

Falck, Oliver; Ebnet, Michael; Koenen, Johannes; Dieler, Julian; Wackerbauer, Johann

Research Report

Auswirkungen eines Zulassungsverbots für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor

ifo Forschungsberichte, No. 87

Provided in Cooperation with:

Ifo Institute – Leibniz Institute for Economic Research at the University of Munich

Suggested Citation: Falck, Oliver; Ebnet, Michael; Koenen, Johannes; Dieler, Julian; Wackerbauer, Johann (2017) : Auswirkungen eines Zulassungsverbots für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor, ifo Forschungsberichte, No. 87, ISBN 978-3-95942-033-4, ifo Institut - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München, München

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/176884>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Auswirkungen eines Zulassungsverbots für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor

*Oliver Falck, Michael Ebnet, Johannes Koenen, Julian Dieler,
Johann Wackerbauer*



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-95942-033-4

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlags ist es auch nicht gestattet, dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) oder auf andere Art zu vervielfältigen.

© ifo Institut, München 2017

Druck: ifo Institut, München

ifo Institut im Internet:
<http://www.cesifo-group.de>

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Executive Summary	1
Kernaussagen dieser Studie zum Zulassungsverbot.....	1
Überblick	1
Overview	5
1 Einleitung	9
2 Potentielle Auswirkungen auf Produktionswert, Wertschöpfung und Beschäftigung.....	11
2.1 Methodik und Datengrundlage	11
2.2 Bedeutung des Verbrennungsmotors in Pkw und leichten Nfz für die deutsche Industrie, die Automobilindustrie sowie ihre Zulieferbranchen im Jahr 2015	13
2.2.1 Produktionswert.....	13
2.2.2 Bruttowertschöpfung.....	15
2.2.3 Beschäftigung.....	17
2.3 Größenstruktur und Anpassungsfähigkeit von Herstellern betroffener Produktarten	23
2.4 Gibt es bereits eine Verlagerungstendenz „weg vom Verbrennungsmotor“? Produktion von Komponenten für Elektroautos in Deutschland bis 2015	26
2.5 Deutschland als reiner Anbietermarkt?	36
2.6 Fazit	37
3 Innovationsanreize in Verbrennungsmotoren und Alternativtechnologien ...	40
3.1 Zielsetzung, Methodik und Datengrundlage	40
3.2 Investitionen in Verbrennungsmotoren, alternative Antriebe und Batterien	43
3.3 Innovation bei Verbrauchsreduktion und alternativen Kraftstoffen	49
3.4 Warum fassen alternative Antriebe nicht schneller im (deutschen) Markt Fuß?	50
3.5 Fazit	52

4	Umweltauswirkungen	54
4.1	Methodik und Datengrundlage	54
4.2	Emissionen von Pkw	56
4.2.1	Jährliche Gesamtfahrleistung.....	57
4.2.2	Treibstoffverbrauch	59
4.2.3	Spezifische Emissionen	60
4.2.4	Ergebnisse.....	62
4.2.5	Sensitivitätsanalysen	64
4.3	Emissionen leichter Nutzfahrzeuge	65
4.4	Zulassungsverbot und Klimaziele	67
4.5	Lokal wirkende Emissionen.....	67
4.6	Flächen- und Ressourcenverbrauch	68
4.7	Fazit	71
	Anhang	72
	Literaturverzeichnis	83

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Herstellung von betroffenen/nicht betroffenen Produktarten in Deutschland.....	28
Abbildung 2: Herstellung von Elektromotoren (Mehrphasen-Wechselstrom) in Deutschland.....	31
Abbildung 3: Herstellung von Batterien und Batterietechnik in Deutschland	32
Abbildung 4: Ladesäulen für Elektroautos in Deutschland	33
Abbildung 5: Patente Verbrennungsmotoren – Anteile der jeweiligen Länder	44
Abbildung 6: Patente Elektrofahrzeuge – Anteile der jeweiligen Länder.....	46
Abbildung 7: Patente Hybridfahrzeuge – Anteile der jeweiligen Länder	46
Abbildung 8: Patente Brennstoffzellenfahrzeuge – Anteile der jeweiligen Länder	47
Abbildung 9: Patente Batterien und Akkumulatoren – Anteile der jeweiligen Länder..	48
Abbildung 10: Anteil der verbrauchsreduzierenden Patente an deutschen Verbrennerpatenten	50
Abbildung 11: Ein Modell des Innovationsprozesses - potentielle Marktversagen bei der Einführung innovativer Produkte	51
Abbildung 12: Anteile deutscher Patente über alternative Antriebstechnologien.....	52
Abbildung 13: Jahresfahrleistung.....	57
Abbildung 14: Entwicklung der PKW-Neuzulassungen im Referenz- und in den Verbots-szenarien.....	59
Abbildung 15: Entwicklung der CO ₂ Emissionen im BAU- und den Verbotsszenarien für PKW	63
Abbildung 16: Entwicklung des Fahrzeugbestandes im Referenzszenario.....	81
Abbildung 17: Entwicklung des Fahrzeugbestands in den Verbotsszenarien	82
Abbildung 18: Entwicklung der Pkw-CO ₂ -Emissionen bei verschiedenen Ersatzraten und einem kompletten Zulassungsverbot von Pkw mit Verbrennungsmotoren	82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Produktarten, die von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor direkt betroffen wären (2015)	21
Tabelle 2: Produktarten, die von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor indirekt betroffen wären (2015)	22
Tabelle 3: Produktarten eines Pkw bzw. leichten Nfz	72
Tabelle 4: Wertschöpfungsquoten der für Pkw und leichte Nfz relevanten WZ-4-Steller (2014)	73
Tabelle 5: Beschäftigungsquoten der für Pkw und leichte Nfz relevanten WZ-4-Steller (2015)	74
Tabelle 6: Exportquoten der für Pkw und leichte Nfz relevanten WZ-4-Steller (2015)..	75
Tabelle 7: IPC Codes für die Kategorie Verbrennungsmotoren.....	76
Tabelle 8: IPC Codes für die Kategorie Verbrauchsreduktion bei Verbrennungsmotoren	77
Tabelle 9: IPC Codes für die Kategorie Elektrofahrzeuge.....	78
Tabelle 10: IPC Codes für die Kategorie Hybridfahrzeuge.....	79
Tabelle 11: IPC Codes für die Kategorie Brennstoffzellenfahrzeuge	79
Tabelle 12: IPC Codes für die Kategorie Batterien und Akkumulatoren	80
Tabelle 13: Treibstoffverbrauch	81

