeutschland von zwölf auf 377 (je 1000 Bewohner) und in Ostdeutschland von vier auf 112 (je 1000 Bewohner).^[8]

Sowohl Ford in den Vereinigten Staaten als auch später Volkswagen in Deutschland hatten die Autoindustrie in nur zehn Jahren auf den Kopf gestellt, und beide Unternehmen führten die Revolution weit über die ursprüngliche Idee hinaus fort. Der Erfolg von Tesla Motors ist, genau wie der von Ford in der Vergangenheit, das Ergebnis eines großen visionären Geistes, der verstand, dass Autos auf eine völlig andere Art entwickelt werden konnten. Robert Lutz, der Vizechef von General Motors, wurde mit den Worten zitiert, dass Tesla ihn im Jahr 2007 inspirierte, GM dazu zu drängen, den ganz mit Strom betriebenen Chevrolet Volt zu entwickeln:

»All die Genies hier bei General Motors haben immer gesagt, dass die Lithium-Ionen-Technologie erst in zehn Jahren kommt, und Toyota war unserer Meinung – und bumm, da kommt Tesla. Deshalb sagte ich: Wie ist es möglich, dass ein winziges kalifornisches Start-up, das von Leuten geführt wird, die nichts vom Autogeschäft verstehen, das schaffen kann und wir nicht?«^{[9], [10]}

General Motors brauchte zehn Jahre, um den Chevrolet Volt auf den US-Markt zu bringen, zusammen mit dem Ampere-E seiner europäischen Schwester Opel. Wie das Tesla Model 3 ist er ein ganz mit Strom betriebenes Auto mit einem Anfangspreis von 35 000 US-Dollar und einer Reichweite von mindestens 250 Kilometern. 2017 beeilten sich alle großen Autohersteller, so

schnell wie möglich ein eigenes Elektroauto für den Massenabsatz auf den Markt zu bringen. Bis zum Jahr 2020 werden mehr als 200 Batterie- oder Plug-in-E-Automodelle am Markt sein – im Vergleich zu circa 50 im Jahr 2017.^[11]

Obwohl Deutschland ein Autoland ist, sind die deutschen Autokonzerne erst spät in dieses Rennen eingestiegen und haben immer noch keinen »Tesla« am Markt. Die erfolgreichsten deutschen Elektroautos sind der BMW i3, der im Jahr 2013 und der Volkswagen e-golf, der 2014 auf den Markt kam. Bis Ende 2017 wurden etwas mehr als 100 000 beziehungsweise 30 000 Stück verkauft. Im Vergleich dazu schaffte es Nissan, 300 000 Exemplare seines batteriebetriebenen Elektroautos Leaf zu verkaufen, ein vergleichbarer Wagen mit Heckklappe.^[12] Der Hauptgrund für die niedrigen Verkaufszahlen ist die geringe Reichweite der Batterien von 140 Kilometern und der große Preisunterschied zu Benzin- und Dieselfahrzeugen mit Heckklappe.² Und obwohl die verbesserten 2017er-Versionen von i3 und e-Golf 40 000 US-Dollar kosten und eine Reichweite von 180 bis 200 Kilometern haben, ist das doch noch weit entfernt von Teslas neuem Model 3 Sedan, der bei einem vergleichbaren Anfangspreis eine Reichweite von 350 Kilometern hat.^[13]

Die deutschen Autohersteller Volkswagen (Audi), BMW und Daimler (Mercedes-Benz) fallen daher im Wettbewerb der Elektroautos weiter zurück. Bis zum Jahr 2017 ignorierten die Vorstandsvorsitzenden der großen deutschen Autokonzerne den Erfolg von Tesla. Herbert Diess, der Vorstandsvorsitzende von Volkswagen, meinte: *»Alles was Tesla kann, können wir übertreffen.«* Erst nachdem Tesla den deutschen Maschinen- und Roboterhersteller Grohmann gekauft und im April 2017 dessen Lieferungen an die deutschen Autokonzerne beendet hatte, wurde die deutsche Autoindustrie aufmerksam.^[14] Jetzt betrachtet

2 Die Reichweite basiert auf der realistischeren US-EPA-Bewertung statt der optimistischen New European Driving Cycle (NEDC)-Skala.

Volkswagen Tesla als Hauptkonkurrenten im Bereich Elektroauto: »Tesla gehört zu den Wettbewerbern, über deren Fähigkeiten wir im Augenblick nicht verfügen«, sagte Herbert Diess.^[15]

Das ist eine klare Anerkennung des US-Unternehmens Tesla, dessen Marke und Firma für die vielen Merkmale steht, die auf der ganzen Welt die Energierevolution entfachen. Bei Tesla stehen die neuesten Technologien im Mittelpunkt, die bis zur Perfektion weiterentwickelt werden. Dabei zeigen sie der Welt, dass es möglich ist, die Erzeugung und den Verbrauch von Energie nachhaltiger zu machen. Elon Musk hat mehrere Male erklärt, dass sich seine Ziele »um seine Vision drehen, die Welt und die Menschheit zu ändern«, indem die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und die Auswirkungen des Klimawandels schnell verringert werden.^{[16]–[18]}

3. Wie ist die Geschichte von Tesla?

2003 wurde Tesla Motors von Martin Eberhard und Marc Tarpenning gegründet. Beide Männer spielten aktive Rollen in der anfänglichen Entwicklung des Unternehmens vor und nach der Beteiligung von Elon Musk. Eberhard war der erste CEO, bis er im August 2007 aufgefordert wurde, zurückzutreten. Eberhard begann seine Karriere als Elektroingenieur und gründete NuvoMedia, eines der ersten Unternehmen, die den E-Book-Reader entwickelten. Er gründete Tesla, weil er Sportwagen liebte und weil ihm die Abhängigkeit der Vereinigten Staaten von importiertem Öl Sorgen bereitete. Elon Musk war Tesla praktisch von Anfang an verbunden und führte die erste Finanzierungsrunde im Februar 2004, bei der er selbst mehr als sieben Millionen US-Dollar investierte, bevor er den Vorsitz des Boards von Tesla übernahm. Von 2003 bis 2007 stiegen die Investitionen in Tesla durch private Finanzierungen, an denen viele berühmte Unternehmer, darunter auch die zwei Gründer von Google, teilnahmen, auf mehr als 100 Millionen US-Dollar.^[19]

Anfang 2008, zu Beginn der Finanzkrise, übernahm Musk den Posten des CEO, feuerte Eberhard und 25 Prozent der Tesla-Mitarbeiter und führte eine fünfte Finanzierungsrunde (40 Millionen US-Dollar) durch, um eine Insolvenz zu vermeiden. In jenem Jahr waren die Verluste der Firma fünf Mal so hoch wie die Erlöse, und Tesla war in einem schlimmen Zustand. Bis 2009 hatte Tesla insgesamt fast 200 Millionen US-Dollar eingesammelt und weniger als 150 Roadster-Sportwagen ausgeliefert.^{[20], [21]}

Dann begann sich das Blatt zu wenden. Von 2010 bis 2016 nahm die Firma weitere 4,5 Milliarden US-Dollar auf, wovon die Hälfte für Innovationen und Design verwendet wurde und der Rest auf Produktionskapazitäten, um die Produktion zu steigern und ein Netz von Ladestationen zu installieren. Diese

Skalierungsmaßnahmen haben zu einer Umsatzsteigerung von nahezu null auf fünf Milliarden US-Dollar geführt.¹

Im Juni 2010 ging Tesla Motors mit einer Neuemission an die Börse, die 226 Millionen US-Dollar einbrachte. Damit war Tesla der erste amerikanische Autohersteller, der seit der Ford Motor Company 1956 an die Börse ging. In nur 14 Jahren seit der Gründung war Teslas Marktkapitalisierung auf 60 Milliarden US-Dollar gestiegen, mehr als die Bewertung seines Vorgängers Ford mit 51 Milliarden US-Dollar und so viel wie der deutsche Autoriese BMW.^[22] Die Firma eröffnete ihre erste Gigafabrik für Lithium-Ionen-Batterien und kaufte 2016 SolarCity, eines der größten Unternehmen, das Solarmodule installiert. Zusammen mit dem japanischen Unternehmen Panasonic stellt es jetzt auch in Buffalo, New York, Solarplatten für Dächer her.^[23] Elon Musk hat geschätzte 70 Millionen US-Dollar aus seinem eigenen Vermögen in die Entwicklung von Tesla Motors investiert und hält fast 30 Millionen Tesla-Aktien, was circa 22 Prozent des Unternehmenswerts im Jahr 2017 entspricht. Damit belegt er den 37. Platz der reichsten Amerikaner und den 80. der reichsten Menschen der Welt.^[24] Wegen der riesigen Kosten des schnellen Wachstums haben einige Analysten Zweifel bekundet, ob Tesla als unabhängiges Unternehmen überleben kann.^{[25], [26]}

1 Werte auf der Grundlage von Bloomberg Financial Data.

4. Welches Ziel verfolgt Elon Musk?

Teslas Ziel ist es, die Autoindustrie durchzurütteln, indem das Unternehmen »viele innovative Teile, die zusammenpassen und gewaltige Vorteile bringen« zusammenführt. Die Strategie war, typische Lebenszyklen von Produkten der Hochtechnologie nachzuahmen und mit einem teuren Produkt für die Reichen zu beginnen. Wenn die Firma das Stadium der Reife erreicht, wird sie »*an größere, wettbewerbsstärkere Märkte mit niedrigeren Preispunkten*« gehen. Das neueste Model 3 hat einen relativ niedrigen Anfangspreis von 35 000 US-Dollar und zielt auf einen Massenmarkt.^[27]

Musk erklärte einmal: »Auf jedem Gebiet braucht eine neue Technologie einige Versionen zur Optimierung, bevor der Massenmarkt erreicht wird. In diesem Fall konkurriert die Firma gegen 150 Jahre und Billionen von Dollar, die für Benzinautos ausgegeben werden.«^[28] Neue Technologien müssen wirklich gut sein, um sich durchsetzen zu können, und der Aufbau von Kundenbeziehungen ist der Schlüssel. Tesla tut dies, indem sie ihre Autos in ihren mehr als 200 eigenen Autosalons, von denen sich 120 außerhalb der USA befinden, direkt an die Kunden verkauft. Das ist völlig anders als das übliche amerikanische Händlermodell.¹

Es war immer der Wunsch von Elon Musk, Elektroautos anzubieten, die für den durchschnittlichen Verbraucher erschwinglich sind. Seit der Markteinführung des Roadster im Jahr 2008 hat Tesla weltweit mehr als 240 000 Elektroautos hergestellt und verkauft, was immer noch sehr wenig ist im Vergleich zu 69 Millionen weltweit jedes Jahr verkauften Autos.² Nach dem Erfolg der ersten Verkäufe des Model 3 hat die Firma angekündigt, ab 2018 jedes Jahr 500 000 Autos zu bauen.^{[29], [30]}

1 Eine Karte mit allen Läden, Service-Centern, Superchargers und Ladestationen befindet sich auf der Internetseite von Tesla (www.tesla.com) unter *Standorte*.

2 Die weltweiten Autoverkäufe steigen derzeit um drei Millionen pro Jahr.

Seit ihrer Gründung hat die Firma die erdölbasierte Autoindustrie durch vier erfolgreiche, zu 100 Prozent mit Strom betriebene Autos erschüttert (Elektrofahrzeuge):

- Teslas erstes Auto, der **Roadster**, war der erste voll elektrische Sportwagen, der einen Wechselstrommotor verwendet, der direkt auf Nikola Teslas ursprüngliche Entwicklung aus dem Jahr 1882 zurückgeht. Der Roadster war auch das erste Serienfahrzeug, das Lithium-Ionen-Batteriezellen verwendete und das erste Elektrofahrzeug mit einer Reichweite von über 200 Meilen (320 km) je Ladung. Zwischen 2008 und März 2012 verkaufte Tesla 2250 Roadster in 31 Ländern.
- Das **Model S**, das 2012 auf den Markt kam, ist eine Luxus-Limousine für fünf Passagiere, die mit einer Ladung eine Reichweite von 390 Kilometern erreicht. Bei der gleichen Reichweite wie der Roadster beschleunigt es von 0 auf 100 km/h in nur sechs Sekunden. Das günstigste Model S war im Luxussegment sehr konkurrenzstark, was hauptsächlich auf beträchtliche Steuervergünstigungen in den Vereinigten Staaten, Europa und Asien zurückzuführen ist. Das Spitzenmodell P85D mit einem Dualmotor kann in etwas mehr als drei Sekunden auf dieselbe Geschwindigkeit beschleunigen (wenn der »Insane«-Knopf gedrückt wird), wodurch es die schnellste Limousine der Welt ist – so schnell wie ein McLaren Supersportwagen für eine Million US-Dollar. Bis Ende 2017 wurden circa 200 000 Fahrzeuge des Model S mit einem Anfangspreis von 70 000 US-Dollar verkauft. 2015 erhielt Tesla die höchste Bewertung des US Consumer Report, die je für ein Auto vergeben wurde, eine perfekte Sicherheitsbewertung mit fünf Sternen. Es ist ständig in den Top Ten der umweltschonendsten Autos in der Kategorie Full-size-car.^{[31]-[34]}
- Der Tesla **Model X** Crossover SUV kam 2016 auf den Markt. Er hat eine Reichweite von über 400 Kilometern (250 Meilen) und einen Anfangspreis von 100 000 US-Dollar, einschließlich Steuern, ohne Finanzierung. In dem geräumigen

Wagen haben bis zu sieben Personen Platz, er ist mit Falcon-Wing-Türen ausgestattet, beschleunigt von 0 auf 100 km/h in fünf Sekunden und hat eine Zuglast von 2268 Kilogramm. Bis Ende 2017 wurden 70 000 Autos verkauft.

- Die Tesla-**Model-3**-Compact-Limousine mit vier Türen, die im Juli 2017 auf den Markt kam, ist der wirkliche Durchbruch in den Massenmarkt. Die Grundversion des Model 3, die nur zwölf Zentimeter kürzer als das Model S ist, hat dieselbe Geschwindigkeit und eine Reichweite von 350 Kilometern. Sie ist erhältlich ab 35 000 US-Dollar (40 000 Euro beim Kauf in der Eurozone), und mit zusätzlicher Batteriekapazität zum Preis von 9000 US-Dollar steigt die Reichweite auf 510 Kilometer. Es war daher nicht überraschend, dass Anfang 2016 in nur einer Woche fast 400 000 Wagen vorbestellt wurden, was einem Umsatz von 14 Milliarden US-Dollar entspricht.^{[27], 3}

3 Vorbestellung mit einer Anzahlung von mindestens 1000 US-Dollar, die voll erstattet wird, wenn der Auftrag storniert wird.

