

Disruption und Tradition – das Innovationsdilemma etablierter Industrien

Thomas Aigle*✉, Dietmar Graeber*, Werner Tillmetz**

*Technische Hochschule Ulm, **Universität Ulm

Kontakt:

Thomas Aigle, Albert-Einstein-Alle 53-55, 89081 Ulm, thomas.aigle@thu.de

Bei diesem Dokument handelt es sich um das deutschsprachige Autorenmanuskript (Preprint), basierend auf dem englischsprachigen Beitrag zum Internationalen Wiener Motorensymposium 2026. Es weicht von Letzterem inhaltlich, strukturell sowie im Titel geringfügig ab und steht auf dem Open Access Repositorium von Universität Ulm und Technischer Hochschule Ulm zur Verfügung. Die finale, begutachtete und redigierte Fassung wurde in englischer Sprache unter folgendem Titel erstveröffentlicht:

Tillmetz, W., Aigle, T., Graeber D. (2026): The Traditional Industries Dilemma with Disruptive Innovations. In: Proceedings of the International Vienna Motor Symposium 2026. Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik, Vienna. Beitrag 2026-99, 19 Seiten. ISBN: 978-3-9504969-5-6. <https://doi.org/10.62626/ouh1-13zn>.

Kurzfassung

Die traditionelle Fahrzeugindustrie kann auf eine einhundertjährige Erfolgsgeschichte zurückblicken, die in den Industrieländern für enormen Wohlstand gesorgt haben. Durch kontinuierliche Optimierungen - die sogenannten inkrementellen Innovationen - kamen immer attraktivere Fahrzeuge auf den Markt. Nach mehr als einhundert Jahren wird die Fahrzeugindustrie erstmals wieder mit disruptiven Innovationen konfrontiert. Damals hatten Henry Ford mit der Massenproduktion von „Benzin-Kutschen“ und John. D. Rockefeller mit dem zum Fahren notwendigen Benzin die Pferdekutschen und deren Ökosystem aus dem Markt verdrängt. Heute sind es die Erneuerbaren Energie, die Elektromobilität und die Internettechnologien, die der traditionellen Fahrzeug- und Kraftstoffindustrie das Leben schwer machen. Für deren Zukunft ist es essenziell sich mit den typischen, gut untersuchten Merkmalen disruptiver Innovation auseinanderzusetzen. Dazu gehören die nur sehr schwer einschätzbare Entwicklung der Märkte für die völlig neuen Produkte und das exponentielle Wachstum in der frühen Phase der Marktdurchdringung. Schnelle und flexible Entwicklungsprozesse und die fortlaufende Beobachtung der Treiber für die Innovation, wie zum Beispiel die Klimaschutz-Gesetzgebung in allen relevanten Märkten, sind entscheidend für den Erfolg. Bei den oft kritisierten hohen Kosten und der teilweise mangelnden Qualität bei neuen Technologien wird regelmäßig vergessen, dass technologische Weiterentwicklung und die schnell wachsenden Produktionsvolumina zu kostengünstigen und attraktiven Produkten führen. Disruptive Innovationen erfordern in den frühen Jahren bis zur Erreichung einer kritischen Produktionsmenge erhebliche finanzielle Mittel, die nicht mit den Renditeerwartungen des traditionellen Geschäftes einhergehen. Die von C.M. Christensen analysierten, disruptiven Innovationen erstreckten sich über einen Zeitraum von mehr als einhundert Jahren und haben ein fundamentales, durchgängiges Merkmal gezeigt: Etablierten Konzerne haben es fast nie geschafft, bei disruptiven Innovationen aus sich heraus erfolgreich zu sein und die globalen Entwicklungen mitzugestalten. Meist wurden sie Opfer der sich schnell veränderten Märkte. Das liegt primär an den über Jahrzehnte etablierten Strukturen und Prozessen, die für den Erfolg mit den klassischen Produkten entscheidend waren.

Einleitung

Die Erfindung der „benzinbetriebenen Kutsche“ basierte vor hundert Jahren nicht auf der Weiterentwicklung der Pferdekutsche. Ebenso war das Mobiltelefon vor 35 Jahren keine Verbesserung des klassischen Festnetztelefons. Dies sind bekannte historische Beispiele für disruptive Innovationen. Rückblickend lässt sich leicht nachvollziehen, wie dramatisch sich damals Lieferketten, Produktionsmethoden und Vertriebskanäle durch diese Innovationen verändert haben. Ohne den Ausbau des Stromnetzes wären Thomas Alva Edisons Glühlampen niemals erfolgreich gewesen. Das Gleiche galt für Henry Fords Autos und die unverzichtbare Infrastruktur der Tankstellen. Der gesellschaftliche Widerstand gegen die Markteinführung, aber auch die daraus resultierenden dramatischen Veränderungen für ganze Volkswirtschaften einschließlich des gesellschaftlichen Lebens waren ebenfalls typische Merkmale disruptiver Innovationen.

Im Jahr 2025 wurde der Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften an Joel Mokyr, Philippe Aghion und Peter Howitt verliehen. Sie untersuchten den Einfluss von Innovationen auf das nachhaltige Wachstum von Volkswirtschaften [No25]. Sie verwendeten den Begriff „kreative Zerstörung“, um jene Umwälzungen zu beschreiben, bei denen traditionelle Industrien ins Straucheln geraten und durch neue Akteure mit neuen Produkten ersetzt werden. Im selben Jahr traten große Probleme für die traditionelle Fahrzeugindustrie zutage. Ist dies der Beginn einer disruptiven Transformation im Verkehrssektor? Clayton M. Christensen von der Harvard Business School analysierte in seiner bemerkenswerten Studie die Gemeinsamkeiten dieser disruptiven Innovationen des letzten Jahrhunderts [Cr97]. Die internen Prozesse und Strukturen, die in traditionellen Unternehmen auf der Grundlage jahrzehntelanger Erfolge etabliert wurden, hindern diese daran, mit solch grundlegenden Veränderungen auf dem Markt Schritt zu halten. Infolgedessen werden Unternehmen oft selbst Opfer unerwarteter und rascher Umbrüche. Im Jahr 2014 sagte Tony Seba treffend die bevorstehende Disruption der Automobilindustrie durch Elektromobilität und die Ablösung von Erdöl durch erneuerbare Energien voraus [Se14]. Zu dieser Zeit begann Tesla, mit seinen Elektroautos in Konkurrenz zu traditionellen Fahrzeugherstellern zu treten. Infolgedessen begannen etablierte Unternehmen zunächst zögerlich, Tesla nachzuahmen, und boten ebenfalls Elektrofahrzeuge im Luxussegment an. Sie verfolgten jedoch nicht Teslas ganzheitlichen Ansatz, konsequent das gesamte Ökosystem aufzubauen – von Batteriezellen über eine effiziente Antriebsarchitektur bis hin zu Ladestationen. Tesla war der etablierten Industrie auch einen Schritt voraus, als es mit dem Model 3 den Massenmarkt betrat. Die Branche reagierte erst, als EU-Gesetze immer höhere Strafen für die CO₂-Emissionen ihrer Fahrzeugflotten androhten. Gleichzeitig entstanden in China unzählige Hersteller von Elektrofahrzeugen und Batterien, die zunächst Erfahrungen auf dem heimischen Markt sammelten, dann aber schnell begannen, ihre neuen Produkte weltweit zu exportieren.

Die Entwicklungen bei Autobatterien und in der E-Mobilität in den letzten 15 Jahren zeigen deutlich, dass auch diese den bekannten Prinzipien disruptiver Innovationen folgen und die Industrielandschaft radikal verändern. Batteriehersteller entwickeln sich zu Fahrzeugherstellern, die die gesamte Wertschöpfungskette kontrollieren und mit der traditionellen Fahrzeugindustrie konkurrieren. Neue Technologien, die anfangs kritisch betrachtet wurden, werden kosteneffizient, zuverlässig und in Bezug auf die Lebensdauer mit herkömmlichen Antrieben vergleichbar.

1. Historische Beispiele für disruptive Innovationen

„Die Glühbirne entstand nicht aus der Weiterentwicklung der Kerze“, diesen Spruch hat vermutlich jeder schon einmal gehört und auch gleich wieder vergessen. Dabei ist es hilfreich sich für künftige Entwicklungen einige Zusammenhänge bewusst zu machen. Die Erfindung oder auch Invention der Glühbirne geht auf Jospheh Wilson Swan im Jahr 1879 zurück. Thomas Alva Edison machte sie kurz darauf tauglich für die Massenproduktion und erhielt auch 1880 das Patentrecht auf die Glühbirne wie wir sie heute kennen. Wieder ein Jahr später, 1881, leuchteten tausende Edison-Glühbirnen auf der internationalen Elektrizitätsausstellung in Paris. Swan war also der Erfinder, Edison der Innovator. Auch Swan behauptete, er hätte die Glühlampe für den Masseneinsatz entwickelt, doch am Ende gewinnt Edison. Schon dieser kleine Rückblick zeigt, dass zwischen Erfindung und Vermarktung manchmal nur kurze Zeitspannen liegen. Die Glühbirne hat im Vergleich zur Kerze enorme Vorteile, die deutlich bessere Qualität des Lichtes ist vielleicht der markanteste Vorteil. Um aber eine Glühbirne zu nutzen, braucht man elektrischen Strom. Die Erfindung des Stromgenerators durch Werner von Siemens 1866 ermöglichte erst den Aufbau des Stromnetzes und dann die Verwendung der Glühbirne. Das Zusammentreffen dieser beiden Innovationen Ende des vorletzten Jahrhunderts löste eine Vielzahl revolutionäre Entwicklung aus und führte zu großen gesellschaftlichen Veränderungen, einhergehend mit der Verbesserung des Wohlstandes. Alle, die am Geschäft zur Herstellung und von Vertrieb von Kerzen beteiligt waren, mussten sich eine neue Arbeit suchen – das ist die Natur disruptiver Innovationen. Die jüngste Revolution ist die LED. Erste sichtbare LED wurde 1962 von Nick Holonyak Jr. (1962) erfunden, der Durchbruch mit blauen LED gelang Shuji Nakamura 1994. Ab den 2000er Jahren verdrängte LED Glühlampen und Leuchtstoffröhren und sind heute Standard. LED gelten als radikale Innovation und sind sehr effizient, langlebig und vielseitig einsetzbar.