5. Teslas Masterplan endet aber nicht bei den Autos, oder?

Tesla hat zwar als reine Elektroautofirma angefangen, entwickelte sich aber bald zur ersten voll integrierten Elektromobilitäts- und Softwarefirma. Das Software-System wie zum Beispiel der selbstfahrende Autopilot-Modus kann in allen Wagen per Funk aktualisiert werden. Da alle Tesla-Fahrzeuge voll mit der Hardware für autonomes Fahren ausgestattet sind, verkauft die Firma bereits eine »erweiterte Autopilotfunktion« für 5000 US-Dollar, mit der Autos auf der Autobahn automatisch fahren, die Geschwindigkeitsbegrenzungen einhalten, Fahrspuren wechseln, die Autobahn verlassen und automatisch einparken.

Tesla hat seit 2012 ein weltweites Netz aus mehr als 1000 elektrischen 480-Volt-Superchargers (Superladestationen) aufgebaut, mit dem Kunden ihre Wagen in 20 bis 30 Minuten aufladen können.^{[35], [36], 1} Elon Musk erwartet, dass die zukünftigen Modelle mit einer einzigen Ladung 500 Meilen (800 km) im Vergleich zu 310 Meilen heute fahren können.^[37]

Laut Musk werden irgendwann alle Supercharger-Stationen Sonnenenergie verwenden. Er sagte den Besitzern von Tesla-Autos auch zu, dass die Nutzung des Netzes immer kostenlos sein werde,² präzisierte aber später, dass dies für die Luxus-S- und X-Modelle gelte.^[38] 2017 erstreckte sich das europäische Supercharger-Netz von Schweden bis Spanien und Kroatien mit einer Erweiterung in die Türkei.^{[39], [40]} In den Vereinigten Staaten können Tesla-Fahrer leicht mit ein paar Ladungen von einer Küste zur anderen fahren.

1 Ende 2016 soll es ungefähr 875 Supercharger-Stationen gegeben haben. Der Supercharger ist eine firmeneigene Gleichstromtechnologie, die bis 120 kW Strom liefert, wodurch das 90-kWh-Model S bei einer Ladezeit von circa 30 Minuten zusätzliche 170 Meilen (270 km) Reichweite erhält und eine volle Ladung circa 75 Minuten dauert.

2 Musks Versprechen Netto-Energie-positiver-solarbetriebener Supercharger-Stationen aus dem Jahr 2012 wurde jedoch nicht erfüllt. Bis jetzt sind nur eine Handvoll der gebauten Ladestationen solarbetrieben.^{[214], [215]} Mehr Infos unter supercharge.info.

In Zusammenarbeit mit Panasonic baut Tesla auch eine Gigafabrik für Lithium-Ionen-Batterien mit einem Investitionsvolumen von fünf Milliarden US-Dollar im US-Bundesstaat Nevada. Dort werden Milliarden Lithium-Ionen-Zellen hergestellt, die den Zellen in Laptops ähnlich sind. Die Fabrik wird bis 2018 eine Batteriekapazität von 50 GWh pro Jahr herstellen. Das reicht aus, um Batterien für 500 000 Elektroautos zu liefern, wodurch die weltweite Produktion von Lithium-Ionen-Batterien zur Erfüllung der Produktionsziele für das Model 3 verdoppelt wird.^[41] Und Tesla hat bereits geplant, dass an dem Ort dieser Gigafabrik eine weitere, drei Mal so große Erweiterung durchgeführt werden soll und ähnliche Gigafabriken in China und Europa entstehen sollen.^[42] Die Kosten von Teslas Lithium-Ionen-Batterien sind zwar bereits von 1000 auf 200 US-Dollar pro kWh gefallen, mit der Gigafabrik sollen die Kosten aber auf unter 100 US-Dollar pro kWh verringert werden.^[43] 3 Batteriepacks machen ungefähr ein Drittel der Fahrzeug-Herstellkosten von Tesla aus. Bei 100 US-Dollar pro kWh würde die Batterie im 55-kWh-Model 3 nur 5500 US-Dollar kosten.

Das Unternehmen verkauft bereits in der Gigafabrik produzierte 14-kWh-Powerwall-Batteriepacks für die Speicherung von Strom in Haushalten und 200-kWh-Netzgeräte an Industriekunden.⁴ 2017 fusionierte Tesla mit SolarCity, das früher von Elons Cousin geführt wurde, »um sensationelle Solardächer mit nahtlos integrierter Batteriespeicherung zu erstellen«. Der CEO Elon Musk meinte dazu: *»Dadurch wurde Tesla zum einzigen vertikal integrierten Energieunternehmen der Welt, das durchgängig saubere*

3 In den Kosten enthalten sind Gemeinkosten, Kapital- und sonstige Kosten. Viele niedrigere Kennzahlen werden veröffentlicht, die nur Rohstoffe und Arbeitskosten betreffen.

4 Die neue Version 2.0 der Powerwall hat eine Batteriespeicherkapazität von 14 kWh im Vergleich zu nur halb so viel für die Powerwall 1.0. Auch die neue Version des Netzgeräts hat mit 200 kWh die doppelte Speicherkapazität der Vorversion.

Energieprodukte anbietet.»^[44],⁵ Seit Mai 2017 werden Vorbestellungen für Teslas Solardachplatten entgegengenommen, die nicht wie Solarmodule aussehen und ungefähr so viel kosten wie Standardsolarmodule. In den Vereinigten Staaten begannen die Lieferungen Ende 2017, in den Rest der Welt wird ab 2018 geliefert.^[45] Im Juni 2014 kündigte Tesla an, dass jeder mit dem Ziel, schneller zu einer Welt sauberer Technologien zu gelangen, ihre Technologiepatente kostenlos nutzen kann.^[46]

Das Tesla Model S war die erste voll-elektrische Autoflotte, die 2015 den Meilenstein von einer Milliarde elektrischer Meilen erreichte. Der Nissan Leaf lag einen Monat später knapp dahinter.^[47],^[48] 2014 teilte General Motors mit, dass die Besitzer des Plug-in Chevrolet Volt über eine Milliarde Meilen (davon 60 Prozent mit Strom gefahren) angesammelt hatten.^[49]

Auf der »Future Transport Solutions«-Konferenz, die 2016 in Oslo stattfand, sagte Musk, er erwarte, in Zukunft Autos herstellen zu können, die noch billiger sind als das Model 3:⁶

»In Zukunft wird es Autos geben, die sogar noch billiger sein werden [...] Mit der nächsten Generation und kleineren Autos werden wir schließlich in der Lage sein, dass jeder sich so ein Auto leisten kann.«^[50]

Tesla beschränkt sich nicht auf Pkw und entwickelt im Wettbewerb mit Daimler seit 2016 eine Sattelzugmaschine (oder einen Sattel-schlepper) mit 34 Tonnen Traglast für den Stadttransport. Auf der Grundlage der heutigen Batterietechnologie wird der Lkw eine Reichweite von 800 Kilometern haben, ungefähr die Hälfte der Reichweite von Diesel-Lkw. Nach Informationen des Unternehmens wird er mit Selbstfahrfunktionen ausgestattet sein.^[51]

5 Die chinesische Firma Build-Your-Dreams (BYD) war eigentlich die erste, die den Verkauf von Elektroautos, Batterielösungen und Solarmodulen in China zusammengelegt hat.

6 Musk wollte die Bezeichnung S-E-X für die ersten drei Modelle, musste sich dann aber mit »S3X« zufrieden geben, weil Ford Markenschutz für das »Model E« hat.

6. Treibt nur billige Solarenergie diese Revolution an?

Am bahnbrechendsten in dieser Energierevolution sind die schnell sinkenden Kosten der Solarenergie. Deutschland ist das Herzstück dieser Energierevolution und war bis 2015 das Land mit der meisten Sonnenenergie und der weltweit größte Investor in Sonnenenergie.¹ Die Kosten eines 4-kW-Solarmodulsystems, das für einen Familienhaushalt in Westeuropa ausreicht, sind von 16 000 Euro im Jahr 2009 auf 5500 Euro bis Mitte 2017 gesunken.^{[52], [53]} Dadurch wird ein privates Sonnenenergiesystem für die meisten Haushalte in Deutschland kosteneffizient. Sogar ohne Subventionen zahlen diese jetzt einen niedrigeren Preis für Strom, ein Wendepunkt, der Netzparität genannt wird. Die Gesamtkosten eines Solarmodulsystems betragen circa 0,08 Euro pro kWh über die gesamte Nutzungsdauer, im Vergleich zu 0,13 Euro für Netzanbindung und Erzeugungskosten.^[54] Der Vergleich wird noch günstiger, wenn auch hohe Steuern und Abgaben berücksichtigt werden, da deutsche Haushalte normalerweise für netzbasierten Strom im Jahr 2017 insgesamt 0,29 Euro zahlten.^[54] Bei diesem Preis werden sogar Batterien, die die Energie speichern, wie das beliebte Sonnen Eco 4-System, attraktiv, das, wenn es zusammen mit Solarmodulen gekauft wird, Solar- und Batteriestromkosten von 0,26 Euro pro kWh verursacht.^{[55], [56], 2}

Die Kostensenkungen sind sogar noch stärker für auf den Boden montierte Solarparks von Industriegröße (siehe Abbildung 2 unten). Weltweit haben Rekordtiefpreise für Solarprojekte von Versorgungsunternehmen sogar die größten Skeptiker überrascht. Im

- 1 Deutschland war 2016 mit 41,3 GW Solar-Photovoltaik-Kapazität nach China (78 GW installiert) und Japan (43 GW installiert) das drittgrößte Solarland.
- 2 Die Solar- und Batteriekosten basieren auf den Gesamtkosten, einschließlich Module, Rahmen, Wechselrichter, Installation, Batterien, Austausch nach zehn Jahren und Wartung für 25 Jahre, geteilt durch den gesamten erzeugten Strom. Nicht enthalten sind Kreditkosten. Würde ein Haushalt den vollen Betrag als Kredit zu sechs Prozent Marktzinsen finanzieren, lägen die Kosten eines 4-kWh-Solarmodulsystems bei 0,13 Euro pro kWh und für ein Solar- und Batteriesystem bei 0,39 Euro pro kWh.

November 2014 wurde an die saudi-arabische Firma ACWA Power ein 100-MW-Projekt zum Preis von 0,06 Euro pro kWh vergeben, was weit billiger ist als der Erzeugungspreis für Erdgas von 0,09 US-Dollar in den Vereinigten Arabischen Emiraten (VAE).^{[57], [58]} Der Rekord wurde 2016 gebrochen, als ein Preis von 0,03 Euro pro kWh für die größte 800-MW-Solaranlage der Welt vereinbart wurde.³ Das ist viel billiger als das erste Kohlekraftwerk in den VAE, das 0,05 Euro pro kWh kostete.^[59] Weitere Sonnenländer wie die Vereinigten Staaten folgen knapp dahinter. Industrielle Solarprojekte, die zumeist im sonnigen Südwesten und Osten des Landes installiert sind und 2013 circa 0,10 Euro pro kWh kosteten, sind in neuen Ausschreibungen auf 0,04 Euro gefallen.^{[60], [61]} Selbst im bewölkten Deutschland wurden Ausschreibungen für Projekte von mehreren hundert MW mit einem Durchschnittspreis von 0,06 Euro vergeben.^[62] Solarparks erzeugen inzwischen weltweit Energie zu viel niedrigeren Preisen als mit fossilen Brennstoffen betriebene Anlagen.

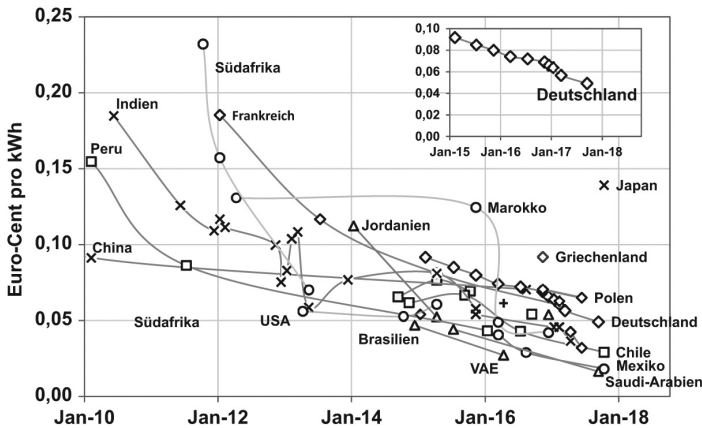


Abbildung 2: Am Boden montierte Solarparks von Industriegröße, Preissenkung Januar 2010 bis Dezember 2017.

³ Und dieser Rekord wurde wiederum gebrochen mit einem Preis von 0,024 Euro pro kWh für eine 350-MW-Solaranlage – ebenfalls in den VAE.^[216]

Die starke Kostensenkung ist auf mehrere Faktoren zurückzuführen. Ein Solarsystem besteht aus Solarmodulen, einer Befestigungsvorrichtung, einem Wechselrichter zur Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom, Kabeln – und für industrielle Projekte Übertragungsleitungen – sowie beträchtlichen »weichen Kosten« für unter anderem Einbau, Gemeinkosten der Firma, Auftragsvergabe und so weiter. Die reinen Kosten eines 1-kW-Moduls fielen von 2055 US-Dollar im Jahr 2010 auf 687 US-Dollar im Jahr 2016.^[63] Der wichtigste Faktor war eine massive Senkung der Materialkosten, die dadurch erreicht wurde, dass die Dicke der Solar-Wafer verringert wurde, während die Menge des aufgenommenen Lichts beträchtlich gestiegen ist. Die pro Solar-Wafer erforderliche Menge an Silizium ist von 16 Gramm im Jahr 2005 auf zehn Gramm im Jahr 2015 zurückgegangen.^{4, [64]} Die globale durchschnittliche Effizienz von Solarmodulen stieg von circa 13 Prozent im Jahr 2009 auf 17 Prozent im Jahr 2017, wobei einige 20 Prozent erreichten.^[65] Der zweite Faktor war von 2010 bis 2017 eine 75-prozentige Reduktion des Preises von Polysilizium, des Rohmaterials, das aus Quarzsand kommt und mit dem Solarzellen gebaut werden, die Licht aufnehmen und in Strom umwandeln.^[66]

Es wird erwartet, dass die Kosten in den nächsten zehn Jahren mindestens um weitere 30 Prozent gesenkt werden können.^{[64], [67]} Je nach Erfolg neuer Formen der Solarmoduletechnologie könnten die Kosten sogar noch weiter fallen. Tesla arbeitet in den Vereinigten Staaten daran, die Technologie seines Partners Panasonic und des 2014 akquirierten Solar-Start-ups Silevo zu kombinieren.⁵ In seiner neuen 1-GW-Solarmodul-Gigafabrik in Buffalo, New York, stellt es seit August 2017 Solardachziegel mit

4 Die Berechnung beruht auf einer Verringerung der Wafer-Dicke von 285 Mikrometer im Jahr 2005 auf 180 Mikrometer im Jahr 2013, mit einer Siliziumdichte von 2,33 Gramm pro Kubikzentimeter und einer Wafer-Größe von 243 Quadratzentimetern.

5 SolarCity kaufte Silevo im Jahr 2014 für 168 Millionen US-Dollar und wurde von Tesla im Jahr 2017 für zwei Milliarden US-Dollar gekauft.

einer Effizienz von mindestens 22 Prozent her, hauptsächlich auf der Grundlage einer Entwicklung von Panasonic, bei der ein sehr dünner Film wie zum Beispiel eine Siliziumschicht, die das Sonnenlicht aufnimmt, zwischen sogenannten amorphen Siliziumschichten liegt, die zwar nicht aktiv sind, aber die Menge an Sonnenlicht, das »entweicht«, verringern.^[68] ⁶ Diese Technologie ist ein Schritt hin zur nächsten großen Entwicklung in der Solartechnologie, die sogenannten »Tandemzellen«, die aus vielen Schichten bestehen, von denen jede ein anderes Farben- oder Emissionsspektrum des Sonnenlichts aufnimmt und somit mehr Sonnenenergie gewonnen werden kann. Die derzeit verwendeten siliziumbasierten Zellmodule mit einer einzelnen Schicht können aufgrund physikalischer Grenzen nicht viel mehr als 22 Prozent der Energie im Sonnenlicht aufnehmen.^[69] Aus vielen Schichten bestehende Tandemzellen haben hingegen bis jetzt im Labor eine Effizienz von annähernd 50 Prozent erreicht, die theoretisch auf mehr als 80 Prozent steigen könnte. Bis jetzt hat es niemand geschafft, diese kommerziell herzustellen.

6 Von Panasonic auch Heterojunction-Technologie oder HIT genannt.

7. Werden Elektroautos vor 2030 wirklich vorn sein?

Mit über 1,2 Milliarden Autos auf den Straßen ist die Welt überschwemmt mit Autos.¹ Bei steil steigenden Autoverkäufen in China von fünf auf 24 Millionen in nur zehn Jahren wurden 2017 nicht weniger als 69 Millionen verkauft – im Vergleich zu 48 Millionen nur zehn Jahre zuvor.^[30] In den reichen OECD-Ländern dagegen blieben die Verkäufe mit rund 30 Millionen verkauften Autos pro Jahr in diesem Zeitraum stabil, mit Ausnahme eines vorübergehenden Rückgangs wegen der Finanzkrise 2008 und 2009.

Wenn man sich die Zahlen aller Elektro- und Plug-in-Elektroautos anschaut, dann verblassen die Verkäufe immer noch im Vergleich mit Benzin- oder Dieselaautos, doch die Verkäufe steigen schnell. 2017 überstieg die Gesamtzahl der verkauften Autos zum ersten Mal eine Million, wodurch zum ersten Mal in der Geschichte mehr als drei Millionen Elektroautos auf den Straßen waren.^[70]

Mehrere qualifizierte Schätzungen wurden darüber erstellt, wie schnell Elektrofahrzeuge weiter angenommen werden. Ein Report von Goldman Sachs stellte dar, dass der Markt für Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 auf über zwei Millionen wachsen könnte, auf vier Millionen 2025 und auf 30 Millionen bis 2030. Im Jahr 2017 erwarteten sogar konservative Ölgesellschaften wie ExxonMobil und BP, dass bis 2040 100 Millionen Elektroautos auf den Straßen sein werden. Bloomberg New Energy Finance und Statoil sind am optimistischsten und erwarten, dass bis 2040 über 500 Millionen Elektrofahrzeuge unterwegs sein werden.^[71] Falls dem so ist, werden in der Welt circa 40 Prozent aller Autos auf den Straßen Elektrofahrzeuge sein. Die Internationale Energieagentur (IEA) hat ein ähnliches Szenario ausgearbeitet. Sie glaubt, der gesamte Bestand an Elektrofahrzeugen könnte

1 Die Gesamtzahl der Pkw auf den Straßen wurde auf 950 Millionen geschätzt, zuzüglich weiterer 250 Millionen Transporter.

bis 2030 140 Millionen und bis 2050 900 Millionen erreichen. Dies würde bedeuten, dass zwei von fünf der bis dahin zwei Milliarden Pkw Elektroautos sein werden.^[72] Dabei muss berücksichtigt werden, dass die konservative IEA in der Vergangenheit zu pessimistisch war, zumindest bei ihren Prognosen in Bezug auf Solarmodule und Windenergie.

Ein Schlüsselfaktor für den Erfolg ist die schnelle Entwicklung der Batterietechnologien, besonders in Asien. Asiatische Hersteller von Lithium-Ionen-Batterien haben derzeit eine Produktionskapazität von circa 50 GWh, wovon die Hälfte für Elektroautos verwendet wird, und sie haben einen monopolistischen Anteil von 50 bis 80 Prozent der Kernkomponentenmaterialien wie Kathodenmaterial und Separatoren. Eine weitere Ausweitung soll zu einer Verdreifachung der Kapazität in Asien bis 2020 führen.^{[73], [74]} Asiatische Hersteller haben auch in der Entwicklung der nächsten Batterie-Generation die Führung übernommen. Auf Japan entfielen 53 Prozent der Patentanträge, die 2002 bis 2011 eingereicht wurden, gefolgt von Nordamerika mit 13 Prozent, Europa mit zwölf Prozent, Korea mit zehn Prozent und China mit acht Prozent.

Ein weiterer, die Entwicklung vorantreibender Faktor ist die Unterstützung durch den Staat. Der deutsche Verkehrsminister Alexander Dobrindt hat vor Kurzem einen Plan vorgestellt, mit dem er bis 2030 sechs Millionen Elektroautos beziehungsweise zehn Prozent dieser Fahrzeuge in Deutschland auf die Straße bringen will.^{[75], [76]} Der Plan wird durch eine Kaufprämie in Höhe von bis zu 4000 Euro und einer Befreiung von der Kfz-Steuer für bis zu 400 000 Neuwagen, die in den nächsten Jahren verkauft werden, angeschoben. Hinzu kommen 15 000 Ladestationen.^[77] Mit solchen Steueranreizen erhält die Energiebranche Investitionssicherheit, was auch eine Mitteilung des Versorgers EnBW vom Juli 2017 belegt, bis 2020 an den Autobahnen und überall im Land 1000 Ladestationen für Elektroautos zu bauen.^[78] Tatsächlich ist Deutschland eines der letzten Länder, da China, die Vereinigten

Staaten, Frankreich, Japan und viele andere bereits Steuergutschriften oder Steuerbefreiungen für Elektroautos, üblicherweise zwischen 5000 und 10 000 US-Dollar zur Verfügung stellen und auch Ladestationen subventioniert haben.^[72] Allein China hat bis jetzt Subventionen in Höhe von 5,6 Milliarden US-Dollar zur Verfügung gestellt, und in den nächsten Jahren werden weitere zehn Milliarden US-Dollar erwartet.^[79] Diese massiven finanziellen Anreize sind Teil des ehrgeizigen Ziels, bis 2020 nicht weniger als fünf Millionen Elektrofahrzeuge auf die Straßen zu bekommen.² Politiker in Norwegen und Indien sind sogar noch kühner, denn sie arbeiten an Maßnahmen, mit denen bis 2030 100 Prozent der verkauften Autos Elektroautos sein sollen.^{[80], [81]}

Es wird deutlich, dass viele Regierungen sich bemühen, die Nutzung von Elektroautos schnell zu steigern. Sie haben sich in der aus 15 Ländern bestehenden globalen Electric Vehicles Initiative (EVI) zusammengeschlossen, die 90 Prozent aller Automärkte abdeckt. Zusammen haben sie das ehrgeizige Ziel, bis 2020 sechs Millionen Elektrofahrzeuge pro Jahr zu verkaufen und 20 Millionen sollen auf den Straßen fahren.^[82] Um dieses Ziel zu erreichen, müssen alle Produktionspläne aller derzeitigen Hersteller von Elektroautos verwirklicht werden (vergleiche Tabelle 1).^[83]

Bis 2022 dürfte bei den Verkaufszahlen ein Wendepunkt erreicht werden, da Elektroautos ohne Subventionen oder Steuergutschriften dann dasselbe kosten wie gleichwertige Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, schreibt Bloomberg Energy Finance.^[84] Elektroautos werden dann kostengünstiger sein. Der Schlüssel hierzu wird die Markteinführung von Modellen sein, die sowohl den Vorteil der Reichweite als auch niedriger Kosten haben, da Elektroautos für den Massenmarkt wenigstens eine Reichweite von 200 Meilen (ca. 320 km) und einen Preis weit unter 50 000 US-Dollar voraussetzen. Heute haben der Chevrolet Bolt E3 von

2 2015 wurden die Verkäufe von Elektrofahrzeugen in China auf 200 000 geschätzt, wobei gefälschte Umsätze nicht berücksichtigt werden.^[217]

General Motors und das Model 3 von Tesla eine Reichweite von über 200 Meilen bei einem Anfangspreis von 35 000 US-Dollar. Nissan und Renault haben angekündigt, dass sie ihre Modelle Leaf beziehungsweise Zoe so aufrüsten, dass sie 2017/2018 ähnliche Leistungskennzahlen erreichen. Auch Ford und Hyundai kündigten diese Reichweite und Kostenniveaus an, haben aber bis jetzt noch keine Einzelheiten zu den Modellen veröffentlicht.^[85]
^[86] Mehrere neue Marktteilnehmer sind in das Rennen um das Elektroauto eingestiegen. Die englische Elektronikfirma Dyson und der amerikanische Autohersteller Fisker machten auch optimistische Ankündigungen über ihre Elektroautos mit hoch entwickelten Batterien, die auf den Markt kommen werden.^[87], ^[88]

Unternehmen	Autoverkäufe im Jahr 2015 ^[100]	Davon nur Elektro- & Plug-in Autos ^[101]	Aktuelle Modelle Mitte 2016	Angekündigtes Ziel
Renault-Nissan*	2,8 Millionen (Renault) 6,1 Millionen (Nissan)	106 000	Nissan Leaf, e-NV200, Renault Zoe, Mitsubishi Outlander PHEV	Erwartet, dass im Jahr 2020 zehn Prozent der Verkäufe Plug-in und Nur-Elektroautos sein werden. ^[102] , ^[103]
Build Your Dreams (BYD)	62 000	62 000	Qin, Tan, E6, Denza EV	Zur Verdoppelung der Herstellung von Elektrofahrzeugen (EF) jedes Jahr bis 2018 sollen bis 2018 bis zu 0,5 Millionen Autos verkauft werden. ^[104] , ^[105]
Tesla	52 000	52 000	Modelle S, X und 3	Ein »unmögliches« Ziel von 0,5 Millionen verkauften Autos pro Jahr bis 2018. ^[106]
Volkswagen Group (einschließlich Audi)	10 Millionen	49 300	e-Golf, Audi R8 e-tron, VW e-UP, Golf GTE, Passat GTE	Volkswagen will die Verkäufe bis 2025 auf zwei bis drei Millionen Elektroautos steigern. ^[107] Die Tochtergesellschaft Audi möchte den Anteil der Plug-in oder Nur-Elektroautos an den Verkäufen in den Vereinigten Staaten bis 2025 auf 25 Prozent steigern. ^[108]

Tabelle 1: Überblick über weltweite Produktionsziele für Elektroautos.

Unternehmen	Autoverkäufe im Jahr 2015 ^[100]	Davon nur Elektro- & Plug-in Autos ^[101]	Aktuelle Modelle Mitte 2016	Angekündigtes Ziel
Zhejiang Geely** & Khandi	532 000 (Geely) 28 000 (Khandi)	28 400	Geely Emgrand Khandi Panda EV, Khandi K10 EV	Umstellung auf 90 Prozent der 450 000 jährlichen chinesischen Autoverkäufe auf Elektroautos bis 2020. ^[109]
BMW	1,9 Millionen	28 000	I3, I8, X5 40e	Kündigte das Ziel von 100 000 Verkäufen pro Jahr für 2020 an. ^[110]
Ford	6,6 Millionen	21 100	Focus Electric, Fusion Energi, C-mAx Energi	Möchte bis 2020 4,5 Milliarden US-Dollar in Elektrofahrzeuge investieren, wobei 40 Prozent der möglichen Verkäufe Elektroautos sein sollen. ^[111]
General Motors	9,8 Millionen	17 500	Chevrolet Volt, Chevrolet Bolt E3, Cadillac CT6 Hybrid	Beabsichtigt bis 2017 500 000 Plug-in-Elektrofahrzeuge zu verkaufen. ^[112]
BAIC	524 000	17 400	Beijing E-Serie	Geht davon aus, dass die Elektrofahrzeug-Verkäufe bis 2020 700 000 Fahrzeuge erreichen können. ^[113]
Volvo	503 000	10 200	S60 Plug-In, XC90 T8	Um das Segment der weltweiten Verkäufe von Elektroautos bis 2020 auf zehn Prozent zu steigern. ^[114]
Hyundai	7,9 Millionen	7500	Kia Soul EV	Beabsichtigt, das Segment der Elektroautomodelle bis 2020 um mehrere Fahrzeuge zu erhöhen. ^[115]
Honda	4,7 Millionen	110	Fit EV, Accord Plug-in	Kündigte an, dass bis 2030 zwei Drittel der Verkäufe Hybrid-, Plug-in- und Nur-Elektroautos sein sollen. ^[116]

* Einschließlich Zahlen für Mitsubishi, da Nissan seit 2016 einen Mehrheitsanteil am Unternehmen hält.

** Chinesisches Unternehmen, das Volvo seit 2010 besitzt. Zahlen ohne Verkäufe von Volvo. Das Unternehmen hat seit 2016 eine strategische Partnerschaft mit Khandi bezüglich der Herstellung von Elektrofahrzeugen.