Ein weiteres Beispiel aus der jüngsten Vergangenheit, das inzwischen zum Bestandteil von Lehrbüchern über Innovationen wurde, ist das Schicksal des weltweit sehr erfolgreichen Konzerns Kodak. Die digitale Fotografie begann in den 1990er Jahren das Geschäft mit den klassischen fotografischen Materialien zu bedrohen. Im Dezember 2011 musste der Konzern nach vielen Umstrukturierungen und Verkäufen schließlich die Insolvenz anmelden und eine mehr als einhundertjährige Erfolgsgeschichte fand ihr Ende. Dabei gehörte Kodak zu den Erfindern der digitalen Fotografie. Mit den agilen asiatischen Herstellern von Unterhaltungselektronik mitzuhalten, war nicht gelungen. Diese witterten ein neues attraktives Geschäft und mussten, anders als Kodak, keine Rücksicht auf das traditionelle Geschäft in der Fotografie nehmen. Sie begannen den Markt zu erobern. In den frühen Jahren der Digitalkameras wurden die Bilder noch auf Fotopapier ausgedruckt. Mit den immer besseren Computer-Bildschirmen wurde das Ausdrucken der Bilder immer unwichtiger. Dann kam sehr schnell das Ende der Digitalkameras durch die nächste disruptive Innovation: Das massentaugliche Smartphone mit eingebauter Digital-Kamera, das 2007 Apple in den Markt einführte. In Verbindung mit dem Internet und dem schnellen Mobilfunk konnte jeder seine Bilder in Sekundenschnelle und weltweit mit anderen teilen. Die Disruption mit ihrem exponentiellen Wachstum nahm ihren Lauf und schnell wurden mehr als 100 Millionen Smartphones pro Monat produziert. Heute gibt es mehr als vier Milliarden Nutzer von Smartphones. Fast niemand konnte sich vor 20 Jahren vorstellen, was

heute technologisch möglich ist und wie rasant sich daraus die neuen Geschäfte entwickelten. Damit entstanden auch die heute weltweit profitabelsten Konzerne wie Apple, Amazon oder Meta. Genaugenommen handelt es sich um eine ganz Kaskade an Innovationen die mit der Digitalfotographie, dem Internet und der Lithium-Ionen-Batterie, die alle etwa zur gleichen Zeit in den Markt kamen. Die damit einhergehenden gesellschaftlichen Veränderungen sind ebenfalls nicht zu übersehen, auch wenn wir uns schnell an die Veränderungen im täglichen Leben gewöhnt haben. Was wäre, wenn das Kodak Management 1990 diese Entwicklungen geahnt hätte? Die Erkenntnisse von Clayton M. Christensen sollten erst einige Jahre später [Cr97] veröffentlicht werden: Disruptive Innovationen sind nicht planbar. Die Hersteller der traditionellen Produkte können aufgrund der etablierten Abläufe und Strukturen in ihre Unternehmen, den Wandel nicht mitgehen. Die Wirtschaftswissenschaft spricht von so genannten Pfadabhängigkeiten mit Lock-In-Effekten [Ar89]. Es sind fast ausschließlich neue Unternehmen, die diese Innovationen realisieren. Dabei müssen die neuen Produkte für deren Nutzer bezahlbar und attraktiv sein, dann wird das Wachstum des Marktes sehr schnell. Verhindern können die etablierten Unternehmen mit ihren „konventionellen“ Technologien nur für eine begrenzte Zeit, bevor sie sich aus dem Markt verabschieden oder mit aller Kraft versuchen, auf den Zug aufzuspringen und einen Platz in den neuen Märkten zu finden.

2. Schlüsselbegriffe der Innovationstheorie

Der Terminus „Innovation“ fand erst mit der deutschen Übersetzung von Schumpeters Werk „Business Cycles“ im Jahr 1961 Eingang in die deutsche Wissenschafts- und Alltagssprache. Bis Anfang der 1960er-Jahre wurde der Sachverhalt noch durch „Neuerung“ ausgedrückt. Der Innovationsbegriff wird zwischenzeitlich inflationär verwendet, was auch nicht weiter verwundert, denn ein allgemein verbindlicher Konsens über Inhalt und Verwendung des Terminus Innovation existiert nicht [De02]. Aber dennoch, im Kern geht es bei Innovationen immer um etwas „Neues“ und „Neuartiges“, um „Neuerung“ und „Erneuerung“, also um etwas „das bisher in dieser Form nicht bestanden hat“ [He01].

Im Zusammenhang mit dem Innovationsbegriff steht außerdem Schumpeters Trennung der *Invention* von der *Innovation*. Eine Innovation ist dabei nicht nur mehr, sondern auch qualitativ anders als eine Invention, also die bloße Erfindung oder Entdeckung. Inventionen sind nur dann Innovationen, wenn sie sich wirtschaftlich durchsetzen [De02]. Das wird in Medien und Politik meist missverstanden. Auch wird nicht aus jeder Invention eine Innovation. Viele gute Erfindungen bringen es nicht zur Marktreife – die Gründe hierfür sind vielfältig. Vom Nachweis eines Funktionsprinzips bis zum kommerziellen Einsatz in einer Anwendung sind oftmals zahlreiche Optimierungsschleifen notwendig. Mindestens genauso wichtig und notwendig sind gesellschaftliche Akzeptanz sowie wirtschaftliche Realisierbarkeit. Hinzu kommt mittlerweile auch der ökologische Fußabdruck der Innovation und somit deren transformatorische Wirkung als Beitrag zur Begrenzung des Klimawandels.

Weiter ist auch die Tragweite einer Innovation entscheidend, denn der Innovations-Begriff wird gleichermaßen für kleine technische Verbesserungen bis hin zu großen sozio-technologischen Transformationen verwendet. Verschiedenen Leitdiffenzen [Ai07] können zur Typisierung von Innovationen herangezogen werden. Eine Leitdiffenz betrifft

den Innovations-Grad, dieser unterscheidet zwischen *inkrementalen* und *radikalen* Innovationen. Während es sich bei ersteren um kleine, kontinuierlich stattfindende Neuerungen handelt, stellen radikale Innovationen große, diskontinuierlich auftretende Innovationen dar [Ha88]. Inkrementale Innovationen sind Verbesserungs-Innovationen, radikale Innovationen sind signifikante, richtungsändernde Basis-Innovationen [Ko01] und sind mit „Quantensprüngen“ zu vergleichen [We05].

Eine Abgrenzung von *radikalen* zu *disruptiven* Innovationen ist etwas diffizil und die Begriffe werden zum Teil auch synonym verwendet oder verschmelzen miteinander. Radikale Innovation, wie beschrieben, stellen eine technologisch weitreichende und bahnbrechend Neuheit dar, adressieren aber bestehende Märkte und etablierte Kunden. Als Beispiel wären Lithium-Batterien zu nennen, deren Optimierung in Punkto Kapazität und Gewicht zum Erfolg des Elektroantriebs geführt hat.

Der Begriff der *Disruptiven Innovationen* geht auf Harvard Professor Clayton Christensen im Jahr 1997 zurück [Cr97] und charakterisiert Innovation die zu einer Geschäftsmodell- und Marktverschiebung führt, die nicht zwangsweise mit revolutionärer technischer Neuheit verbunden sein muss. Die Disruption beginnt oftmals in Nischen und am unteren, niederepreisigen Ende des Marktes. Ein Beispiel hierfür sind Streaming-Dienste, die anfangs noch eine geringe Qualität und ein begrenztes Angebot hatten. Aus der Nische heraus und mit verbesserten Bandbreiten verdrängten sie schließlich Videotheken. Es gibt auch zahlreiche hybride Grenzfälle, so genannte radikal-disruptive Innovationen, die also sowohl radikal als auch disruptiv wirken. Hohe technische Neuheit trifft dabei auf disruptive Marktmechanismen. Exemplarische Beispiele hierfür sind die digitale Photographie, Smartphones oder Elektroautos die durch digitale Dienste und Zusatzfunktionen neue Marktsegmente und Kundengruppen adressieren.

3. Disruptive Innovationen in der Automobilbranche

Im Verkehrssektor liegt die letzte disruptive Innovation rund einhundert Jahre zurück. 1908 begann Henry Ford die Serienproduktion seines Model T. Gleichzeitig war zu dieser Zeit ausreichend Rohöl verfügbar (John D. Rockefeller), aus dem das Benzin für den Betrieb der „Benzin-Kutschen“ in Raffinerien durch Destillation hergestellt wurde. In der Anfangszeit wurde das Benzin noch in Apotheken und Gemischtwarenläden verkauft. Mit dem steigenden Bedarf, getrieben durch die Schaffung von besseren Straßen, entstanden dann die ersten Tankstellen. Das große Nachsehen hatten die vielen Hersteller und Betreiber von Pferdekutschen, sowie das ganze dazugehörige Ökosystem von der Pferdezucht bis zum Anbau des „Kraftstoffes“ Hafer. Jeremy Rifkin [Ri13] hat diese Zeit als die „Second Industrial Revolution“ bezeichnet. Die „First Industrial Revolution“ war wiederum etwa einhundert Jahre früher durch die Dampfmaschine in Kombination mit der Kohle geprägt, vgl. **Abb.1**. Diese hatten mit den Eisenbahnen und Dampfschiffen den Fernverkehr revolutioniert und damit Reisekutschen und Segelschiffe aus dem Markt verdrängt. Auch hier war neben dem Antrieb (Dampfmaschine) die kostengünstige Energieversorgung in Form von Kohle und Wasser für die Dampferzeugung entscheidend. Eine weitere Innovation hatte damals ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf den Marktdurchbruch: Der schnelle Buchdruck ermöglichte die essenziellen Informationen zu Fahrplänen und Dienstanweisungen über

große Entfernungen und schnell zu verteilen. Bei der Marktentwicklung der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren im letzten Jahrhundert war die weltweite und einfache Kommunikation über das Telefon ein entscheidendes Element für den schnellen Markthochlauf. Heute hat das „World Wide Web“ diese Aufgabe übernommen.

Derzeit befinden wir uns in dem von Rifkin bezeichneten Zeitalter der „Third Industrial Revolution“. Neben der weltweiten Kommunikation in Echtzeit, zeichnet sich diese Phase der Entwicklung durch die Versorgung mit Erneuerbaren Energien, primär durch Photovoltaik und Wind, aus. Der Treiber für diesen Wandel ist die Klimaschutz-Gesetzgebung, die die Abkehr von fossilen Kraftstoffen vorantreibt. Dazu kommt die immer kostengünstigere Stromerzeugung aus Sonne und Wind und zunehmend die Vermeidung von geopolitischen Abhängigkeiten.

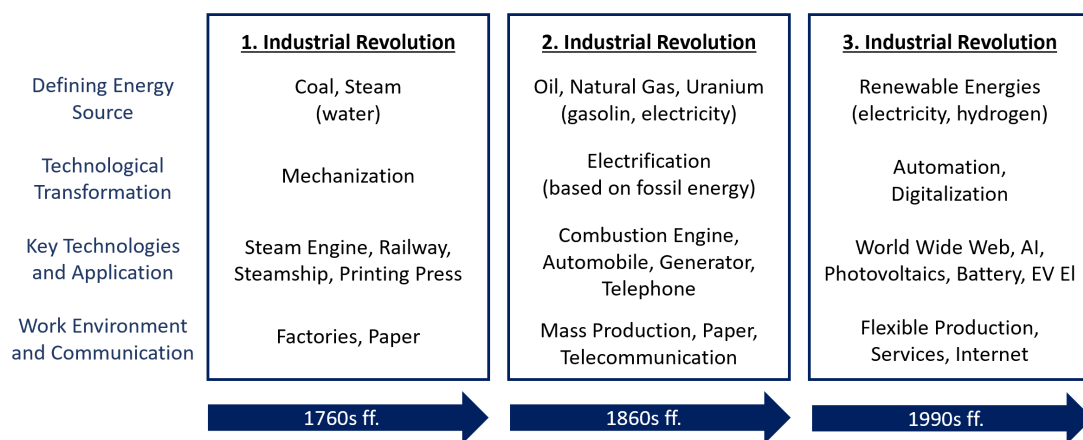


Abbildung 1: Die drei industriellen Revolutionen; Grafik basierend auf [Ri13]. Entnommen aus Tillmetz, Aigle, Graeber (2026). Originaltitel: „The three industrial revolutions; own chart based on [Ri13]“, erschienen in: Proceedings of the International Vienna Motor Symposium 2026.

Bei den Kraftstoffen wurde Kohle zunächst in Dampflok und Schiffen eingesetzt und ersetzte damit die Futtermittel für Pferde bzw. den Wind für Segelschiffe. Anfang des letzten Jahrhunderts haben dann Erdöl und das daraus gewonnene Benzin und Diesel wiederum die Kohle abgelöst. Damit verbunden waren stets weltweite, sehr große gesellschaftliche Umbrüche. In den letzten einhundert Jahren gab es sowohl bei den Kraftstoffen als auch bei den Motoren zahlreiche Veränderungen und Optimierungen. Dies waren kontinuierliche inkrementelle Verbesserungen der Produkte und mündeten in zahlreichen Optimierungen (Ai07, 41-52). Bei den Motoren wurden diese inkrementellen Innovationen meist durch die sehr innovativen und im Wettbewerb um lukrative Aufträge der OEM stehenden Zulieferer vorangetrieben. Weiterhin war die Einbindung der sehr breit aufgestellten heimischen Forschungslandschaft einfach. Nachdem die komplette Wertschöpfungskette für die Fahrzeuge etabliert war, konnten die Forschungsergebnisse einfach und schnell in die Entwicklung der nächsten Produktgeneration integriert werden. Daraus entstand eine sehr kompetente und wettbewerbsfähige Industrie mit hervorragenden Exporterfolgen. „German Engineering“ wurde zum Markenzeichen deutscher Fahrzeugtechnologie und bescherte der Volkswirtschaft viel Wohlstand. Bei disruptiven Innovationen, bei denen das (nationale) Ökosystem nicht existiert, ist die Umsetzung der Forschungsergebnisse dagegen sehr anspruchsvoll.

Die großen, regulatorisch bedingten Veränderungen, wie beispielsweise die Einführung des Dreiwegekatalysators und des DeNOx-Katalysators und die damit zusammenhängende bleifreien und schwefelarmen Kraftstoffe, waren ebenfalls keine disruptiven Innovationen, die zu einer Veränderung der industriellen Landschaft geführt hätten. Sie zementierten vielmehr die Dominanz des Verbrennungsmotors und wirkten somit verhindernd auf die Entwicklung neuer Antriebe. Die fossilen Kraftstoffe haben bis heute den Vorteil der sehr hohen Energiedichte, die beispielsweise um den Faktor 40 höher ist als die von Batterien. Dazu kommen einfache Lagerung und Transport per Schiff, Bahn oder Lkw. Ein weiterer, sehr entscheidender Aspekt für diese 100-jährige Karriere von Verbrennungskraftmaschinen auf Basis fossiler Kraftstoffe ist politischer Natur: Erdöl und Erdgas bedeuteten Wohlstand für alle diejenigen Nationen, die über diese Energieressourcen verfügen oder darauf Zugriff haben. Damit hängen auch vergangene und bis heute andauernde geopolitische Konflikte um diese fossilen Energiequellen zusammen. Ebenso spielen militärische Überlegungen eine Rolle, denn ohne ausreichend fossile Energieträger und die dazugehörigen Motoren ist ein handlungsfähiges Verteidigungssystem derzeit nicht möglich.

Der Umsatz der weltweiten Fahrzeugindustrie liegt im Bereich von 4.000 Milliarden USD [Re25]. Von den etwa 100 Millionen Barrel an Erdöl, die heute pro Tag produziert werden, gehen knapp zwei Drittel in den Verkehrssektor. Bei einem angenommenen mittleren Rohölpreis von 60 USD pro Barrel wechseln damit jeden Tag etwa 6 Milliarden USD den Besitzer. Mit der Veredelung des Kraftstoffes bis zur Tankstelle inklusiver der Steuern und Zölle verdreifacht sich dieser Wert. Jährlich ergibt das dann mehr als 6.000 Milliarden USD Umsatz. Dabei ist auch zu beachten, dass 80 % der weltweiten Unternehmen im Gas und Ölgeschäft in nationaler Hand liegen und erheblich zur Finanzierung der Staatsausgaben beitragen. Dazu kommen die geopolitischen Abhängigkeiten in Zusammenhang mit den fossilen Energiequellen, die vielen Regierungen zunehmend Kopfzerbrechen bereiten.

Diese Aspekte sollen zeigen, wie stabil und mächtig das heutige System rund um fossile Energien und Antriebstechnologien ist. Lock-In-Effekte [Ar89] führen dabei zu einer Zementierung der Dominanz der etablierten Technologien mit ihren Wertschöpfungsketten, so dass neue Technologien lange keine Chancen haben sich gegen diese Dominanz durchzusetzen.

Der zentrale Begriff in diesem Kontext ist die „Hyperselektion“ [Br98]. Diese Theorie geht zurück auf frühe Modelle der Selbstorganisation, in denen die Wechselwirkung zwischen zwei Gruppen beschrieben wird. Hyperselektion ist eine Situation in der sich auch eine »bessere Variante« nicht durchsetzen kann [Ei78]. „Das Charakteristische des Hyperselektionsfalls liegt also gerade darin, dass der einmal stabilisierte Zustand stabil gegenüber allen Störungen ist“ [Eb02]. Oder, anders gesagt: Die Optimierung einer dominanten technischen Konvention verstärkt deren Hyperselektivität. Und dies wiederum führt dazu, dass alle anderen vorhandenen und potenziellen Technologien vom herrschenden Stand der Technik ausgesiebt werden, bevor sie Fuß fassen und sich entwickeln können (vgl. Sc09, 14-17). Disruptive Innovationen versuchen nun diesem „Konventions-Sog“ (Di09, 324-326) entgegenzuwirken, indem sie in geschützten Nischen neue Geschäftsmodelle entwickeln, frühe neue Märkte kreieren und diese selbst besetzen. Nischen können auch durch den Gesetzgeber in Form von Subventionen oder einer die

neue Technologie fördernden Gesetzgebung (z.B. Emissionsfreie Städte, CO₂-Bepreisung) gebildet werden. Auch langfristige strategische Leitlinien und Roadmaps von Regierungen können neue Technologien aus der Hyperselektionsfalle befreien, indem sie Startups und deren Finanziern sichere Rahmenbedingungen für eine Transformation zusagen. Es entsteht somit ein immer größerer politischer „Handlungs-Druck“, um die mit der Verbrennung fossiler Energien verbundenen CO₂-Emissionen – weltweit etwa 40 Mrd. Tonnen – zu reduzieren und die resultierenden Klimaschäden zu vermeiden.

4. Schlüsselfaktoren Kosten und vertikale Integration

Damit ein neues Produkt im Markt ankommt, d.h. innovativ ist, muss es dem Kunden einen Mehrwert im Vergleich zum traditionellen Produkt bieten. Bei der digitalen Fotografie war dies der Wegfall der Filme, die gekauft, eingelegt und dann zum Entwickeln weggeschickt werden mussten. Hinzu kam die einfache Bildbearbeitung am Computer. Für den großen Erfolg und die damit verbundene Verdrängung der traditionellen Technologie, ist die Bezahlbarkeit entscheidend.

Bei den E-Fahrzeugen führt der hohe Wirkungsgrad der Elektromotoren zu einem deutlich reduziertem Energieverbrauch. Der hohe Fahrkomfort aufgrund des leisen Antriebes sorgt für eine große Akzeptanz. Der Gesetzgeber unterstützt regulatorisch die E-Mobilität aus Gründen des Klimaschutzes. Neben Attraktivität sind Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Sicherheit und vor allem die Wirtschaftlichkeit (Anschaffungs- und Betriebskosten) entscheidend.