Tabelle 1: Überblick über weltweite Produktionsziele für Elektroautos. – Fortsetzung

8. Warum fällt der Preis von Elektroautos so schnell?

Die ersten Elektroautos waren teuer. Das von General Motors 1996 gebaute Elektrofahrzeug EV1 war ein auf Blei-Säure-Batterien basierender, nur mit Strom betriebener Zweisitzer, der 53 000 US-Dollar (inflationsbereinigt) kostete, nur geleast werden konnte und eine Reichweite von nur 120 Kilometern hatte. Die nur 5000 geleasten Fahrzeuge zerstörte General Motors nach Ablauf der Leasingzeit.^{[106], [107]}

Die Fahrzeuge von Tesla Motors basieren auf Lithium-Ionen-Batterien, eine brillante strategische Entscheidung. Blei-Säure-Batterien waren 2007 viel billiger, doch die Kosten haben sich weiterentwickelt, ohne dass es Verbesserungen bei der Technologie gab. Dagegen hatten Lithium-Ionen-Batterien gerade erst angefangen, besser und billiger zu werden. Der Roadster kostete 109 000 US-Dollar, wobei allein die Batterien 50 000 US-Dollar kosteten. 2017 kostete derselbe Batteriepack 10 000 US-Dollar.^{[108]-[110], 1}

Dank klügerer Zusammensetzung und Design der Materialien wiegt der Batteriepack des Tesla Model 3 bei gleicher Energieladung ungefähr die Hälfte der Batterien des Roadster.² Die »Energie pro Gewicht- und Zeiteinheit« nimmt mit enormer Geschwindigkeit zu. 2018 kann Tesla einen Batteriepack für ein Model 3 mit einer Reichweite bis 350 Kilometern für 8000 US-Dollar herstellen (vergleiche Abbildung 3),³ und Tesla erwartet,

- 1 Die Kosten für das durchschnittliche Lithium-Ionen-Batteriepack betrugen 2017 276 US-Dollar pro kWh, während Tesla diese auf 190 US-Dollar pro kWh verringerte. Die Kosten von General Motors und LG-Chem werden auf 215 US-Dollar pro kWh^[110] geschätzt. Diese Beträge gelten für das ganze Batteriepack, nicht nur für die Zellen.
- 2 Schätzungen der Speicherkapazität des Roadster während der Garantiezeit lauten auf 117 Wh pro kg, des Model S auf 150 Wh pro kg, und das Model 3 dürfte an die 200 Wh pro kg haben. Diese Werte gelten für das ganze Batteriepack, nicht nur für die Zellen, die weit höhere Werte haben.
- 3 Weitere Kostensenkungstreiber sind unter anderen eine intelligentere und rationalisierte Produktion, Skaleneffekte in Einkaufsverträgen und niedrigere Risiko- und Finanzierungskosten. Der Preis für Lithium, einer der wenigen Rohstoffe, war in den letzten Jahren ziemlich stabil und hatte daher keine größere Auswirkung auf die Entwicklung der Kosten.

dass diese Kosten in den kommenden Jahren um wenigstens 25 Prozent fallen werden.⁴

Die schnell zunehmende Akzeptanz von Elektrofahrzeugen (EF) und Hybriden in den nächsten zehn Jahren wird den Markt für Batterien enorm erweitern. 2016 prognostizierte Goldman Sachs eine Versechsfachung des Markts für EF-Batterien auf 24 Milliarden US-Dollar im Jahr 2025, von 58 GWh auf 387 GWh (die Nachfrage nach Autobatterien soll von 15 GWh auf 279 GWh steigen).

Die Zunahme der Energiedichte in Batterien ist enorm. 2005 lag sie bei 100 Wh/kg, 2015 bei über 200 Wh/kg, 300 Wh/kg werden bis 2020 erwartet, und über 500 im Jahr 2025. Experten meinen, dass dies wahrscheinlich den Übergang in eine »Nach-Lithium-Ionen«-Technologie voraussetzt, weil das praktische Maximum für diese Art Chemie fast erreicht ist.^[111] Asiatische Batteriehersteller, auf die mehr als 50 Prozent der weltweiten Herstellung von Batterien entfällt, haben die Führung bei der Entwicklung der nächsten Batteriegeneration übernommen. Sie werden Feststoffbatterien genannt, unter anderem Lithium-Sauerstoff und Lithium-Schwefel enthalten, die mindestens fünf Mal so viel Energie halten können.^{[112], [113], 5}

Analysten von Goldman Sachs glauben, dass diese Batterien zwischen 2025 und 2030 auf den Markt kommen werden, was für einen Batteriepack für das Model 3 zu einer weiteren Kostensenkung um dann 5000 US-Dollar führen wird.^{[109], 6} Dann würden für ein Elektrofahrzeug die gleichen Kosten wie für ein Benzinauto anfallen, und sie wären sogar niedriger an Orten, wo

4 Der Tesla 3 wird für 35 000 US-Dollar verkauft und soll eine Reichweite von circa 300 km haben.

5 Die Lithium-Ionen-Batterie hat heute zwischen Kathode und Anode einen flüssigen Elektrolyt. Eine Festkörperbatterie hat zwischen Kathode und Anode einen Festkörperelektrolyt und enthält keine Flüssigkeit.

6 Auf der Grundlage einer Energiedichte nach Gewicht von 500 Wh/kg und Batteriekosten von 100 US-Dollar pro kWh.

die Strompreise niedrig sind. Tesla glaubt, dass dies bereits 2020 der Fall sein wird.^{[114], [115]}

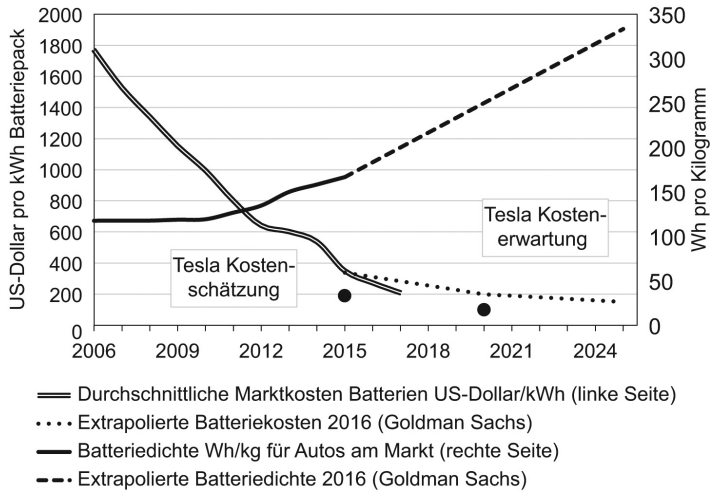


Abbildung 3: Die Kosten von Batterien in Dollar (linke Seite) im Vergleich zur gravimetrischen Dichte (des Gewichts, rechte Seite) von 2008 bis 2017 und Goldman-Sachs-Prognosen bis 2025.^{[72], [108], [109], [115]-[117]}

9. Wie haben sich die mit Brennstoffzellen betriebenen Autos im Vergleich entwickelt?

Seit der Konstruktion des Elektrolieferwagens von General Motors im Jahr 1966, des ersten mit Brennstoffzellen betriebenen Prototyps, haben viele Autohersteller in diese Technologie investiert. Mit Brennstoffzellen betriebene Autos durchlaufen einen chemischen Prozess, bei dem Treibstoff anhand einer Zelle mit positiven und negativen Ladungen in Strom umgewandelt wird. Am gebräuchlichsten ist die Festoxidzelle (SOFC), die mit Wasserstoff betrieben werden kann, der zusammen mit Sauerstoff in Strom und Wasser umgewandelt wird.

Obwohl zwischen 1990 und 2010 Dutzende Unternehmen verschiedene Autos mit diesen Zellen gebaut haben, hat es bis vor Kurzem keines bis zur Vermarktungsreife geschafft. Jetzt haben vier Hersteller mit Brennstoffzellen betriebene Fahrzeuge auf dem Markt:

- 2013 nahm Hyundai die Produktion des hybriden Fahrzeugs **Tucson Fuel Cell Crossover SUV** auf, das 426 km (265 Meilen) fahren kann und 77 000 US-Dollar kostet. Die Verkäufe waren enttäuschend: Bis Anfang 2016 waren es nur einige hundert.^[118]
- Nicht lange danach – im Jahr 2015 – brachte Toyota den **subcompact Mirai** auf den Markt, der eine Reichweite von 502 km (312 Meilen) hat und für 57 400 US-Dollar in Japan, den Vereinigten Staaten und der Europäischen Union, in Gebieten mit der entsprechenden Wasserstoff-Infrastruktur verkauft wird.^[119]
- Hondas **Brennstoffzellenfahrzeug Clarity**, eine Limousine mit sechs Sitzen und einer Reichweite von 700 km (435 Meilen), wird seit 2017 in Japan und den Vereinigten Staaten für circa 63 000 US-Dollar verkauft.^[120]
- Daimler begann den Verkauf seines **Mercedes-Benz GLC F-Cell Crossover SUV** im Jahr 2017 zum Preis von 76 000 US-Dollar. Er ist ein Hybrid kombiniert mit einer Lithium-Ionen-Batterie

und einer Brennstoffzelle, der nur mit der Batterie eine Reichweite von 50 km (31 Meilen) und mit der Brennstoffzelle 500 km (310 Meilen) erreicht.^{[121], [122]}

Andere Autohersteller sind vorsichtiger und planen ihre ersten Brennstoffzellen-/Wasserstofffahrzeuge erst für 2020 (General Motors) oder 2021 (Nissan).^{[123]-[125]} Am ehrgeizigsten ist bis jetzt Toyota, deren Ziel es ist, bis 2020 30 000 Fahrzeuge pro Jahr zu verkaufen, was schwierig ist, weil die Infrastruktur mit nur 80 Wasserstofftankstellen in Japan und 40 in Kalifornien, bei Drucklegung dieses Buches, mangelhaft ist.^{[126], [127]} Es ist kaum überraschend, dass Ende 2017 nur wenig mehr als 3000 Toyota Mirai Wasserstoffautos verkauft wurden.^[128]

Bemühungen, durch die Erhöhung der Tankstellenzahl in Japan und anderswo Wasserstoffautos attraktiver zu machen, haben bis jetzt ihr Ziel verfehlt. In Deutschland wurden bis Mitte 2017 40 Wasserstofftankstellen eröffnet und ganze 260 Wasserstoffautos waren auf den Straßen unterwegs.^{[129], [130]} Mit der H2me-Initiative wird versucht, diese Anzahl auf 100 Wasserstofftankstellen bis 2020 und auf 400 bis 2023 (<http://h2-mobility.de>) zu erhöhen. An dieser Initiative sind die Ölgesellschaften Shell, Total, OMV, der Autoriese Daimler und die Wasserstoffproduzenten Linde und Airliquide beteiligt.

Neben einer verbesserten Tankstelleninfrastruktur ist auch die Produktion hoher Stückzahlen von Wasserstoffautos erforderlich, um die Kosten um 20 bis 30 Prozent reduzieren zu können und die Fahrzeuge erschwinglicher zu machen. Aber selbst dann sind weiterentwickelte Elektroautos, die eine ähnliche Reichweite aufweisen, wie das Model 3 von Tesla, immer noch billiger. Eine weitere Herausforderung sind die Kosten für Herstellung und Vertrieb von Wasserstoff. Bei diesen zwei Vorgängen gehen circa 35 bis 40 Prozent des Energiewerts verloren, weitere 50 Prozent, wenn Wasserstoff im Auto in Strom umgewandelt wird, um es fahren zu können.^{[131], [132]} Damit verschwindet der

Hauptgrund, sich für Wasserstoff zu entscheiden: der viel höhere Energiegehalt bei Verdichtung als bei Benzin oder Diesel. Es bleibt nur ein wichtiger Vorteil des Wasserstoffs: Für eine saubere Fahrt über Entfernungen von 700 Kilometern und mehr sind Wasserstoffautos noch immer besser als batteriebetriebene Elektrofahrzeuge.

10. Werden selbstfahrende Autos schnell zu einem Rückgang des Ölverbrauchs führen?

Im Oktober 2010 teilte Google überraschend mit, dass es insgeheim an einem Projekt eines selbstfahrenden Autos gearbeitet hat. Der damalige CEO Eric Schmidt sagte: »Es ist ein Fehler, dass das Auto vor dem Computer erfunden wurde. Ihr Auto sollte selbst fahren. Das ist einfach sinnvoll.«^[133] Es dauerte nur ein paar Jahre und alle großen Autounternehmen folgten diesem Beispiel und begannen ihre eigenen Forschungsprogramme für selbstfahrende Autos.

Selbstfahrende Fahrzeuge werden in fünf Kategorien unterteilt, die sich durch ihr Maß an autonomem Fahren unterscheiden:

- **Stufe 1, Fahrhilfe:** Das Fahrzeug hat einen Tempomaten und kann selbst beschleunigen oder verlangsamen.
- **Stufe 2, teilweise Automatisierung:** Das Fahrzeug kann selbst in der Fahrspur bleiben und anderen Fahrzeugen ausweichen.
- **Stufe 3, bedingte Automatisierung:** Das Fahrzeug kann andere Autos überholen, die Fahrspur wechseln und selbst parken, doch für komplexe städtische Gebiete und für Autobahnauf- und -abfahrten wird ein Fahrer benötigt.
- **Stufe 4, hohe Automatisierung:** Das Fahrzeug kann selbst fahren, jedoch nur in einem eingeschränkten Bereich wie einem Flughafen, einem städtischen Gebiet oder indem es einer im Voraus festgelegten Route folgt, die einprogrammiert wurde.
- **Stufe 5, volle Automatisierung:** Das Fahrzeug kann in jeder Situation und in jedem Gelände ohne einen Fahrer selbst fahren, mit Anpassungen an die Verkehrsverhältnisse in Echtzeit.

Heute hat der »verbesserte Autopilot« von Tesla bereits viele Merkmale eines selbstfahrenden Autos der Stufe 3. Elon Musk sagte im Jahr 2016, dass es nicht mehr als zwei Jahre bis zu einem völlig selbstfahrenden Auto dauern werde: *»Ich halte das autonome Fahren wirklich für ein gelöstes Problem ... Ich glaube, dass*

wir wahrscheinlich weniger als zwei Jahre davon entfernt sind.»^[134] In Deutschland steht Audi kurz davor, die Möglichkeiten des selbstfahrenden Autos der Stufe 3 zu verwirklichen, der A8 Sedan, der 2018 verkauft wird, hat die Technologie schon.^[135] Daimler arbeitet zusammen mit Bosch an der Erstellung städtischer Taxisysteme der Stufe 4 bis 2020.^[136] Und BMW hat sich das Ziel gesetzt, bis 2021 Autos mit voller Fahrautonomie der Stufe 5 zu verkaufen.^[137]

Wenn die Autonomie der Stufe 5 erreicht ist, könnte der Besitz eines Autos für die meisten Vergangenheit sein. Das amerikanische Beratungsunternehmen RethinkX hat in dem bahnbrechenden Report »Rethinking Transportation« vom April 2017 errechnet, dass ein Netz aus selbstfahrenden Autos die Fahrtkosten pro Kilometer bis zum mehr als Zehnfachen reduzieren würde.^[138] Dies wird dadurch möglich, dass die tägliche Zeitauslastung von vier auf 40 Prozent erhöht wird – durch mehr Car Sharing und die Nutzung von Elektroautos. Da batteriebetriebene Elektroautos kaum bewegliche Teile haben, sind sie ideal für durchgängiges Fahren von bis zu einer Million Kilometer über ihre Nutzungsdauer und haben stark verringerte Wartungskosten im Vergleich zu Benzin- und Dieselfahrzeugen. Auf Basis dieser Logik glaubt RethinkX, dass in den 2020er Jahren der private Besitz von Autos stark zurückgehen wird, die Anzahl der Autos auf den Straßen um 80 Prozent verringert wird, die Öl-Nachfrage einen Höhepunkt erreicht und bis 2030 auf 70 Millionen Barrel pro Tag zurückgeht.