„Die neuen Technologien sind viel zu teuer, das kauft niemand“, so oder so ähnlich lauteten die typischen Aussagen, die man regelmäßig zu E-Fahrzeugen, aber auch zu Wasserstoff oder E-Fuels hört. Die erste Digitale Kamera von Kodak, die DCS 100, kam 1991 auf den Markt und kostete 25.000 USD. Sie war damit nicht für den Massenmarkt tauglich. Wenige Jahre später gab es digitale Kameras für 1.000 USD und ab dem Jahr 2000 für weniger als 500 USD. Die ersten Fahrzeuge von Tesla (Roadster, Model S und X) kosteten über 100.000 USD. Heute beginnen E-Autos die Kostenparität zu den traditionellen Fahrzeugen mit Verbrenner zu erreichen und dies sogar bei den Modellen für den Massenmarkt und nicht nur im Premiumsegment.

Hinter diesen Kostenreduktionen steht eine Gesetzmäßigkeit: Um von kleinen Stückzahlen mit hohen Kosten zu hohen Stückzahlen mit niedrigen Kosten zu gelangen, sind sehr hohe Investitionen erforderlich. Das wird auch als Henne-Ei-Problem bezeichnet und gilt im Prinzip für alle Technologien außer Software und digitalen Geschäftsmodellen. Bei etablierten Märkten und Technologien kann man das Risiko recht gut abschätzen. Kommt ein in Kleinserie produziertes Fahrzeug mit optimierten Eigenschaften beim Kunden an, dann kann man die Investition wagen. Mit den bestehenden Lieferketten und Produktionsprozessen sind die Risiken überschaubar. Bei komplett neuen Produkten, wie damals bei der Digitalkamera oder beim Start der E-Mobilität, gab es allerdings keinen etablierten Markt, der Kundenbefragungen möglich machte. Auch bei der Zulieferindustrie, den Fertigungstechnologien sowie der Infrastruktur gibt es viel Unbekanntes.

So steht die Frage im Raum, wie sich die zu erwartenden Kosten für ein völlig neues, innovatives Produkt vorhersagen lassen. Retrospektiv betrachtet hätte man damals fragen können: Was werden die Bildsensoren und die dazugehörige Elektronik einer Digitalkamera, in großen Stückzahlen produziert, kosten? Was werden die Batterien für die E-Fahrzeuge in der Serienproduktion kosten?

Bereits 1936 stellte der Flugzeugingenieur Theodore Paul Wright fest, dass sich der Arbeitsaufwand für ein neues Flugzeug mit jeder Verdopplung der Gesamtproduktion um 20% verringerte. Dies ist als „Wright'sches Gesetz“ [Wr36] bekannt geworden. Studien [Ye79] in anderen Branchen ergaben unterschiedliche Prozentwerte, doch in den meisten Fällen war der Wert in der jeweiligen Branche konstant und änderte sich nicht mit unterschiedlichen Technologien.

Fundierte Analysen dieser Zusammenhänge erfolgten in den 1960er-Jahren von Bruce Henderson, Gründer der Boston Consulting Group [BC68]. Er entwickelte das Modell der Erfahrungskurven (Experience Curve), die bei den Strategien zu künftigen Produkten kaum oder oftmals viel zu wenig berücksichtigt werden. Das Erfahrungskurvenmodell geht auf Analysen in der Halbleiterfertigung zurück und bestätigte Wrights Beobachtungen, also dass mit jeder Verdopplung der kumulierten Produktionsmenge die Stückkosten sich um einen festen Prozentsatz, typischerweise um 20–30 %. verringern [BC13]. Generell zeigt die Produktion jeden Gutes den Lernkurveneneffekt, denn mit jeder Steigerung des kumulierten Volumens sinken die Stückkosten eines Produktes durch Lerneffekte, Prozessbeherrschung, Skalierung und Wertschöpfungsoptimierung (einschließlich Verwaltung, Marketing, Vertrieb und Fertigung) um einen konstanten Prozentsatz.

Diese rein quantitativen Zusammenhänge der klassischen Lernkurve wurden von BCG um eine strategische, marktorientierte Perspektive erweitert, die im Folgenden beschrieben und in **Abb. 2** veranschaulicht wird. Die klassische Erfahrungs- oder Lernkurve beschreibt den Zusammenhang zwischen steigendem Produktionsvolumen, gesammelter „Erfahrung“ und sinkenden Kosten. Ihr charakteristisches Merkmal ist die Wiederholung: Dazu gehören die systematische Erfassung und Analyse von Kostendaten, die Identifizierung von Verbesserungspotenzialen, die Umsetzung entsprechender Maßnahmen und das wiederholte Durchlaufen dieses Zyklus. Wesentliche Merkmale dieses Lernprozesses sind Wiederholung, schrittweise Optimierung sowie der Erwerb von explizitem und implizitem Wissen. In diesem Zusammenhang entwickelt sich die Effizienz weiter: Lernen durch Praxis, Standardisierung, Automatisierung und die Optimierung der Lieferkette sorgen dafür, dass die Kurve stetig nach unten verläuft [BC13]

Im Gegensatz dazu gibt es Lern- oder Erfahrungssprünge, bei denen es weniger um die Erfüllung einer bestehenden Nachfrage geht als vielmehr um deren Gestaltung („Demand-Shaping“). Diese basieren auf neuen, optimierten Produktgenerationen und Hypothesen über zukünftige Nutzerbedürfnisse und potenzielle Anwendungsmöglichkeiten, wodurch bestehendes Wissen und etablierte Architekturen teilweise hinfällig werden. Es handelt sich hierbei um einen zyklischen und explorativen Ansatz, der durch Unsicherheit und die sukzessive Generierung neuen Wissens gekennzeichnet ist [Cr97].

Ein typisches Beispiel für diese Zusammenhänge ist die Festplattenherstellung. In den frühen 1980ern lagen die Kosten pro Gigabyte im Bereich hunderttausender US-Dollar. Um die Jahrtausendwende fielen die Kosten in den einstelligen Dollarbereich pro GB, bevor die Preise im heutigen Cent Bereich erreicht wurden. Über drei Dekaden ist der exponentielle Preisverfall entlang konsistenter Lernraten robust belegt, das Muster resultiert aus dem Zusammenspiel von inkrementellen Erfahrungskurveneffekten und Generationswechseln (z.B. SSD-Festplatten).

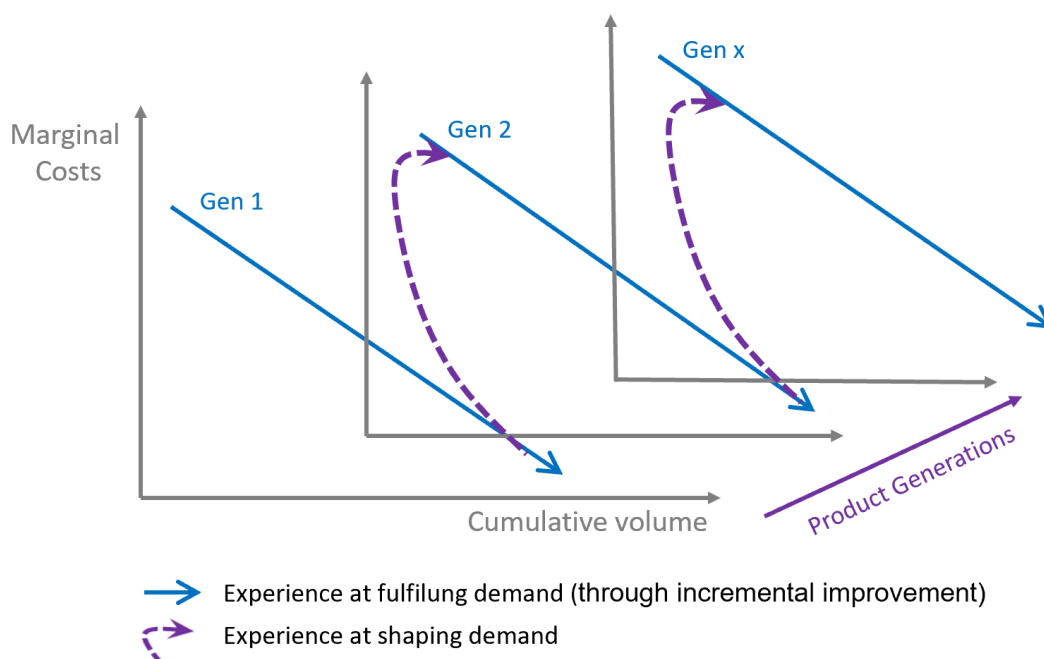


Abbildung 2: Erfahrungskurve: Kostensenkung durch Innovation und Optimierung; Quelle: eigene Darstellung auf der Grundlage von [BCG13]. Entnommen aus Tillmetz, Aigle, Graeber (2026). Originaltitel: „Experience curve: cost reduction by innovation and optimization; source: own chart based on [BC13], erschienen in: Proceedings of the International Vienna Motor Symposium 2026.

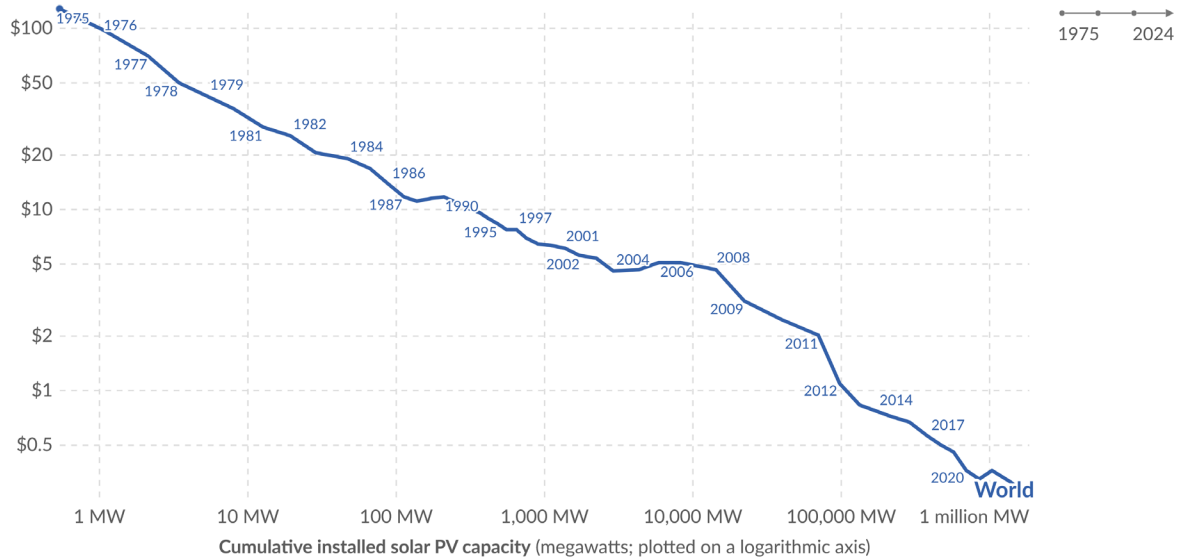
Ein schönes und hochaktuelles Beispiel für eine Lernkurve ist die Entwicklung der Preise für Photovoltaikmodule (**Abb.3**). Vor 20 Jahren, als die Nutzung von Strom aus Photovoltaik auf Hausdächern in Deutschland ihren Anfang nahm, war das nur mit massiven Subventionen möglich. Der Preis für ein Solarmodul lag bei etwa 5.000 USD pro kW. Heute liegen die Preise im Bereich von 100 USD pro kW. Dafür verantwortlich waren nicht nur die schnell wachsenden Produktionsvolumina alleine, sondern auch stetige technologische Weiterentwicklungen die sich in der Verbesserung des Wirkungsgrads widerspiegeln. Dieser lag vor 20 Jahren noch bei etwa 15% und hat heute fast 25% erreicht [IS25]. Optimierte Produktionstechnologien und eine zuverlässige Lieferantenkette bis hin zu den Rohstoffen, aber auch der Wettbewerb im Markt waren entscheidend für die Kostenreduktionen, die auch weiterhin rasant ansteigt. Im Jahr 2024 wurden 600 GW PV Module neu installiert, wobei die Produktionskapazitäten noch deutlich höher liegen. Wer hätte das sich vor 20 Jahren vorstellen können? Dabei waren diese Gesetzmäßigkeiten damals schon bekannt.

Solar photovoltaic module prices vs. cumulative capacity

Our World
in Data

Average price of solar modules versus cumulative installed capacity. Prices are expressed in US dollars per watt, adjusted for inflation. Cumulative solar capacity is measured in megawatts.

Solar PV module cost (constant 2024 US\$ per watt; plotted on a logarithmic axis)



Data source: IRENA (2025); Nemet (2009); Farmer and Lafond (2016)

OurWorldinData.org/energy | CC BY

Note: Costs are expressed in constant 2024 US\$ per watt. Global estimates are used before 2010; European market benchmarks thereafter due to limited data availability.

Abbildung 3: Kosten für Solarmodule im Vergleich zur kumulierten installierten Leistung in US-Dollar, inflationsbereinigt, Quelle: Our World in Data, CC-BY [OW24]. (Anmerkung: etwa 20%ige Senkung bei jeder Verdopplung der Leistung. Ende 2025 liegen die Kosten sogar bei 0,1 USD bei einer installierten Leistung von 2.200.000.000 MW)

Mit den dramatisch gesunkenen Kosten für die Photovoltaikmodule sind auch die Stromgestehungskosten mittels Photovoltaik (vgl. den Balken „solar photovoltaic“ in Abb.4) soweit gefallen, dass diese inzwischen günstiger sind als bei der Erzeugung aus fossilen Energieträgern (**Abb.4**). Das gilt vor allem für die sonnenreichsten Regionen der Erde, in denen Großanlagen mittlerweile Strompreise von rund 1 US-Cent pro Kilowattstunde ermöglichen. Berücksichtigt man die in vielen Ländern erhobene CO₂-Steuer sowie die Kosten für die Sicherung fossiler Energieimporte in Zeiten geopolitischer Konflikte, erhöht sich dieser Kostenvorteil weiter. Dem oft vorgebrachten Argument der fluktuierenden Verfügbarkeit von Solarstrom wirken die kontinuierlich sinkenden Preise für Batteriespeicher sowie der Einsatz dynamischer Elektrolyseure zur Erzeugung von leicht speicherbarem Wasserstoff entgegen. Auch die Verlagerung der Herstellung von energieintensiven Produkten (Beispiel Kunstdünger, Rohstahl) in sonnenreiche Regionen wird einen großen Einfluss haben. Letzteres ist vergleichbar mit der Rolle von kostengünstiger Kohle für den Aufbau der Stahlindustrie vor mehr als 150 Jahren.

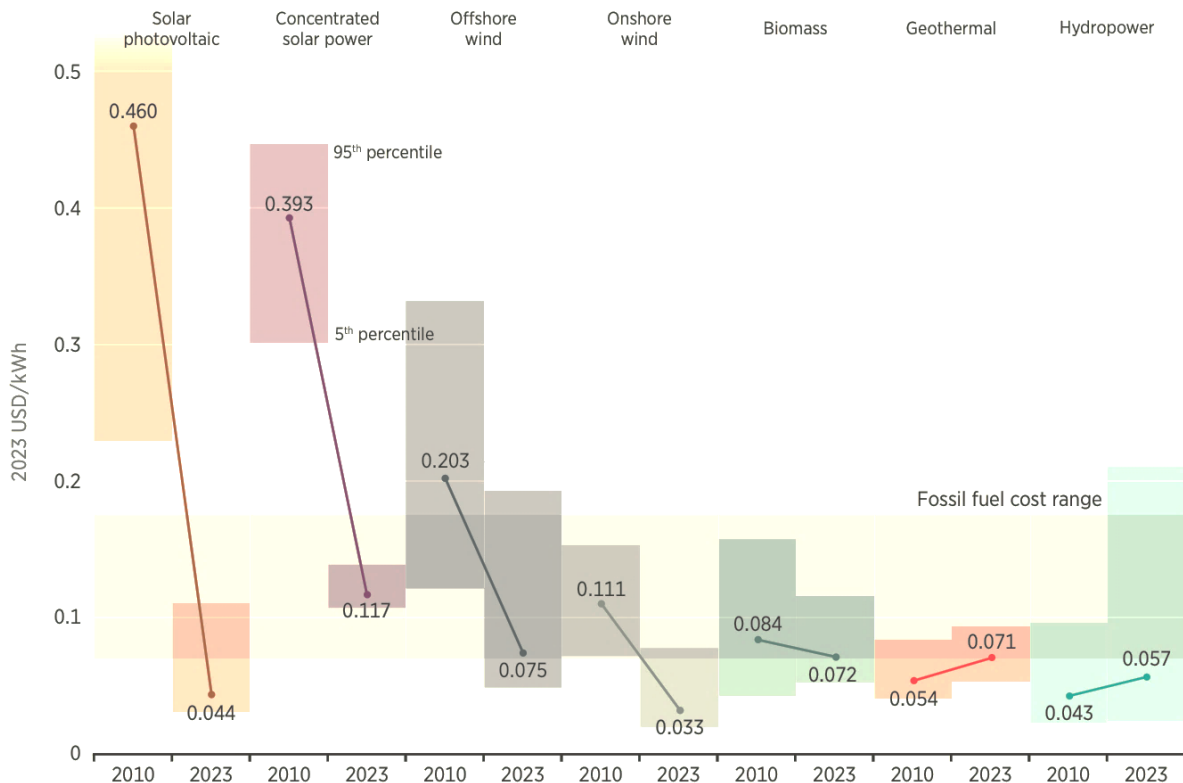


Abbildung 4: Rückgang der weltweiten Stromgestehungskosten von 2020 bis 2023. Quelle: IRENA Report: Renewable power generation costs. International Renewable Energy Agency. [IR24, S.21 – free use]

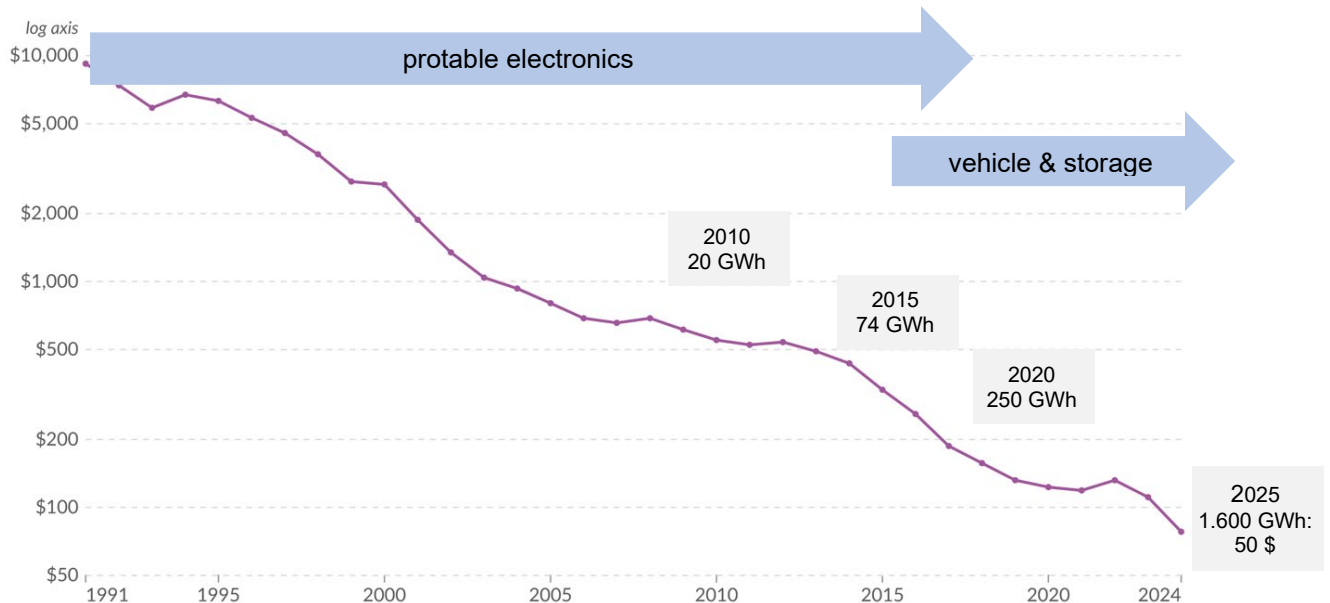
Ähnlich wie bei der Photovoltaik, fand auch bei den Batterien eine dramatische Preisreduktion statt (**Abb.5**). Zu Beginn der Aktivitäten der E-Mobilität vor etwa 15 Jahren lagen die Preise für die Lithium-Ionen-Zellen noch bei über 1.000 USD. Der Markt war von Zellen mit kleinem Energieinhalt für portable Elektronikgeräte (vgl. portable electronics in Abb.5) geprägt. Heute liegen die Preise für die Zellen, je nach Zellchemie, zwischen 50 und 70 USD. Das enorme Wachstum der letzten Jahre ist durch die Elektromobilität sowie Batterie-Speichersysteme (vgl. vehicle & storage) mit sehr hohen Energieinhalten geprägt. Auch hier waren und sind die stark steigenden Produktionsvolumina und der technologische Fortschritt sowie der harte Wettbewerb in einem schnell wachsenden Markt die Treiber.