11. Was unterscheidet diese Energierevolution von früheren Energietransformationen?

In den letzten 200 Jahren hat die Welt mehrere vollständige Transformationen der Energiesysteme durchlaufen, vom Holz zur Kohle, von der Kohle zum Wasser und zum Erdöl und schließlich zum Erdgas und zur Atomenergie. Pessimisten argumentieren, dass es mehr als 100 Jahre dauern wird, bis erneuerbare Energieträger die jetzigen fossilen Brennstoffe ersetzt haben. Die optimistische Perspektive lautet, dass die heutige Welt innerhalb von 15 bis 30 Jahren in eine zu 100 Prozent erneuerbare Energien verwendende Gesellschaft umgewandelt werden kann. 2008 sagte hierzu der ehemalige US-Vizepräsident Al Gore:

»Heute fordere ich unsere Nation auf, sich zu verpflichten, innerhalb von zehn Jahren 100 Prozent unserer Elektrizität aus erneuerbarer Energie und aus wirklich sauberen, kohlenstoff-freien Quellen zu erzeugen. Dieses Ziel ist erreichbar, bezahlbar und transformativ.«^[139]

Das pessimistische Argument lautet, dass historisch betrachtet die Übergänge zu anderen Energieformen allesamt Verbesserungen des Energiegehalts gespeicherter Brennstoffe¹ waren, während Sonne und Wind unregelmäßige Quellen sind, die Speicherung erfordern, was sie teuer macht. Und wir verwenden heute sehr viel mehr Energie als in der Vergangenheit, als es 35 bis 55 Jahre dauerte, bis die fossilen Brennstoffe den Anteil am globalen Energiemix von fünf auf 25 Prozent steigerten.^{[140], [141]} Optimisten gründen ihr Denken oft auf einen Technologieschub und schauen dabei auf die Verbesserungen der Geschwindigkeit von Mikroprozessoren, die sich in den letzten Jahrzehnten alle 18 Monate, wie von Moore's Gesetz vorhergesagt, verdoppelte.

¹ Erdgas und Öl liefern ungefähr drei Mal so viel Energie wie Holz, Kohle hat ungefähr das Zweifache des Energiegehalts von Holz.

Leider kann dies nicht direkt auf den Energiebereich übertragen werden, wo sich die Technologie viel langsamer entwickelt.^[142]

Solche Vergleiche sind zwar als gedankliche Konzepte interessant, aber unvollständig, weil mehrere Faktoren diese Energierevolution im Vergleich zu Energieübergängen in der Vergangenheit einmalig machen: Technologietransfers, Dezentralisierung, Engagement der Regierungen und Geschwindigkeit der Innovationen.

- **Technologietransfer** – Die Welt von heute ist vernetzt und der Technologietransfer zwischen den Ländern geschieht schnell. Es dauerte nur zehn Jahre, bis China Windturbinenhersteller in der Europäischen Union und den Vereinigten Staaten technologisch eingeholt hatte. Wie? Goldwind, Chinas größter Hersteller von Turbinen, begann 1997, indem es von Jacobs Energie, Deutschland, die Lizenz für 600-kW-Turbinen erwarb. Sein nächster Schritt war die Herstellung von hochentwickelten, getriebelosen 1,2-MW-Turbinen aus einer Entwicklung der Schweizer Firma Vensys. 2008 wurde Geschichte geschrieben, als Goldwind einen Anteil von 70 Prozent an Vensys erwarb, wodurch Goldwind den Zugang zu geistigem Eigentum und Vensys zu Finanzkapital erhielt. Heute ist Goldwind der größte Windturbinenhersteller der Welt und gilt mit seiner getriebelosen 6-MW-Offshore-Turbine auch führend in der Forschung.^{[143]-[146]} Seit Mitte 2014 hilft Tesla dabei, neue Erfolgsgeschichten im Bereich Verkehr zu schreiben – wie Goldwind im Bereich Elektrizität –, da Tesla die Nutzung aller Patente für Elektroautos ohne Nutzungs- oder Lizenzgebühren kostenlos genehmigt.^[147] Toyota und Ford erlauben Wettbewerbern jetzt ebenfalls die Nutzung ihrer Patente für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge, jedoch nur mit einem Lizenzvertrag für eine begrenzte Zeit.^{[148]-[150]}
- **Dezentralisierung** – Die dezentralisierte, modulare Art der Erzeugung von Wind- und Sonnenenergie beschleunigt die Errichtung und Erweiterung dieser Anlagen. Während der Bau

einer Erdgas-, Kohle- oder Atomkraftanlage durchschnittlich zwei, vier beziehungsweise sieben Jahre dauert, wird für den Bau eines Wind- oder Solarparks nur ein Jahr benötigt.^[151] Es sind keine zusätzliche Versorgungsinfrastruktur für Kraftstoffe und vertragliche Vereinbarungen erforderlich, es muss kein Uran, Erdgas oder Kohle gewonnen, angereichert oder importiert werden, wodurch auch die erforderliche Zeit verringert wird. Anders als bei früheren Übergängen können sich Gemeinden und sogar Einzelpersonen an der Investition beteiligen. Im führenden Sonnenenergieland Deutschland werden jedes Jahr 15 bis 40 Prozent der verkauften Solarmodule von Haushalten gekauft und der Rest von größeren Institutionen und Versorgungsunternehmen.^[152]

- **Engagement der Regierungen** – Angetrieben von der Sorge um die Energiesicherheit und den Klimawandel haben sich viele Regierungen verpflichtet, das Wachstum der erneuerbaren Energien und Elektroautos zu beschleunigen. Das bedeutet großzügige finanzielle Förderung in zweistelliger Milliardenhöhe und regulatorische Unterstützung, die saubere Energiequellen priorisiert, um Investitionen von hunderten von Milliarden anzustoßen. Bei früheren Übergängen gab es diese Unterstützung nicht. Auch die zunehmende Optimierung und Spezialisierung zwischen den Ländern in Bezug auf bestimmte Technologien führt zu schnelleren Fortschritten, während früher die einzelnen Länder alles alleine machten.
- **Geschwindigkeit der Innovation** – Heute gibt es in den großen Volkswirtschaften tausende Netzwerke aus Investoren, staatlichen Forschungs- und Entwicklungsorganisationen, Unternehmen und Existenzgründern. Diese Bereiche waren in den Ländern vor den 1950er-Jahren viel mehr voneinander getrennt und basierten oft nur auf einer Handvoll Menschen. Das Risiko war groß, dass die Bemühungen zu einem Jahre oder Jahrzehnte langen Stillstand kommen würden: aus Geldmangel, aus Alters- oder anderen Gründen. Viele wissen nicht, dass die erste kommerzielle Solarwärmanlage zum Pumpen von Wasser im

industriellen Maßstab auf einer 30 000 Morgen großen Plantage in den 1910er-Jahren von dem deutschen Ingenieur Frank Schumann in Ägypten und im Sudan gebaut wurde. Bei Ausbruch des Ersten Weltkriegs gab das Team das Projekt auf und Schumann starb gegen Ende des Krieges, wodurch der ganze Fortschritt endete, bis 60 Jahre später die Arbeit in Italien und in den Vereinigten Staaten erneut aufgenommen wurde.^[153]

12. Leben wir bereits in einer Zeit, die die fossilen Brennstoffe hinter sich lässt?

Es wird zwar wenig darüber in den weltweiten Nachrichten berichtet, doch die letzten drei Jahre haben den Rekord in Bezug auf die Erzeugung von Elektrizität gebrochen. Das Wachstum wurde von Wind-, Wasser- und Sonnenenergiequellen in jedem der letzten drei Jahre dominiert (vergleiche Tabelle 2). Tatsächlich haben wir in Bezug auf Elektrizität bereits die zweite Phase der Energierevolution erreicht, in der das Wachstum von sauberer Energie dominiert. Wegweisende Politik und Investitionen in Dutzenden Ländern, wie zum Beispiel in Deutschland, China, Nordamerika, Dänemark, Portugal, Kenia und Uruguay haben dies ermöglicht. Und bemerkenswerterweise war 2015 bei der Verwendung von fossilen Brennstoffen zur Stromgewinnung ein gewaltiger Rückgang zu verzeichnen, der größtenteils auf eine geringere Verwendung von Kohle in den Vereinigten Staaten zurückzuführen ist, während Sonne und Wind alle anderen Quellen überholten.

Für die Verwendung von Erdöl und die Entwicklung der Mobilität ist das Bild nicht so vorteilhaft. Trotz großer Anstrengungen von Tesla und anderen hat das Wachstum der sauberen Energie im Verkehr global noch nicht zugelegt. Weltweit ist die gesamte Erzeugung von flüssigen Kraftstoffen einschließlich aller Arten Öl und Biokraftstoffen 2015 um 3,2 Prozent und 2016 um 0,5 Prozent auf eine tägliche Produktionsmenge von 92,2 Millionen Barrel gestiegen. Biokraftstoffe trugen weniger als ein Hundertstel zu diesem Wachstum bei, wobei die Produktion 2016 auf 1,5 Millionen Barrel pro Tag stieg. Bei den Pkw machen Elektroautos und Plug-in-Hybride bei im Jahr 2016 insgesamt 69 Millionen verkauften Autos mit 750 000 verkauften Autos weniger als ein Prozent dieser Gesamtzahl aus. Bis jetzt sind keine weiteren wichtigen Alternativen wie Wasserstoff, Methanol oder Ammoniak eingeführt worden.

Werte in TWh	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Differenz 2014-2015
Stromerzeugung insgesamt	21 494	22 185	22 753	23 336	23 764	23 963	199
Fossile Brennstoffe	14 509	15 116	15 535	15 779	15 913	15 827	- 86
Saubere Energie	6 985	7 069	7 218	7 557	7 850	8 136	285
Nach Quelle:							
Kohle	8 659	9 138	9 158	9 568	9 726	9 401	- 325
Erdgas	4 813	4 887	5 100	5 066	5 154	5 313	159
Heizöl	970	1 066	1 138	1 145	1 034	1 113	79
Kernkraft	2 768	2 653	2 472	2 493	2 543	2 577	34
Wasser	3 466	3 516	3 693	3 822	3 908	3 946	38
Solar	33	64	102	143	191	253	62
Wind	342	436	526	644	716	841	125
Sonstige erneuerbare Energieträger	376	400	425	456	492	518	26

Tabelle 2: Globale Stromerzeugung nach Quellen von 2010 bis 2015 in Tera-Watt-Stunden (TWh).^{[154]-[156]}

Die dritte Energiesäule – Wärme – weist einen hohen Anteil erneuerbarer Quellen auf, doch in letzter Zeit gab es keine so großen Verbesserungen (vergleiche Tabelle 3). Weltweit verwenden wir bereits 36 Prozent erneuerbare Energie für die Wärmeerzeugung, hauptsächlich aus Biomasse, und wir befinden uns bereits ein gutes Stück in der zweiten Phase der Energierevolution. Doch der Verbrauch von fossilen Brennstoffen wächst noch, wenn auch in letzter Zeit langsamer als die erneuerbaren. Das verlangsamte Wachstum in punkto fossile Brennstoffe geht auf die rückläufige Verwendung von Kohle zum Heizen in den letzten drei Jahren zurück. Wenn wir uns die erneuerbaren Energieträger anschauen, dann wächst der Solarwärmeanteil zwar stetig, aber noch viel zu wenig, um wirklich an Bedeutung zu gewinnen. Und der Anteil der Biomasse, der hauptsächlich aus dem herkömmlichen Verbrennen in kleinen Öfen und Feuern kommt, ist größtenteils stabil geblieben.

Werte in GJ	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Differenz 2014-2015
Wärmeerzeugung insgesamt	128 635	130 979	133 567	137 225	137 674	139 050	1377
Fossile Brennstoffe	83 831	85 372	86 616	87 694	88 925	89 128	203
Saubere Energie	44 803	45 607	46 952	49 532	48 748	49 922	1.174
Nach Quellen:							
Kohle*	27 083	28 348	29 338	30 096	29 916	28 658	- 1258
Erdgas	40 860	41 296	41 231	41 845	42 539	43 481	942
Erdölprodukte	15 888	15 728	16 047	15 752	16 470	16 989	519
Biomasse**	44 003	44 667	45 865	48 303	47 412	48 506	1095
Geothermie	62	77	92	95	103	106	3
Kernkraft	27	28	28	28	28	28	0
Solarthermie	711	835	967	1106	1206	1283	77

* Kohle einschließlich Torf.

** Biomasse einschließlich moderne und herkömmliche Holzbrennstoffe, Reste, Biogas und Abfälle von Gemeinden.

Tabelle 3: Globale Wärmeerzeugung nach Quellen von 2010 bis 2015 in Gigajoules (GJ) (einschließlich Umwandlungsverluste bei der Verbrennung von Brennstoffen und geothermisch).^{[156]-[163]}

13. Wie viel Energie braucht die Welt, wie viel Deutschland?

Die Entwicklung der Weltwirtschaft geht Hand in Hand mit der Zunahme des Energieverbrauchs, da Verkehr, Elektrizität und Wärme die moderne Welt funktionieren lassen. Das Wachstum der Weltwirtschaft von 32 Prozent von 2005 bis 2015 führte zu einer Steigerung des Weltenergieverbrauchs von 25 Prozent.^[163]^[164] In Deutschland traf das Wirtschaftswachstum von 15 Prozent vordergründig mit einem Rückgang des inländischen Energieverbrauchs zusammen. Berücksichtigt man jedoch die Energieverwendung im Zusammenhang mit Nettoimporten oder Gütern, ist der Energieverbrauch Deutschlands tatsächlich um 10 Prozent gestiegen. Der zukünftige Energiebedarf hängt somit davon ab, wie groß (oder klein) die Wachstumsrate sein wird, und davon, wie effizient Güter und Dienstleistungen produziert werden können.

Üblicherweise nimmt man anfangs eine hohe Rate des Wirtschaftswachstums von 3 bis 5 Prozent an und extrapoliert diese mehrere Jahrzehnte in die Zukunft. Energieagenturen wie die Internationale Energieagentur (IEA) und die US-amerikanische Energy Information Administration (EIA) sowie Erdöl- und Erdgasunternehmen wie ExxonMobil und BP berechnen so den jeweiligen Energiebedarf. Die Wirtschaftsprognose wird umgesetzt in Nachfrage nach Energie, indem man die zukünftige Energieintensität (Energie pro Einheit der Wirtschaftsleistung) annimmt. Im World Energy Outlook 2016 geht die IEA von einer Wachstumsrate von 3,5 Prozent bis 2040 aus, was bedeutet, dass die Weltwirtschaft in 25 Jahren 2,5 Mal größer sein wird. Und sie schätzt, dass dies zu einem um 48 Prozent höheren Energieverbrauch bis 2050 führen wird, da die Energieintensität um fast die Hälfte zurückgeht. Mit anderen Worten, eine Einheit Energie führt bis 2040 zu einer doppelten Wirtschaftsleistung (vergleiche Abbildung 4).^[165]-^[167]

In Deutschland hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) das Ziel gesetzt, den Energieverbrauch im Land

von 2008 bis 2050 um 50 Prozent zu senken.^[168] Das würde einen vierfachen Rückgang der Energieintensität bedeuten, wenn das fortgesetzte Wachstum bis 2050 zu einer um 50 Prozent größeren Wirtschaft führt, wie in vom BMWi in Auftrag gegebenen Energie-/Wirtschaftsanalysen angenommen wird.^[169] Mit anderen Worten, eine Energieeinheit würde bis 2050 eine vier Mal so hohe Wirtschaftsleistung erbringen. Abgesehen von der Fragwürdigkeit dieser Prognosen in Bezug auf Wachstum und Senkung der Energieverwendung, gibt es noch einen weiteren Vorbehalt. Das Ziel des BMWi berücksichtigt nicht, dass der Hauptteil des hohen Energieverbrauchs in Produktionsfabriken im Ausland erfolgt, für Güter, die zwar in Deutschland verbraucht – aber nicht hergestellt werden.