Die Kostenreduktion bei der Wasserstofftechnologie – sowohl bei Elektrolyseuren als auch bei Brennstoffzellen – folgt exakt denselben ökonomischen Gesetzmäßigkeiten. Chinesische Unternehmen haben daraus die richtigen Konsequenzen gezogen und investieren kräftig in den Ausbau der Produktionskapazitäten (vgl. **Abb.6**). Trotz anfänglich hoher Investitionen und einer temporären Belastung des Betriebsergebnisses entsteht so ein unschlagbarer Marktvorteil, durch den Produkte weitaus günstiger als bei der Konkurrenz angeboten werden können. Der frühe und schnelle Markteintritt hat auch noch einen weiteren, sehr entscheidenden Vorteil: Dazulernen. Erst im realen Einsatz beim Kunden werden die Schwächen eines neuen Produktes sichtbar. Durch die schnelle Rückkopplung in die Entwicklung der nächsten Produktgeneration werden die künftigen Produkte auch technisch immer besser und attraktiver. Dies ist exakt das Prinzip der Experience Curve (**Abb.2**).

The price of lithium-ion batteries has fallen by 99% since 1991

Our World
in Data

Representative estimate of the price of battery cells¹ for lithium-ion batteries², across all major cell chemistries. Prices are in US dollars per kilowatt-hour³, adjusted for inflation.



Data source: Rupert Way (2026) based on Ziegler and Trancik (2021), BloombergNEF, and Avicenne Energy

Note: This data is expressed in constant 2024 US\$ per kilowatt-hour.

OurWorldinData.org/energy | CC BY

Abbildung 5: Kostensenkung bei Lithium-Ionen-Batteriezellen von 1991 bis 2024. Quelle: Our World in Data, CC-BY [OW25]. Eigene Ergänzung durch Pfeile und Kästen. (Anmerkung: Der enorme Anstieg der Produktionsmengen durch mobile und stationäre Energiespeicheranwendungen ab 2015 führte zu einem weiteren massiven Preisverfall).

Die vertikale Integration in der Wertschöpfungskette neuer Produkte spielt eine wichtige Rolle für den Markterfolg, insbesondere in der frühen und entscheidenden Phase disruptiver Innovationen (First-to-Market). In der Regel fehlt es diesen Innovationen an einer zuverlässigen Zulieferindustrie, und es gibt keine Standards (z.B. für Ladestecker von Elektrofahrzeugen) oder Vorschriften, die die Zulassung durch Behörden unterstützen. Daher bietet ein hoher Grad an vertikaler Integration in Entwicklung und Fertigung, verbunden mit einer konsequenten Beherrschung des gesamten Ökosystems, enorme Vorteile hinsichtlich der Markteinführungszeit und der Markteintrittskosten. Strategische Kooperationen (z.B. Joint Ventures) können Abhängigkeiten und Risiken in der Zulieferindustrie, einschließlich der Rohstoffversorgung, sowie auf dem Markt selbst minimieren.

Tesla hat diese Zusammenhänge gut erkannt und konsequent umgesetzt. Es wurde schnell klar, dass man mit der traditionellen Zulieferindustrie nicht das gewünschte E-Fahrzeug und schon gar nicht in der notwendigen Geschwindigkeit entwickeln konnte. Bei allen Schlüsseltechnologien, wie der Batterie, hat Tesla eine weltweite führende Kompetenz aufgebaut und mit Partnern umgesetzt. Ebenso hat Tesla eine eigene Ladeinfrastruktur für seine Fahrzeuge selbst realisiert und mit Hilfe internetbasierte Dienste die Routenplanung optimiert. Diese Vorgehensweise hat Tesla mit einer Marktkapitalisierung von 1.400 Milliarden USD zu einem der wertvollsten Unternehmen der Welt gemacht. Zum Vergleich hat VW eine Marktkapitalisierung von 58 Milliarden USD.

Eine sehr ähnliche Vorgehensweise sieht man bei chinesischen Firmen. Der Batteriehersteller BYD wird zu einem der größten Hersteller von E-Bussen und E-Pkw. Die Firma CATL hatte ursprünglich Batterien für die Unterhaltungselektronik hergestellt. Heute ist CATL der weltweit größte Hersteller für Fahrzeugbatterien und stationäre Stromspeicher und treibt die vertikale Integration sehr konsequent voran. Abb.6 zeigt die weltweite Nachfrage (demand) und Produktionskapazitäten (manufacturing capacity) von 2023 und 2030 nach Ländern und Regionen. Auffallend dabei ist Dominanz der Chinesischen Unternehmen (rote Blöcke in der Abbildung).

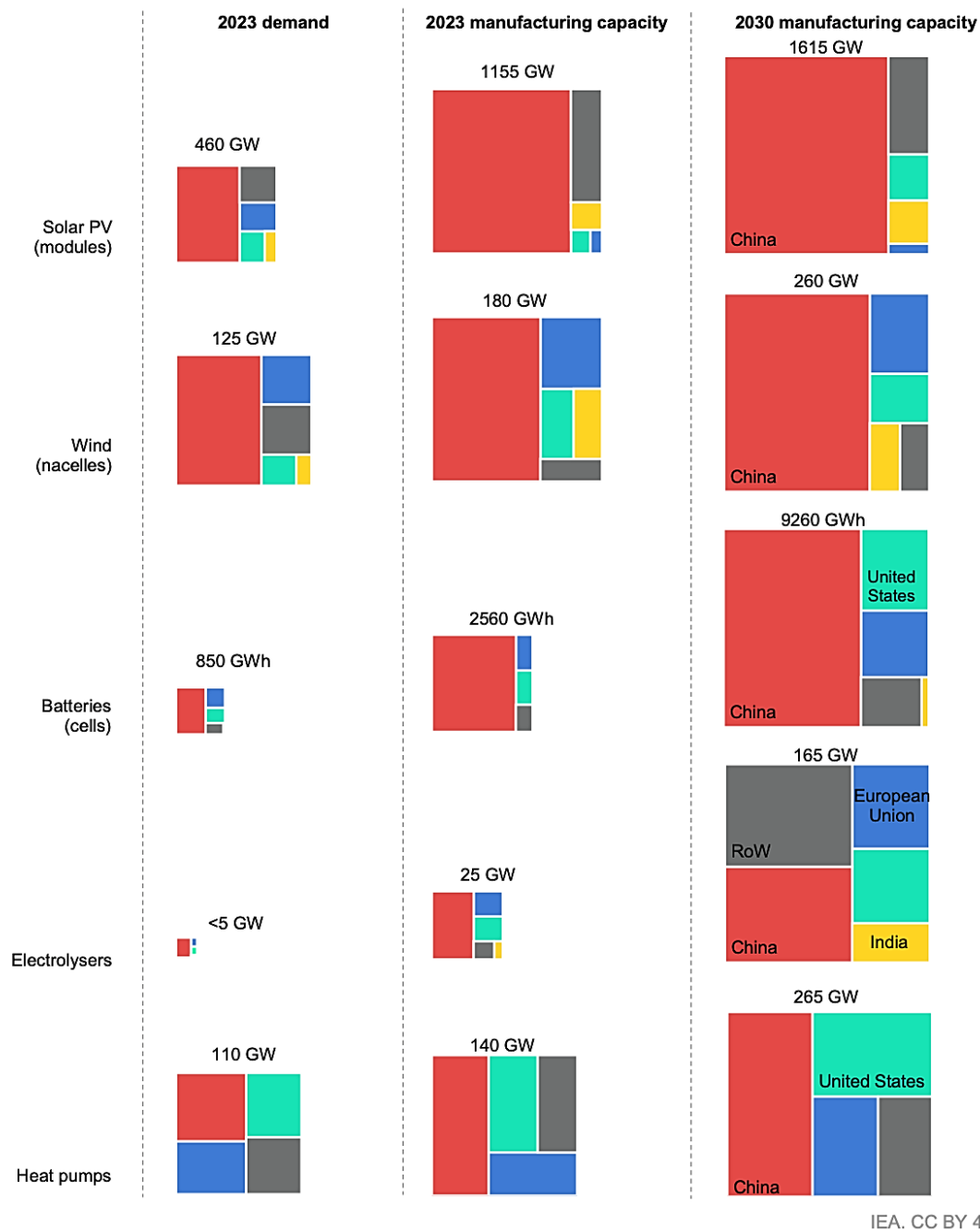


Abbildung 6: Weltweite Nachfrage und Produktionskapazitäten 2023 und 2030 nach Ländern / Regionen, RoW = rest of world. Quelle: International Energy Agency: Energy Technologies Perspectives. Report. IEA. CC BY 4.0. [IE24, S. 42]

5. Wie wird der Verkehrssektor der Zukunft aussehen?

Um diese Frage zu beantworten, muss das komplette Ökosystem der Fahrzeugindustrie betrachtet werden. Das sind einerseits die vielen verschiedenen Antriebstechnologien, die Infrastruktur zum Tanken bzw. Laden der Fahrzeuge sowie die Verfügbarkeit und bedarfsgerechte Bereitstellung der künftigen Kraftstoffe inkl. Strom bzw. Wasserstoff. Dies alles ist überlagert von der Umwelt- und Klimagesetzgebung sowie geopolitischen Entwicklungen. Neu dazu kommen wird das autonome Fahren und damit verbundene Geschäftsmodelle, in denen Fahrzeuge als Dienstleistung zur Verfügung gestellt werden (Transportation as a Service - TaaS). Auch die sozialen Innovationen in Form von Car-sharingmodellen oder öffentlichen Transportsysteme und deren Attraktivität spielen eine Rolle für die Geschäftsentwicklung der Fahrzeugindustrie [Rü13].

Heute sind weltweit mehr als 1,6 Milliarden Pkw und Nutzfahrzeuge auf den Straßen unterwegs, hiervon etwa 50 Mio. in Deutschland und über 400 Mio. in China. Die Zahl der E-Fahrzeuge liegt derzeit bei 50 Millionen oder nur etwa 3% aller mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeuge [VD25]. Dieser Anteil am gesamten Fahrzeugbestand ist wichtig zur Beurteilung der Klimabilanz und der Versorgung der Fahrzeuge mit grüner Energie sowie dem Aufbau der notwendigen Infrastruktur.

Der sehr häufig genannte Anteil an den verkauften Fahrzeugen hat nur eine begrenzte Aussagekraft. So sagt ein Anteil von 20% E-Autos am Verkauf von Neufahrzeugen nur aus, dass 80% der verkauften Fahrzeuge einen Verbrennungsmotor haben und dem traditionellen Geschäft zugeordnet werden müssen.

Die entscheidende Kennzahl ist vielmehr die Wachstumsrate bei Elektrofahrzeugen. Diese liegt derzeit bei über 30 % im Vergleich zum Vorjahr. Das ist deutlich höher als die Wachstumsraten von rund 3 % für alle Fahrzeuge. In China, dem weltweit größten Fahrzeugmarkt, sind die Wachstumsraten besonders hoch. Dies ist unter anderem auf die eingeschränkte Zulassung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren und die niedrigen Stromkosten für das Laden von Elektrofahrzeugen zurückzuführen. Ein gutes Beispiel für die Dynamik in China ist der Smartphone-Hersteller Xiaomi, der neu in den Markt für elektrische Sportwagen eingestiegen ist und in weniger als zwei Jahren bereits 500.000 Fahrzeuge zu attraktiven Preisen verkauft hat. Gleichzeitig wird der traditionelle Premiumhersteller Porsche aus dem chinesischen Markt verdrängt. Aufgrund des riesigen Binnenmarktes ist China in der Lage, die Kostenkurve nach unten zu drücken und mit dem Export seiner neuen Elektrofahrzeuge in alle Märkte weltweit, einschließlich der Schwellenländer, zu beginnen. Dies stellt eine große Bedrohung für die traditionell exportorientierten deutschen Fahrzeughersteller dar. Die Zulieferindustrie und der Maschinenbau sind eng mit diesem Schicksal verknüpft.

Bei schweren Elektro-Lkw stieg der Anteil der Neuzulassungen in China bis Ende 2025 besonders rasch auf über 50 %. Hier scheint sich ein ähnliches Szenario abzuzeichnen, wie es vor zehn Jahren bei den Stadtbussen begann. Heute sind fast 100 % der chinesischen Stadtbusse elektrisch. All dies sind typische Merkmale disruptiver Innovationen.

Bei den schweren Lkw zeichnet sich noch eine weitere Innovation ab: Der Tausch der leeren Batterien gegen vollgeladene in Batteriewechselstationen [CA26]. Dieser Vorgang dauert nur fünf Minuten und ist deutlich kostengünstiger als das Schnellladen, das mit einem teuren Ausbau des Stromnetzes verbunden ist. In den Wechselstationen können die Batterien langsam und netzdienlich geladen werden und bei Bedarf sogar Strom für das Netz zur Verfügung stellen. Bei den Nutzfahrzeugen spielt in China Wasserstoff mit Brennstoffzellen-E-Antrieben ebenfalls eine starke Rolle und wird aktuell deutlich ausgebaut [FW26]. Der erforderliche Wasserstoff wird in der sonnen- und windreichen Mongolei produziert und per Pipeline in die industriellen Zentren transportiert.

Vor allem bei den Pkw, aber auch bei Nutzfahrzeugen tritt inzwischen in China noch eine weitere Variante des elektrischen Antriebes in den Vordergrund: Das EREV (Extended Range Electric Vehicle). Damit kann die Größe der Batterie und somit auch Kosten und Gewicht des Fahrzeuges deutlich reduziert werden. Die kleine Batterie wird an Bord von einem Stromgenerator auf Basis eines effizienten Verbrennungsmotors, der mit E-Fuel betrieben wird, bei Bedarf aufgeladen. 2025 wurden in China 1,3 Millionen dieser Fahrzeuge verkauft.

Die Entwicklung alternativer Antriebe wird inzwischen aus China heraus geprägt und dominiert. BEV und EREV haben inzwischen die Kostenparität zu den traditionellen verbrennungsmotorischen Antrieben erreicht. Bei den Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeugen wird dies mit den steigenden Produktionsvolumina ebenfalls eintreten. Die Entwicklungen sind sehr dynamisch und typisch für disruptive Innovationen, so wie es bei der digitalen Fotografie auch der Fall war. Gleichzeitig wird die komplette Umstellung auf klimaneutrale Fahrzeuge noch ein sehr langer Weg sein – 97% der weltweiten Flotte müssen noch ersetzt werden.

Die Energieversorgung für den Transportsektor wird dabei eine entscheidende Rolle spielen. Strom aus Sonne und Wind ist in den Wüstenregionen bereits günstiger als fossiler Strom. Um ihn in die dicht besiedelten Industrieregionen zu transportieren sind Wasserstoff und flüssige E-Fuel am besten geeigneten. Sie können auch gleichzeitig essenzielle Speicherfunktion übernehmen, um Bedarf und Erzeugung - beide stark fluktuierend - in Einklang zu bringen. Während China aktuell neue Wasserstoffpipelines baut, schreitet in Europa der Umbau des sehr umfangreichen Erdgasnetzes auf Wasserstoff voran [EH25].

Bei den E-Fuel sind die umfangreichsten Aktivitäten in China und auf der arabischen Halbinsel zu beobachten. Bemerkenswert ist, dass sich die Weltmarktführer Longi (Photovoltaik) und Goldwind (Windkraft) sehr stark im Bereich Wasserstoff und E-Methanol engagieren. China ist der weltweit größte Produzent von Methanol und ist auch bei grünem Methanol führend. Die Technologien, um aus Methanol E-Benzin zu erzeugen sind in China ebenfalls vorhanden. Politisch gibt es für China zwei strategische Treiber: Zum einen geht es darum, die geopolitischen Abhängigkeiten von den Ölförderländern zu reduzieren und zum anderen sich als klimafreundliche Industrienation mit zukunftssträchtigen Produkten zu positionieren.

Saudi Aramaco hat ebenfalls nennenswerte Aktivitäten zu E-Benzin gestartet und wird die Formel1 Rennen ab 2026 damit ausrüsten [SF25]. Das E-Benzin wurde bereits für die kommerziellen Motoren des Stellantis-Konzern erfolgreich getestet [Sc23]. Bei den Kosten werden 80 Cent pro Liter erwartet. [EF25]

Was bedeutet das für die heute so dominante Ölindustrie? Das historisch enorme Wachstum auf heute mehr als 100 Millionen Barrel pro Tag kommt langsam zum Erliegen. Dies ist einerseits auf hohe Förderkapazitäten und andererseits auf einen steigenden Anteil von Elektrofahrzeugen, insbesondere in China, zurückzuführen [CT25]. Bei den aktuell niedrigen Preisen für Rohöl sind die Margen für die Ölkonzerne teilweise gering und die für die Finanzwelt oder Regierungen so wichtigen Gewinnausschüttungen sind in Gefahr. Gleichzeitig bedarf es regelmäßig sehr hoher Investitionen in den Erhalt der Förder- und Raffineriekapazitäten mit zunehmend unsicherer Perspektive auf den Return on Investment.

Eine weitere Innovation mit großen Auswirkungen auf den Transportsektor steht bevor: Das autonome Fahren. Mit Robotaxis wird der Besitz eines eigenen Fahrzeuges an Wichtigkeit verlieren. Tony Seba hat das Thema „Transportation as a Service“ als neues lukratives Geschäftsmodell beschrieben [Se14]. Firmen wie Waymo, Baidu oder Tesla sind hier führend. Die traditionellen Hersteller laufen Gefahr, dass diese Unternehmen ihnen dann diktieren, welche Fahrzeuge zu welchem Preis sie kaufen wollen. Für die Lkw-Hersteller wird das ebenfalls einen großen Einfluss auf die Antriebstechnologie der Zukunft haben. Die aktuelle Strategie nutzt die in Europa vorgeschriebenen Ruhepausen für die Fahrer zum Laden der Batterien. Gibt es keine Fahrer mehr, braucht es auch keine Ruhepause. Antriebstechnologien, die in wenigen Minuten die notwendige Energie zum Weiterfahren „tanken“ kann, ist da klar im Vorteil: Wasserstoff, E-Fuel oder Wechselbatterien.

6. Schlussfolgerungen

Die traditionelle Fahrzeugindustrie kann auf eine einhundertjährige Erfolgsgeschichte zurückblicken, die in den Industrieländern für enormen Wohlstand gesorgt haben. Durch die kontinuierliche Optimierung - die sogenannten inkrementellen Innovationen - kamen immer attraktivere Fahrzeuge auf den Markt. Das dazugehörige, sehr feingliedrige Ökosystem, von der innovativen Zulieferindustrie bis zur breiten Forschungslandschaft, wurde zum Erfolgsfaktor und Markenkern Deutscher Ingenieurskunst schlechthin. Parallel hat die Ölindustrie für die notwendigen, optimierten Kraftstoffe in Form von Diesel und Benzin gesorgt. Mit der Energiewende und den vom Gesetzgeber geforderten CO₂-freien Antrieben, werden diese Industrien zum ersten Mal mit disruptiven Innovationen konfrontiert. Mit der rasanten Kostenreduktionen bei den Batterien, sowie das sich abzeichnende autonomen Fahren gerät die fossile Automobilitäts-Maschine zunehmend unter Druck.