Die größte Unsicherheit in den Prognosen der Energienachfrage Deutschlands und der Welt ist das Szenario des Wirtschaftswachstums. Nach dem Beginn der Kreditkrise 2007/2008 nahm die Energienachfrage in den entwickelten Volkswirtschaften zunächst ab, stieg dann 2010 wieder langsam, wenn auch in einem niedrigeren Tempo. Die Wirkung war gewaltig, als die weltweite Energienachfrage von 2008 auf 2009 um 1,6 Prozent zurückging und jetzt ein ganzes Prozent weniger wächst als vor Beginn der Kreditkrise (da die Wirtschaft langsamer wächst). 2016 war die gesamte Energieverwendung in Deutschland, den

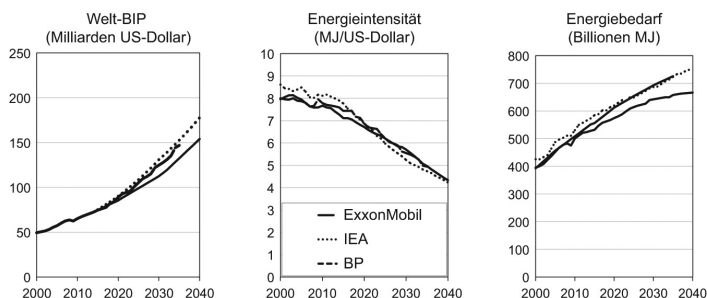


Abbildung 4: Prognosen des Wirtschaftswachstums (links), Energieverwendung pro Person (Mitte) und Energieverbrauch (rechts) bis 2040 von BP, ExxonMobil und der IEA.^{[165]-[167]}

Vereinigten Staaten, in Frankreich und Italien immer noch nicht so hoch wie in den Jahren 2007 und 2008.^[163] Wenn noch eine Schuldenblase zerplatzt und die Volkswirtschaften schrumpfen, könnten alle aktuellen Energieszenarien in den Papierkorb geworfen werden.

Wir können das auch aus der Perspektive des jeweiligen Landes betrachten. Sagen wir, es gäbe drei verschiedene Arten von Volkswirtschaften:

- Die »**Länder mit niedrigem und niedrigen mittleren Einkommen**«¹ mit einer Bevölkerung von ungefähr 3,6 Milliarden Menschen, auf die etwa 12 Prozent der gesamten Energienutzung entfällt. Ihre Infrastruktur ist bei weniger als 50 Fahrzeugen pro 1000 Menschen und einer jährlichen Stromerzeugung unter 1500 kWh pro Person, einschließlich des Energiebedarfs der Produktion, begrenzt. Die Wirtschaft von Ländern wie Nepal, Ghana oder Bangladesch besteht oft größtenteils immer noch aus Landwirtschaft.
- Eine Gruppe von »**Ländern mit oberen mittleren Einkommen**« mit einer Bevölkerung von circa 2,4 Milliarden Menschen, auf die ungefähr 35 Prozent der gesamten Energieverwendung entfällt. Diese aufstrebenden Volkswirtschaften wie Mexiko, Thailand und China haben eine Infrastruktur, die schnell ausgebaut wird, und der Bereich Produktion dominiert die Wirtschaft. Der Besitz von Autos liegt bei 50 bis 400 Fahrzeugen pro 1000 Menschen und die jährliche Stromerzeugung liegt zwischen 1500 bis 5000 kWh pro Person.
- Die Gruppe der »**Länder mit höherem Einkommen**« mit einer Bevölkerung von circa 1,4 Milliarden Menschen, auf die

¹ Die Definitionen für die Einstufung der Einkommen wurden von der Weltbank erstellt, die Länder mit niedrigen Einkommen für das Jahr 2017 als Volkswirtschaften definiert, in denen die Menschen ein Bruttovolkseinkommen pro Kopf von 1025 US-Dollar oder weniger haben. Niedrigere mittlere Einkommen reichen von 1026 bis 4035 US-Dollar, höhere mittlere Einkommen von 4036 bis 12 475 US-Dollar und hohe Einkommen liegen bei über 12 476 US-Dollar pro Kopf.

ungefähr 53 Prozent der gesamten Energienutzung entfällt. Ihre Infrastruktur ist in jedem Bereich vollständig ausgebildet und sie stützen sich wie zum Beispiel die Vereinigten Staaten, Deutschland und Südkorea zusätzlich zum Sektor Produktion, Landwirtschaft und Rohstoffgewinnung stark auf Dienstleistungen. 400 bis 800 Autos kommen auf 1000 Menschen, und die Stromerzeugung liegt bei 5000 bis 20 000 kWh pro Person.

Jeder dieser Ländertypen hat ganz andere Ausgangspunkte hinsichtlich Infrastruktur und Energieverwendung. Eine allgemeine Faustregel lautet, dass drei bis vier Mal mehr Energie verwendet und Infrastruktur errichtet wird, wenn ein Land in eine höhere Einkommensgruppe vorrückt. Damit alle den Lebensstil der oberen mittleren Einkommensklasse erhalten, müsste die Verwendung von Energie um 30 Prozent zunehmen. Damit alle den Lebensstil eines höheren Einkommens erhalten, ist eine Verdreifachung der gesamten Energieverwendung erforderlich.

Das Beispiel China, das sich in den letzten Jahren von einem Land mit niedrigerem Einkommen schnell zu einem Land der oberen mittleren Einkommensgruppe entwickelte, zeigt diese Wirkung. Nach einer Verdreifachung des Energieverbrauchs von 2000 bis 2015 ist China jetzt das Land mit der weltweit höchsten Energienutzung. In diesem Zeitraum baute China 1,23 Millionen Kilometer Asphaltstraßen, 58 600 Kilometer Gleise, fast 1000 GW Kraftwerkskapazität (mehr als die gesamte Kapazität aller 28 Staaten der Europäischen Union) und Millionen neuer Gebäude von 2005 bis 2015.^{[170]-[173]} Seit 2013 hat sich das Wachstum der Energieverwendung Chinas verlangsamt, weil die Produktion von Stahl und Zement bei 70 bis 200 Millionen Tonnen pro Monat stagnierte.^{[174], [175]} Nachdem die Infrastruktur des Landes fast ausgebaut ist, braucht es nicht länger einen so großen Materialeinsatz und das Wachstum der Energieverwendung wird viel langsamer sein als in der Vergangenheit. Dennoch benötigt das Land viel mehr Energie als vorher, um seine Infrastruktur aufrechterhalten und nutzen zu können.

Die Geschichte Chinas könnte sich auch anderswo ereignen – in Indien, Afrika und Lateinamerika – wenn auch vielleicht in einem langsameren Tempo. Heute hat Indien mit 1,26 Milliarden Bürgern 24 Millionen Autos, doch die Nachfrage nach Erdöl (oder Strom) wird stark zunehmen, wenn dies auf 600 Millionen Autos in den nächsten 30 bis 50 Jahren steigt. Und viele andere Länder arbeiten an einer massiven Beschleunigung des Infrastrukturausbaus, die zusammen leicht ein »drittes China« bilden würden, wie zum Beispiel Indonesien (258 Millionen Menschen), Bangladesch (161 Millionen Menschen), Nigeria (182 Millionen Menschen) und Äthiopien (99 Millionen Menschen).

14. Von den fossilen zu alternativen Energieträgern: Welche Szenarien gibt es?

Wir verwenden fossile Energie für viele verschiedene Dinge, von Fahrzeugen bis zu elektrischen Geräten, Wärme und Kochen, das Schmelzen von Eisen in Hochöfen. Es sind viele Szenarien des Übergangs zu sauberen Energieträgern denkbar, nachfolgend werden nur die wichtigsten aufgeführt. Ihre Auswirkungen wurden aus einer Berechnung ermittelt, die wir 2015 für den weltweiten Energieverbrauch erstellten und die im Anhang A verfügbar ist.

Einfache Hebel mit großer Auswirkung, die die Verwendung von erneuerbaren Energieträgern steigern, sind unter anderen:

- **Elektroautos und -motorräder**, da Motorräder, die Strom verwenden, effektiv in Bezug auf die Kosten und die Lebensdauer-Reichweite sind, was auf Elektroautos noch mehr zutrifft. Wenn weltweit die volle Umstellung durchgeführt würde, würde die Verwendung von Erdöl um 31 Prozent verringert, während die Nutzung von Strom um 24 Prozent zunehmen würde.
- **Strom auf Wind- und Sonnenbasis unterstützt von Erdgas**, da die Kosten von Wind- und Solarmodulen weiter fallen werden und derzeit die Lücken durch Erdgas in der Zeit überbrückt werden können, in der Wind- und Sonnenenergie nicht erzeugt werden. Ungefähr 77 Prozent der Verwendung von Kohle und 7 Prozent der Erdölnutzung können verdrängt werden, wenn sie durch Strom aus Sonnen- und Windenergie ersetzt werden, der, von der heutigen Größenordnung ausgehend, um das Zehnfache steigen müsste.
- **Umstellung der Beheizung von Häusern und des gewerblichen Bereichs auf Sonnenenergie**, da 85 Prozent der Weltbevölkerung in sonnigen Ländern leben. Sonnenenergie kann große Mengen des heute in Heizkesseln und Lampen verwendeten Erdgases, Erdöls und Kohle ersetzen. Wenn zwei

Drittel auf Sonnenwärme umgestellt werden könnte, würden fast zehn Prozent des Erdgasverbrauchs, vier Prozent des Erdölverbrauchs und drei Prozent des Kohleverbrauchs verdrängt.

- **Kochen mit effizienter Biomasse und Induktion**, da die Verwendung von Biomasse größtenteils immer noch ineffizient ist und die moderne Biomassentechnologie den Verbrauch um bis zu 28 Prozent senken könnte (beziehungsweise diese Biomasse für mehr Menschen verfügbar machen könnte). Reichere Länder können auch über Induktionskochen auf Strom umstellen, da die Induktion fast zu 90 Prozent effizient ist. Wenn alles Kochen mit Erdgas oder Kohle in den privaten Haushalten auf Strom umgestellt würde, würde die Verwendung von Kohle und Erdgas um fünf Prozent beziehungsweise ein Prozent zurückgehen, im Verhältnis zu einer Steigerung der Stromerzeugung um sieben Prozent (oder das Doppelte der heutigen Erzeugung von Wind- und Sonnenenergie).

Mehrere Umstellungen sind schwer zu bewerkstelligen, weil die Alternativen noch kostspielig und technisch anspruchsvoll sind. Einige der schwer vorherzusehenden Szenarien sind:

- **Schifffahrt**, da die Alternativen für die Verwendung von fünf Prozent des Erdöls für den Waren-Ferntransport begrenzt sind und es nur Wasserstoff als mögliche Erneuerbare-Energie-Alternative (heute immer noch zu teuer) gibt. Für die ein Prozent des von der Binnenschifffahrt verwendeten Erdöls kann zunehmend Strom verwendet werden.
- **Lkw-Transport**, da die Effizienz des Dieselmotors für Schwertransport schwierig zu ersetzen ist. Die beste Alternative sind heute e-Highways mit Oberleitungen für Elektro-Lkw-Transport über kurze Entfernungen. Auf den Straßen werden heute ungefähr zwölf Prozent des Erdöls für die 80 Millionen schweren Lkws verwendet.
- **Flugzeuge**, da Flugzeuge mit minimalem Gewicht in großer Höhe über weite Strecken fliegen. Batterien sind zu schwer,

genau wie Speichertanks für Wasserstoff, die notwendig sind, um mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen funktionieren zu lassen. Die sieben Prozent des für das Fliegen verwendeten Erdöls werden sich nicht so bald beseitigen lassen.

- **Verwendung von Industrieenergie**, da für solche Nutzungen wirklich hohe Temperaturen von mehreren hundert bis über 1000 Grad Celsius erforderlich sind und Strom für industrielle Zwecke üblicherweise 0,05 US-Dollar oder weniger kostet.

15. Also verliert »Big Oil« den Energie-Krieg?

Nach dem Anstieg der Ölpreise 2008 ändert eine bemerkenswerte Entwicklung das Gesicht der Erdölbranche. Fast alle großen Erdöl- und Erdgasunternehmen haben jetzt große Schwierigkeiten, ihre Ölreserven aufzufüllen, und bei mehreren geht die Förderung von Erdöl zurück. Die acht großen internationalen Ölgesellschaften aus Nordamerika und Europa,¹ die traditionell die Ölmärkte beherrscht haben, verzeichneten, mit Ausnahme von ExxonMobil und Chevron, einen Rückgang in der Förderung von zehn bis 20 Prozent, und die Zukunftsreserven konnten kaum noch beibehalten werden. Ihr Anteil an der weltweiten Erdölgewinnung beträgt jetzt nur noch zwölf Prozent, ein Rückgang von 17 Prozent im Vergleich zum Stand von vor nicht mal zehn Jahren. Zur gleichen Zeit sind die Explorations- und Erschließungskosten für diese Unternehmen von weniger als 10 US-Dollar pro Barrel auf mindestens 30 US-Dollar pro Barrel gestiegen. Eine Investition in die großen Ölgesellschaften wird immer weniger attraktiv und die Rendite des investierten Kapitals fällt von zehn Prozent und mehr auf circa fünf Prozent. Im Jahr 2015 hatten Total, Shell und Statoil ihren Aktionären sogar unfassbar negative Kapitalrenditen beschert.²

Bei dem Versuch, das Wachstum der fossilen Brennstoffe angesichts der langfristig begrenzten Aussichten für Erdöl zu verlängern, haben sich die acht Gesellschaften auf eine vom Erdgas getriebene Strategie eingelassen. In Großbritannien hat Statoil die viele Millionen US-Dollar teure Kampagne »*Fuelling the Future*« begonnen, um das Image von Erdgas zu verbessern. ExxonMobil verkündete die Botschaft, dass die Gesellschaft im Rahmen ihrer Kampagne »*Energy Lives Here*« mehr Strom aus

1 Die Gruppe setzt sich zusammen aus BP, Chevron, ConocoPhillips, ENI, ExxonMobil, Shell, Statoil und TOTAL.

2 Werte von Bloomberg Finance auf der Grundlage von Bilanzzahlen.

Erdgas produziert als je zuvor. Und der Slogan von Total »*committed to better energy*« (unser Engagement für bessere Energie) dient als weltweite Kampagne, in der das Erdgas eine wichtige Rolle spielt. In den letzten drei Jahren haben Conoco-Phillips, Eni, Shell, Total und ExxonMobil so viel Erdgas wie Erdöl oder sogar mehr produziert.