Zu den Schlüsseltechnologien der Zukunft gehören neben den Batterien Erneuerbare Energietechnologien in Form von Photovoltaik und Windkraftanlagen sowie Wasserstofftechnologien. Schnell wachsende Firmen wie Tesla, BYD, CATL, Longi, Goldwing, Alphabet (Waymo) oder Baidu stehen beispielhaft für die neuen Akteure. Dabei entwickeln sich die Aktivitäten in China, Korea und auf der sehr sonnenreichen arabischen Halbinsel sehr

dynamisch. Die politischen Rahmenbedingungen, wie der neue 5-Jahresplan Chinas, bilden die Leitplanken für die Aktivitäten der asiatischen Unternehmer. In Europa ist der 2019 beschlossene Green Deal und die daraus resultierenden Regelwerke ein analoger strategischer Rahmen.

Für die Zukunft der Fahrzeugindustrie und Kraftstoffversorger ist es essenziell sich mit den typischen, gut untersuchten Merkmalen disruptiver Innovation auseinanderzusetzen. Dazu gehören die nur sehr schwer planbare Entwicklung der Märkte für die komplett neuen Produkte und das exponentielle Wachstum in der frühen Phase der Marktdurchdringung. Das erfordert sehr schnelle und flexible Entwicklungsprozesse und Beobachtung der Treiber für die Innovation (z.B. Klimaschutz-Gesetzgebung). Bei den oft kritisierten hohen Kosten und teilweise mangelnden Qualität bei neuen Technologien wird regelmäßig vergessen, dass technologische Weiterentwicklungen und schnell wachsenden Produktionsvolumina zu einer massiven Kostendegression führen. Das künftige, komplette neue Ökosystem muss vollständig und kontinuierlich durchdacht werden, von den Rohstoffen über die nicht vorhandene Zulieferindustrie bis zur Energieversorgung in Form von Kraftstoffen bzw. Strom. Die aktuellen und sich abzeichnenden Veränderungen sind durch ein enormes Tempo, viele neue, agile Akteure und ein sehr breites Innovationsgeschehen geprägt. Dafür sind aber auch erhebliche finanzielle Mittel, die nicht mit den Renditeerwartungen des traditionellen Geschäftes einhergehen, erforderlich.

Die von C.M.Christensen analysierten disruptiven Innovationen erstreckten sich über einen Zeitraum von mehr als einhundert Jahren und haben ein fundamentales, durchgängiges Merkmal gezeigt: Etablierten Konzerne haben es fast nie geschafft, bei disruptiven Innovationen aus sich heraus erfolgreich zu sein und die globalen Entwicklungen mitzugestalten. Meist wurden sie Opfer der sich schnell veränderten Märkte. Das liegt primär an den über Jahrzehnte etablierten Strukturen und Prozessen, die für den Erfolg mit den klassischen Produkten entscheidend waren.

Literaturverzeichnis

[Ai07] Aigle, Thomas; Marz, Lutz. (2007): Automobilität und Innovation. Versuch einer interdisziplinären Systematisierung. WZB Discussion papers, No. SP III 2007-102, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB). <https://hdl.handle.net/10419/47937>

[Ar89] Arthur, B. W. (1989): Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-in by Historical Events. In: Economic Journal, Vol. 99, S. 116-131

[BC68] Boston Consulting Group (1968): The Experience Curve by Bruce Henderson; <https://www.bcg.com/publications/1968/business-unit-strategy-growth-experience-curve>

[BC13] Boston Consulting Group (2013): BCG Classics Revisited: The Experience Curve. PDF. https://web-assets.bcg.com/img-src/The_Experience_Curve_May_2013_tcm9-97647.pdf

[Br98] Bruckner, Eberhard; Ebeling, Werner; Scharnhorst, Andrea (1998): Technologischer Wandel und Innovation – Stochastische Modelle für innovativer Veränderungen in der Ökonomie, In: Pohlmann, Ludwig (Hg.) (1998): Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Berlin: Duncker & Humblot, S. 361-382

[CA26] CATL (2026): Batteriewechselstationen; <https://www.electrive.net/2026/01/05/china-catl-meldet-1-000-batteriewechselstationen-fuer-pkw/>

- [CT25] Carbontracker (2025): The Quiet Retreat: Why the oil and gas industry is implementing its own decline, even as the IEA resurrects an old growth scenario. <https://carbontracker.org/the-quiet-retreat-why-the-oil-and-gas-industry-is-implementing-its-own-decline-even-as-the-iea-resurrects-an-old-growth-scenario/#:~:text=The%20end%20of%20transport%20growth,%20Delectricity%20substitution.%5B3%5D>
- [Cr97] Christensen, Calyton M. (1997): The Innovators Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail, Harvard Business School Press.
- [De02] Debus, C. (2002): Routine und Innovation – Management langfristigen Wachstums etablierter Unternehmungen. Marburg Förderzentrum für Existenzgründer aus der Universität (Mafex), Band 4, Marburg: Mafex. ISBN 3-8311-4099-5
- [Di09] Dierkes, M., Marz, L., Aigle, T. (2009): Die automobile Wende, Analyse einer Innovationslandschaft. In: Popp, R., Schüll, E. (eds) Zukunftsforschung und Zukunftsgestaltung. Zukunft und Forschung. Springer, Berlin, Heidelberg. S. 323-340. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78564-4_25
- [Eb02] Ebeling, Werner; Scharnhorst, Andrea (2002): Technische Evolution aus der Sicht der Theorie der Selbstorganisation. In: Parthey, Heinrich; Spur, Günter (Hg.) (2002): Wissenschaftsforschung. Jahrbuch 2001. Wissenschaft und Innovation, S. 59-73
- [Ei78]. Eigen, Manfred; Schuster, Peter (1978): The hypercycle – a principle of natural self-organization, part A. In: Naturwissenschaften, Vol. 64, S 541-565
- [EF25] E-Fuels-Forum (2025): Myths about e-fuels; www.efuels-forum.de/mythen-ueber-efuels
- [EH25] European Hydrogen Backbone (2025); <https://ehb.eu>
- [FW26] Fuel Cell Works (2026): Hydrogen Trucks; <https://fuelcellworks.com/2026/01/21/fuel-cells/china-expands-hydrogen-trucking-while-totalenergies-ceo-flags-industry-concerns>
- [Ha88] Hauschildt, J. (1988): Innovationsmanagement. Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 211, Universität Kiel, Institut für Betriebswirtschaftslehre. https://www.econstor.eu/bitstream/10419/190938/1/manuskript_211.pdf.
- [He01] Helm, R. (2001): Planung und Vermarktung von Innovationen: Die Präferenz von Konsumenten für verschiedene Innovationsumfänge unter Berücksichtigung des optimalen Simulationsniveaus und marktbezogener Einflussfaktoren. Schäffer-Poeschel.
- [He90] Henderson, R. M.; Clark, K. B. (1990): Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms. Administrative Science Quarterly, 35(1), 9–30.
- [IE24] International Energy Agency (2024): Energy Technologies Perspectives; Figure 1.8.; <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2024>
- [IR24] IRENA Renewable power generation costs in 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-621. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf
- [IS25]: Fraunhofer ISE (2025): Photovoltaics Report. www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html
- [Ko01] Konrad, W., & Nill, J. (2001): Innovationen für Nachhaltigkeit. Ein interdisziplinärer Beitrag zur konzeptionellen Klärung aus wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Perspektive. Schriftenreihe des IÖW 157/01. Institut für ökologische Wirtschaftsförderung.
- [No25]: Nobel Prize (2025): Scientific Background to the Sveriges Riksbank Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel. Sustained economic growth through technological progress; <https://www.nobelprize.org/uploads/2025/10/advanced-economicsciencesprize2025.pdf>
- [OW24] Our World in Data (2024): Solar photovoltaic panel price. <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices-vs-cumulative-capacity>

- [OW25] Our World in Data (2025): Price for lithium ion battery cells;
<https://ourworldindata.org/grapher/price-of-lithium-ion-battery-cells#sources-and-processing>
- [Ri13] Rifkin, J. (2011): The Third Industrial Revolution. How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World. New York; <https://archive.org/details/thirdindustrialr0000rifk>. ISBN-13: 978-0230113541
- [Re25]: Reports and Data (2025): Automotive Market Size, Share, Trends, Demand, and Forecast, 2025–203.5 <https://www.reportsanddata.com/report-detail/automotive-market>.
- [Rü13] Rückert-John, J. (2013): Soziale Innovation und Nachhaltigkeit. Perspektiven sozialen Wandels. Springs-VS. DOI: 10.1007/978-3-531-18974-1.
- [Sc23] Schäfer, Patrik (2023): Stellantis Confirms E-Fuel Compatibility;
<https://www.springerprofessional.de/en/synthetic-fuels/internal-combustion-engine/stellantis-confirms-e-fuel-compatibility-/26053490>
- [Sc39]: Schumpeter, J. A. (1939): Business Cycles. A Theoretical, Historical, and Statistical Analysis of the Capitalist Process, two vols, New York: McGraw-Hill.
- [Sc09]: Scharnhorst, A., Marz, L., Aigle, T. (2009): Designing Survival Strategies for Propulsion Innovations. arXiv: Physics and Society. 35 Seiten. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0910.4313>
- [Se14] Seba, T. (2014): Clean Disruption of Energy and Transportation: How Silicon Valley Will Make Oil, Nuclear, Natural Gas, Coal, Electric Utilities and Conventional Cars. ISBN: 9780692210536
- [SF25] The surprising truth about Formula 1's new sustainable fuel. BBC Science Focus;
<https://www.sciencefocus.com/news/synthetic-fuels-formula-1>
- [VD25]: VDA (2025): Die Elektromobilität weltweit auf dem Vormarsch,
<https://www.vda.de/de/themen/elektromobilitaet/marktentwicklung-europa-international>
- [We05] Weider, M., & Marz, L. (2005): Quantensprung oder Sackgasse? Zum Stand und den Entwicklungsperspektiven der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in der Automobilindustrie. In S. Rammler & M. Weider (Hrsg.), Wasserstoffauto – Zwischen Markt und Mythos S. 9–33.
- [Wr36] Wright, T. P. (1936): Factors Affecting the Cost of Airplanes. Journal of the Aeronautical Sciences, 3(4), 122–128. <https://doi.org/10.2514/8.155>
- [Ye79] Yelle, L. E. (1979): The Learning Curve: Historical Review and Comprehensive Survey. Decision Sciences, 10(2), 302–328.