Diese Strategie dürfte nur dann ausreichend sein, wenn Erdgas die vorherrschende Energiequelle wird. Autohersteller und Regierungen investieren jetzt viel in alternative Fahrzeuge (siehe Abschnitt 7). Wenn Phase 2 in unserer Energierevolution in den 2020er-Jahren erreicht wird, wenn also die zunehmende Fahrzeugnutzung überwiegend von Elektroautos abgedeckt wird, wird sich das Wachstum des Ölverbrauchs abschwächen und wir erreichen möglicherweise »peak oil demand«, den Zeitpunkt, ab dem die Nachfrage nach Erdöl zurückgeht. Und obwohl in Zukunft große Mengen Strom benötigt werden, dürfte das Erdgas eher zunehmend als Ergänzung zur Sonnen- und Windenergie und zum Ausgleich der täglichen Schwankungen verwendet werden und nicht als die wichtigste Energiequelle.

Ihre Investitionen in Forschung zeigen ganz klar, dass die großen Ölgesellschaften nicht über das Erdgas hinaus planen. Zwischen 2010 und 2015 wurde die Rekordsumme von 500 Milliarden US-Dollar der hohen Gewinne aus dem Erdöl für Aktienrückkäufe und Dividendenzahlungen verwendet. Im Vergleich dazu betrugen die gesamten Forschungsausgaben nur 33 Milliarden US-Dollar beziehungsweise circa 1,5 Prozent der Bruttogewinne und diese wurden überwiegend für Erdöl und Erdgas ausgegeben. Nur eine Verdopplung der Ausgaben für die Forschung zu sauberer Energie würde einen großen Unterschied ausmachen. Die schnelle Verringerung der Kosten für Strom aus Sonnenenergie in den letzten fünf Jahren erfolgte vor dem Hintergrund weltweiter Ausgaben für Forschung der Unternehmen und Regierungen von insgesamt 29 Milliarden US-Dollar.²⁴

16. Wie kann die Energierevolution beschleunigt werden?

Stellen Sie sich die Welt im Jahr 2050 vor, in der saubere Energieträger den Energiemix dominieren. Wie müssen aktuelle Entwicklungen beschleunigt werden, damit diese dritte Phase der Energierevolution erreicht wird? Wie müssen die Ausgaben für Projektinvestitionen, Arbeitsplätze und Forschung skaliert werden beim Wechsel von fossilen Brennstoffen zu sauberen Energiequellen?

Damit Elektrofahrzeuge bis 2050 auf den Straßen in der Mehrzahl sind, müssen die Verkäufe von heute 0,75 Millionen auf circa 15 Millionen bis 2030, bis um die 50 Millionen bis 2040 und 100 Millionen bis 2050 steigen – auch unter der Annahme, dass die Anzahl der benutzten Fahrzeuge auf zwei Milliarden steigen wird. Bei dieser Geschwindigkeit werden bis 2050 zwei von drei verkauften Autos Elektroautos sein. Da die Produktionskapazitäten bei den Autoherstellern bereits vorhanden sind, müssten die bestehenden Fabriken auf die Produktion von batteriebetriebenen Autos umgerüstet werden.

Die größten Herausforderungen sind die große Ausweitung der Batterieproduktion und die für die Produktion benötigten Mineralien Lithium und Kobalt. Bei dieser Ausweitungsgeschwindigkeit muss bis 2030 drei Mal mehr Lithium gefördert werden als heute und 25 Mal mehr bis 2050.^{[179]-[181]} Hohe Investitionen in die Förderung von Lithium und in das Recycling von Batterien sind erforderlich, da sonst am Ende dieses Jahrhunderts die bekannten Förderstätten von Lithium erschöpft sein werden.^{[182], [183]} Bei diesem Wachstum würden die Kobaltreserven in wenigen Jahrzehnten erschöpft sein und der zeitliche Aufschub, den eine breitere Rohstoffbasis gibt, wäre

begrenzt.^{[184], 1} Der Ersatz von Kobalt in Batterien ist daher für den langfristigen Erfolg von Elektroautos unerlässlich, wenn nicht eine vorteilhafte und mit niedrigem Schwund versehene Recycling-Kette für Batterien geschaffen werden kann.^{[185], [186]}

Wenn wir weltweit vor 2030 einen Anteil von mindestens 50 Prozent und bis 2050 von 75 Prozent sauberer Energieträger im Strommix erreichen wollen, brauchen wir die zehn- beziehungsweise zwanzigfache Anzahl Solarmodule und das Fünfbeziehungsweise Zehnfache der heute verfügbaren installierten Windkraftkapazitäten. Selbst wenn wir davon ausgehen, dass die Erzeugung von Energie aus Kohle und Erdöl schrittweise ausläuft, würde sich die Stromerzeugung in diesem konservativen Szenario immer noch verdoppeln, während Erdgas seinen derzeitigen Anteil an der Stromerzeugung beibehält.² Tatsächlich ist der Sprung dorthin ziemlich klein. Die derzeitige weltweite Herstellungskapazität für Solarmodule müsste sich in den nächsten 15 Jahren vervierfachen, die Stromerzeugung der Windräder verdreifachen und beide müssten diese Kapazitäten bis 2050 beibehalten.

- 1 Heute werden ungefähr 124 000 Tonnen Kobalt gefördert, bei Reserven von 7,1 Millionen Tonnen. Für Batterien werden pro Elektroauto ungefähr sechs Kilogramm Kobalt benötigt oder 600 000 Tonnen für die Herstellung von 100 Millionen Elektroautos. Bei festgestellten Reserven von 25 Millionen Tonnen, was nicht viel ist, gibt es noch Spielraum für die Ausweitung der Reserven. Nur wenn wir anfangen, die Reserven in der Tiefsee zu fördern, die 120 Millionen Tonnen betragen sollen, reichen die Reserven für das 21. Jahrhundert.
- 2 Die Annahmen beinhalten eine Zunahme der Atom- und Wasserkraft von 30 Prozent beziehungsweise 35 Prozent bis 2050. Konzentrierte Solarenergie, Geothermie und Bioenergie wurden absichtlich auf dem heutigen Stand belassen. Um den derzeitigen Anteil an der Gesamtkapazität beizubehalten, muss der Erdgasverbrauch von 1500 auf 2600 GW erhöht werden, was zu zwei Einheiten Erdgas für je fünf Einheiten Sonnen- oder Windenergie zum Ausgleich führt, und weshalb eine begrenzte Batteriekapazität für die Speicherung von Strom erforderlich wäre. Der Ersatz sämtlicher bereits vorhandener und zukünftiger Kraftwerke wurde auf der Grundlage einer Nutzungsdauer von 25 Jahren für Solar- und Windtechnologien und 50, 40 und 30 Jahren für die Erzeugung von Strom aus Kohle beziehungsweise Erdgas oder Heizöl und Atomkraft berücksichtigt.

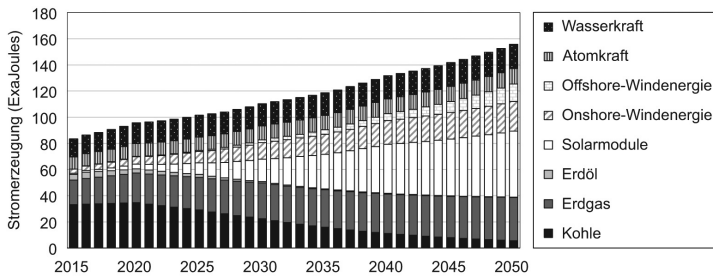


Abbildung 5: Szenario der Stromerzeugung bei einem Anteil von 75 Prozent sauberer Energie am Energiemix bis 2050.

Bei einer konservativen Kostenschätzung – einer Verringerung der Kosten um 20 Prozent beziehungsweise 30 Prozent für Wind- und Sonnenenergie bis 2050 – müssen für dieses Szenario die jährlichen Investitionen in Wind- und Sonnenenergie um ungefähr das 2,5fache bis 2030 steigen und auf diesem Niveau bleiben (vergleiche Abbildung 5). Im Jahr 2015 wurden für die Errichtung von Solar- und Windenergieanlagen 270 Milliarden US-Dollar ausgegeben, was 0,4 Prozent des weltweiten Brutto-sozialprodukts entspricht, und 125 Milliarden US-Dollar zur Energiegewinnung durch fossile Brennstoffe.^[187] Im Vergleich dazu beliefen sich die Ausgaben für die Energieerzeugung mittels fossiler Brennstoffe in den 1970er-Jahren auf circa 0,6 Prozent des wirtschaftlichen Vermögens der Welt und seit den 1980er-Jahren auf fast 0,2 Prozent.³ Die Kosten, die zusätzlich getragen werden müssen, um den Übergang zu beschleunigen, sind also hoch, aber nicht außerordentlich hoch. Die Einsparungen an fossilen Brennstoffen, für die 2015 für die Stromerzeugung mindestens 600 Milliarden US-Dollar ausgegeben wurden, sind dabei noch gar nicht einbezogen.⁴

³ Auf der Grundlage historischer Werte der Kapitalinvestitionen bis in die 1970er-Jahre, die jährlich realisierte Kapazität für die verschiedenen fossilen Brennstoffe, inflationsbereinigt anhand des realen Dollarwerts des Jahres 2010.

⁴ Ein durchschnittlicher globaler Ölpreis von 40 US-Dollar pro Barrel, ein Kohlepreis von 35 US-Dollar pro Tonne und ein Erdgaspreis von fünf US-Dollar pro Million BTU.

Die größte Auswirkung dieser Umstellung der Stromerzeugung auf andere Materialien würde Silber betreffen, weil sich seine Verwendung für Solarmodule bis 2030 vervierfachen muss, wenn keine weiteren Effizienzsteigerungen erfolgen. Auf Solarmodule entfallen heute acht Prozent der globalen Silber-Nachfrage, weshalb eine wesentlich höhere Silberförderung notwendig ist. Der erforderliche Einsatz anderer Materialien wie Stahl, Aluminium, Glas, Beton und Kupfer ist, bezogen auf die Weltproduktion, relativ gering und die Gewinnung von Silizium kann leicht erhöht werden. Die Arbeitsplätze in der Herstellung und im Einbau von Solar- und Windenergieanlagen müssten von ungefähr 4,4 Millionen heute bis 2030 auf 12 Millionen und bis 2050 auf 20 Millionen steigen, was auch im Bereich des Möglichen liegt.

Zusätzlich zu den Investitionen in die Kapazitätserweiterung müssen wir intensiver daran arbeiten, die wirklich harten Nüsse zu knacken. Wie können wir die Erdgasnutzung ersetzen? Wie die Lösungen für Batteriestrom für das Netz für 24 Stunden erschwinglicher machen? Wie die Effizienz von Solarmodulen von heute 17 Prozent auf über 30 Prozent in den nächsten zehn Jahren verbessern? Wie eine technisch praktikable Lösung für saisonale und tägliche Speicherung schaffen? Wie Brennstoffalternativen für Lkw, Transport per Schiff und Flugzeuge finden? Wie industrielle Wärme aus sauberen Energieträgern gewinnen? Wie begrenzt vorhandene Materialien, beispielsweise Silber, ersetzen? Wie Biobrennstoffe aus Getreide, das nicht für Ernährungszwecke genutzt werden kann, in einer kommerziellen Größenordnung verfügbar machen?

Die diesbezüglichen Ausgaben und Forschungszeiten werden für Jahrzehnte zu Dollarbeträgen in zweistelliger Höhe führen. Die schnellen Verbesserungen der Solarmodule von 2005 bis 2015 kosteten Forschungsausgaben in Höhe von 45 Milliarden US-Dollar und 16 Milliarden US-Dollar für Windenergieanlagen. Allein für Sonnen- und Windenergie brauchten wir also circa 6 Milliarden US-Dollar pro Jahr, um da zu sein, wo wir heute

sind. Heute liegen die Staatsausgaben für Energieforschung nahe bei 19 Milliarden US-Dollar pro Jahr,⁵ und die Unternehmen geben ungefähr das Dreifache aus.^[188] Es gibt 20 bis 30 Energiebereiche, in die wir Geld stecken müssen, um schnelle Fortschritte zu erzielen. Das führt zu einem Ausgabenbedarf von insgesamt 160 bis 240 Milliarden US-Dollar pro Jahr.^{[188]-[190]}

Größere Spielräume für Innovationen und die Erkundung neuer Möglichkeiten sind für mittlere, im Bereich Energietechnik tätige Firmen sehr wichtig. Bei diesen Bemühungen müssen wir bereit sein, Geld für Technologiefirmen »zu verschwenden« – von der Stufe der Demonstration der Technologien bis zur Kommerzialisierung, denn für jede Firma, die Erfolg hat, werden zehn andere Firmen pleitegehen. Auch eine stärkere Zusammenarbeit in der Forschung mit gezielter Förderung über Finanzierungsbeträge und -programme im dreistelligen Millionenbereich – statt vieler Milliarden Dollar teurer »Mondflugprogramme« wie Kernfusion und tausende kleine Forschungszuschüsse von einigen Millionen Dollar – wären hilfreich.

5 Die Höhe entspricht ungefähr der in den 1980er-Jahren während der Ölkrisen. Der große Unterschied zu den frühen 1980er-Jahren ist, dass damals mehr als die Hälfte des Betrags für die Atomenergie ausgegeben wurde. Heute ist dies der Fall für saubere Energieträger.

17. Meinen es die Regierungen wirklich ernst mit dieser Revolution?

Ende 2015 kam die bemerkenswerteste Ankündigung auf der Internationalen Klimakonferenz in Paris nicht von einem Politiker. Der Milliardär und Philanthrop Bill Gates kündigte an, dass er 21 Regierungen zusammengebracht hatte, um diese darauf zu verpflichten, ihre Forschungsausgaben für saubere Energieträger bis 2021 von 15 auf 30 Milliarden US-Dollar pro Jahr zu verdoppeln und dabei unter dem Programm Mission Innovation (siehe mission-innovation.net) zusammenzuarbeiten.¹ Er kündigte auch eine »Koalition des Durchbruchs im Bereich Energie« von über 20 Milliardären an, die zusammen pro Jahr Milliarden Dollar in einen neuen Fonds für saubere Energie investieren, um die Entwicklung neuer Energietechnologien zu beschleunigen.^[191]

Die Regierungen zur Selbstverpflichtung zu drängen, ist der Schlüssel, da die Minister normalerweise in Reaktion auf die Märkte handeln. Nachdem die Ölkrisen der 1970er- und 1980er-Jahre entschärft worden waren, sanken die Ausgaben für Energieforschung auf Tiefstände in fast allen Staaten, mit Ausnahme Großbritanniens und Japans.^[192] In Großbritannien belief sich der abgrundtiefe Rückgang von 1,7 Milliarden US-Dollar auf gerade noch 0,1 Milliarden US-Dollar, der bei steigenden Ölpreisen in den letzten zehn Jahren nur zum Teil rückgängig gemacht wurde.² Dieser Rückgang führte zum Ende der Atomenergiebranche im Vereinigten Königreich.

Die Maßnahmen der Regierungen gründen auch darauf, was in den kurzen drei- bis sechsjährigen Legislaturperioden »getan

1 Die bemerkenswertesten Verpflichtungserklärungen kamen aus China und den Vereinigten Staaten, die sich laut Zahlen von Mission Innovation verpflichteten, ihre Forschungsausgaben auf 7,6 beziehungsweise 12,8 Milliarden US-Dollar zu verdoppeln.

2 Die Beendigung der Forschungsausgaben begann mit der zweiten Thatcher-Regierung 1987 und die kürzlich erfolgte Zunahme wurde in der ersten Amtszeit von Tony Blair veranlasst.

werden kann«, um politisch zu punkten. Anfang der 2000er-Jahre wurde in den Ländern der Europäischen Union das Konzept der »Wasserstoffwirtschaft« debattiert. Ein Programm für Wasserstoffbrennzellen wurde angekündigt, mit dem 500 000 bis eine Million Autos auf der Grundlage von Wasserstoffbrennzellen bis 2020 hergestellt werden sollten. Dies sollte mit Ausgaben von lediglich bis zu 100 Millionen US-Dollar pro Jahr, ohne eine realistische Kontrolle der Ausgaben, ohne ein erforderliches hohes Budget für Forschungsausgaben zur Unterstützung des Programms oder eine ausreichende Unterstützung durch die Autohersteller erfolgen.^[193] 2008 wurde sogar ein neues optimistisches Roadmap-Ziel von 2,5 Millionen Fahrzeugen festgelegt.^[194] Es überrascht nicht, dass Jahre später nichts davon geschehen ist, da die Kosten dieser Technologien nicht in ein paar Jahren auf ein erschwingliches Niveau gedrückt werden können.

Eine ernsthafte Energiepolitik hat in ihrem Kern ein Rahmenkonzept mit langfristigen ehrgeizigen Zielen, einschließlich einer zwischengeschalteten finanziellen Unterstützung vor der Kommerzialisierung, hohen Forschungsbudgets, um die Kosten zu senken, und Marktregeln, die den Start der sauberen Energieträger ermöglichen. Die bis jetzt besten Regeln sind unter anderem ein über die Stromrechnung gezahltes garantiertes Preisniveau (auch Einspeisetarife genannt) und Kapazitätsgebote, bei denen Unternehmen Angebote machen zum Bau einer bestimmten Menge erneuerbarer Energieträger mit einer 20-jährigen Garantie. Beide Regeln funktionieren, weil sie das Investitionsrisiko verringern und daher auch bei niedrigen Renditen wirksam sind.

Nur wenige Regierungen haben es bis jetzt geschafft, ihre Energiepolitik über Jahrzehnte beizubehalten. Bemerkenswerte Ausnahmen sind unter anderen Deutschland, China, Brasilien und die Vereinigten Staaten. Obwohl Dänemark oft für die führende Rolle seiner Windenergiebranche gelobt wird, gehört Dänemark nicht dazu, da der Erfolg dieser Politik in den 2000er-

Jahren zum Stillstand kam. Konservativ-liberale Parteien wurden gewählt, die den Energiesektor privatisierten und die Investitionen in saubere Energieträger auf ein Minimum reduzierten. Abgesehen von Exporten der Windenergiebranche passierte zehn Jahre lang nichts. Erst als die Sozialdemokraten 2011 gewählt wurden, wurde die Windenergie wieder unterstützt und ein Plan veröffentlicht, bis 2050 den gesamten Energiebedarf mit sauberen Energieträgern abzudecken.^[195] Doch ihr Einfluss hielt nicht lange an. Heute sind die Konservativen/Liberalen wieder an der Macht und haben die Unterstützung sauberer Energieträger beendet.^[196]

Das Schlüsselproblem, dessen Lösung die Regierungen ernsthaft angehen müssen, ist der plötzliche Zusammenbruch eines unterstützenden, risikovermindernden Umfelds, denn dieser Zusammenbruch vernichtet die Investitionen und führt zu Insolvenzen. Jede Änderung muss mit schrittweisen Anpassungen erfolgen, wie es in Deutschland geschah, als die Höhe der Einspeisetarife schrittweise verringert wurde, statt sie in einem Zug einfach abzuschaffen. Der Schlüssel zum Erfolg in parlamentarischen Demokratien ist, dass sich auch die Oppositionsparteien zu einer langfristigen Energiepolitik, zur Unterstützung des Marktes und zu Investitionen für Forschung bekennen. Sonst kommt diese Revolution bei jedem Wahlzyklus zum Stillstand.

18. Ist diese Energierevolution ohne Subventionen möglich?

Ja, es stimmt, der Aufstieg der erneuerbaren Energien und der Erfolg von Tesla waren zu großen Teilen von staatlichen Subventionen angetrieben. Die finanzielle Unterstützung in mehr als 120 Ländern beläuft sich auf insgesamt über 135 Milliarden US-Dollar, davon 37 Prozent für Sonnenenergie, 27 Prozent für Windenergie, 13 Prozent für Biomasse und 22 Prozent für Biokraftstoffprojekte.^[167]

Der größte Teil dieser Subventionen stammt aus einigen wenigen Ländern: Deutschland, die Vereinigten Staaten, Italien, Spanien, China, Japan, das Vereinigte Königreich, Frankreich und Indien. Im Jahr 2016 hat die chinesische Regierung die Erzeugung von Solarstrom mit 0,12 US-Dollar pro erzeugter Kilowattstunde subventioniert, im Vergleich zu einem Strompreis für die Industrie und Wohnungen von 0,15 beziehungsweise 0,08 US-Dollar.^{[197], [198]} Seit 2015 werden die Subventionen für erneuerbare Energien in mehreren dieser Länder zurückgeschraubt, wobei vor Kurzem in Spanien, Italien, dem Vereinigten Königreich, Deutschland und den Vereinigten Staaten sogar stark reduziert wurde. Dadurch wird der weitere Ausbau alternativer Energieprojekte in diesen Ländern stark eingeschränkt.^{[199], [200]}

Ja, das Niveau der Subventionen für erneuerbare Energie ist immer noch hoch, doch im Vergleich sind diese Subventionen immer noch viel niedriger als die weltweiten Subventionen für Strom aus Erdöl, Erdgas und fossilen Brennstoffen. Staatliche Subventionen zur Senkung der Kosten von Ölprodukten beliefen sich im Jahr 2014 auf 267 Milliarden US-Dollar, 107 Milliarden US-Dollar für Erdgas und 117 Milliarden US-Dollar für mit fossilen Brennstoffen erzeugten Strom.^{[201], 1} Diese werden

¹ In einer Reihe von Berichten werden auch Steuerstundungen als Subventionen gezählt, was automatisch zu viel höheren Zahlen für fossile Brennstoffe führt. Diese sind jedoch im Grunde verringerte Einnahmen.

überwiegend in Saudi-Arabien, Iran, Indien, Russland, Venezuela, Ägypten, Indonesien, China, Algerien und den Vereinigten Arabischen Emiraten zur Verfügung gestellt.

Dies ist aber bei Weitem nicht das ganze Bild, da in der Förderung von Erdöl und Erdgas tätige Unternehmen einen Teil ihrer Gewinne an die Regierungen der Länder zahlen müssen, in denen sie tätig sind. Dies schwankt zwischen niedrigen 30 bis 40 Prozent in Ländern wie Irland, Peru und Marokko bis zu hohen 80 bis 90 Prozent in Libyen, China, Nigeria, Venezuela und Iran.^[202] Die Gesamteinnahmen der Staaten im Jahr 2014 allein aus dem Erdöl wurden auf 1850 Milliarden US-Dollar² geschätzt, davon erhielten Saudi-Arabien (290 Milliarden), Russland (258 Milliarden), die Vereinigten Staaten (132 Milliarden), Iran (100 Milliarden), China (94 Milliarden), Irak (92 Milliarden), Kuwait (87 Milliarden) und die Vereinigten Arabischen Emirate (76 Milliarden) am meisten.^[203]

Diese staatlichen Einnahmen stammen aus Lizenzgebühren, Körperschaftsteuer und Steuern aus Kapitalerträgen. In den Vereinigten Staaten muss ein Unternehmen vertragsabhängig 12,5 bis 30 Prozent an Lizenzgebühren zahlen, Körperschaftsteuer in Höhe von 35 Prozent (von Staat zu Staat unterschiedlich) sowie Dividendensteuer.^{[202], [204]} Eine große unbeantwortete Frage des Energieübergangs ist, wie der staatliche Anteil an den Einnahmen aus der Erdöl- und Erdgasförderung langfristig durch andere Einnahmequellen ersetzt werden kann.

Die Unternehmen von Elon Musk (Tesla und SpaceX) haben zusammen staatliche Unterstützung von fast 5 Milliarden US-Dollar aus einer Vielzahl von staatlichen Anreizen einschließlich Zuschüssen, Steuererleichterungen, Fabrikbauten und ermäßigten Krediten erhalten.^{[205], 3} Die Unternehmen beschäftigen

² Einnahmen abzüglich Kosten der Ölförderung.

³ Musk hält 27 Prozent von Tesla und 23 Prozent von SolarCity vor der Fusion mit Tesla.

mehr als 20 000 Menschen und betreiben Fabriken und Anlagen in Kalifornien, Michigan, New York, Nevada und Texas. Nach Recherchen der Los Angeles Times:

»Die Vergünstigungen in Höhe von 1,3 Milliarden Dollar für die Batteriefabrik von Tesla in Nevada waren das Ergebnis harter Verhandlungen, die ein Jahr dauerten. Sie unterstützten das Übereinkommen mit der Zusage, Tesla übertragbare Steuergutschriften in Höhe von 195 Millionen Dollar zu geben, die der Autohersteller für den sofortigen Erhalt von Barmitteln verkaufen konnte [. . .] Tesla-Käufer erhalten auch eine Einkommensteuergutschrift des Bundesstaates in Höhe von 7500 Dollar und einen Nachlass in Höhe von 2500 Dollar vom Staat Kalifornien. Tesla-Käufer haben geschätzte 284 Millionen Dollar an Steueranreizen des Bundesstaates in Anspruch genommen und Nachlässe von mehr als 38 Millionen Dollar von Kalifornien erhalten. Das kalifornische Parlament hat vor Kurzem ein noch nicht rechtskräftiges Gesetz verabschiedet, das Einkommensgrenzen für die Käufer von Elektroautos vorsieht, die die staatliche Subvention von 2500 Dollar beantragen. Die Besitzer von Tesla-Autos haben laut Strategic Vision, ein Forschungsinstitut der Autoindustrie, ein durchschnittliches Haushaltseinkommen von circa 320 000 Dollar.«^[205]

Darauf antwortete Elon Musk: *»Wenn es mir um Subventionen gehen würde, wäre ich in die Erdöl- und Erdgasbranche gegangen.«^[206]* Er wies darauf hin, dass Tesla im Wettbewerb mit einer saturierten Autoindustrie steht, die im Fall von General Motors und Chrysler mit gewaltigen Summen vom Bundesstaat gerettet wurde.

19. Warum sind Länder mit niedrigen Einkommen möglicherweise die Gewinner?

Der große Vorteil der Energierevolution ist ihr dezentralisierter, »modularer« Charakter. In der ganzen Welt haben Einzelpersonen und Gemeinden immer besseren Zugang zu Solarmodulen und Windrädern zu erschwinglichen Preisen mit vielen Vorteilen. Insbesondere die Sonnenenergie änderte die Spielregeln, weil sie für 85 Prozent der Weltbevölkerung in fast ganz Asien, Afrika, Mittel-, Süd- und Nordamerika, bis auf Kanada, das ganze Jahr verfügbar ist.¹

Die Regierungen und Unternehmen in vielen Ländern mit niedrigen und niedrigen bis mittleren Einkommen strengen sich an, die zentralisierte Energieinfrastruktur der fossilen Brennstoffe einer von Städten dominierten Welt auszubauen. Mehrere hundert Millionen bis ein paar Milliarden Dollar sind nötig, um ein oder mehrere mit fossilen Brennstoffen betriebene Kraftwerke mit der damit zusammenhängenden Netzinfrastuktur zu errichten. Große Planungsfähigkeiten sind erforderlich, und die Möglichkeit, von Finanzinstituten Kredite erhalten zu können, können hohe Hürden für Länder mit niedrigem Einkommensniveau sein. Deshalb haben 1,2 von 3,6 Milliarden Menschen in Ländern mit niedrigen und niedrigen bis mittleren Einkommen noch immer keinen Zugang zu Strom, und weltweit leiden circa 2,8 Milliarden Menschen in Ländern wie Tadschikistan, Ghana oder Bangladesch jede Woche unter kostspieligen Stromausfällen.^[207] Große und teure Notstromsysteme mit Dieselgeneratoren dienen normalerweise als Notbehelfe, um mit der Situation fertigzuwerden. Tankstellen für Autos gibt es auf dem Land nur an wichtigen Straßen. Und die meisten Brennstoffe,

1 Wenn man sich eine waagrechte Linie um den 40. Breitengrad um den Globus herum gezeichnet denkt, dann werden die Länder mit viel Sonne das ganze Jahr von den Ländern getrennt, die im Winter keine Sonne haben. Länder unterhalb dieser Linie haben einen Sonnenwert von 1700 kWh pro Quadratmeter pro Jahr oder mehr.

wenn nicht alle, werden normalerweise importiert, weshalb die Versorgung mit Energie eine sehr kostspielige Angelegenheit ist.

Sonnenenergie außerhalb des Netzes füllt schnell einen Teil der Lücke, indem bis 2016 fast 60 Millionen Haushalte, die bislang keinen Strom hatten, mit Strom versorgt werden konnten. Das bezahlen sie aus eigener Tasche mit Hilfe kleiner Kredite.^{[208], [209]} Der größte Erfolg stammt aus »pico-solar«-Lösungen bis zu zehn Watt, supereffizienten Geräten und nutzungsbezogenem mobilem Geld.² Einer der größten Anbieter von pico-solar, M-Kopa in Kenia, hat bis jetzt 500 000 seiner Acht-Watt-Systeme an Haushalte für 0,50 US-Dollar pro Tag für ein Jahr geleast, bei einem Umsatzziel von vier Millionen Stück bis 2020.^{[210], [211]} Das Solarsystem ist viel eher erschwinglich als Kerosinlampen für die Beleuchtung oder als Dieselgeneratoren für Strom. Es ist auch mit einer kleinen Batterie ausgestattet, die nach Sonnenuntergang für acht Stunden Licht und das Laden der Mobiltelefone sorgt. Es kann auch supereffiziente Radios, Ventilatoren und einen kleinen Fernseher mit Strom versorgen. Der Markt wird so lukrativ, dass Energieriesen wie Engie (früher GDF-Suez) im August 2016 20 Millionen US-Dollar in BBOXX, einen kenianischen, nicht an das Netz gebundenen Anbieter von Sonnenenergie, investierten.^[212] Jetzt können zum ersten Mal hunderte Millionen Haushalte nach Sonnenuntergang Licht haben und länger lernen, arbeiten und spielen. Milliarden Menschen können ihre Kosten senken und verlässlichere Energie erhalten.

2 Durch Geldüberweisung per Mobiltelefon und Wallet-Systeme erhalten ländliche Haushalte Zugang zu Geld, die normalerweise keinen Zugang zu Bankkonten haben. Mit 20 Millionen Nutzern ist das 2007 von Safaricom an den Markt gebrachte M-Pesa-System eines der Größten.^[218]