Executive Summary

Kernaussagen dieser Studie zum Zulassungsverbot

<p>Mehr als 600.000 heutige deutsche Industrie-Arbeitsplätze wären direkt oder indirekt betroffen.</p> <p>Rund 130.000 Arbeitsplätze in KMU wären besonders bedroht.</p> <p>Zum heutigen Stand wären ca. 13% (48 Mrd. €) der Bruttowertschöpfung der deutschen Industrie tangiert.</p>	Kapitel 2
<p>Das Verbot ist nicht durch mangelnde Innovationsbemühungen der deutschen Automobilindustrie zu begründen.</p>	Kapitel 3
<p>Im Zeitraum 2030-2050 würden gegenüber dem Referenzszenario insgesamt ca. 32% CO₂-Emissionen eingespart.</p> <p>Erheblicher zusätzlicher regenerativer Strombedarf: Im Jahr 2031 zusätzlich 1,1% und im Jahr 2050 sogar zusätzlich 7,6% der prognostizierten Gesamtstromnachfrage.</p> <p>Anforderungen an Produktionskapazität und Ladeinfrastruktur: Allein im Jahr 2030 müssten fast 3 Mill. zusätzliche Elektroautos zugelassen werden – damit würde sich die <i>Gesamtzahl</i> in einem Jahr fast verdreifachen.</p>	Kapitel 4

Überblick

Diese Studie untersucht empirisch die Auswirkungen eines Neuzulassungsverbots für Personenkraftwagen (Pkw) und leichte Nutzfahrzeuge (Nfz) mit Verbrennungsmotor ab dem Jahr 2030. Sie gliedert sich in drei Teile: In Kapitel 2 werden potentielle negative Folgen und Risiken eines solchen Verbots auf die Leistungsfähigkeit und Beschäftigung in der deutschen Industrie untersucht. In Kapitel 3 liegt der Fokus auf den Innovationsanreizen der deutschen Automobilindustrie in den Bereichen Verbrennungsmotor und alternative Antriebstechnologien. Kapitel 4 analysiert schließlich die Umweltauswirkungen eines Zulassungsverbots.

Auswirkungen auf Beschäftigung und Wertschöpfung

Mittels der detaillierten Produktionserhebung im Verarbeitenden Gewerbe werden die potentiellen Risiken eines Zulassungsverbots von Pkw und leichten Nfz mit Verbrennungsmotor für Beschäftigung und Wertschöpfung in Deutschland quantifiziert. Demnach stellen – ausgehend von der Produktionsstruktur im Jahr 2015 – mindestens 457.000 Beschäftigte Produktarten her, die von einem entsprechenden Verbot direkt betroffen wären (z.B. Benzin- und Dieselmotoren, Abgasreinigungssysteme). Das entspricht 7,5% der deutschen Industriebeschäftigung. Der weit überwiegende Teil davon (426.000) ist in der Automobilindustrie angesiedelt. Werden auch Beschäftigte aus Zuliefer- und Komplementärbereichen mit einbezogen, die nur indirekt an den Verbrenner gekoppelt sind (z.B. Schaltgetriebe, die in alternativen Antrieben weniger Komplexität aufweisen, oder die Kraftstoffherstellung), erhöht sich die Zahl der potentiell von einem Zulassungsverbot betroffenen Arbeitsplätze um mindestens 163.000 Personen bzw. knapp 3% der deutschen Industriebeschäftigung. Im Fokus steht hier in erster Linie die Metallindustrie: 102.000 Beschäftigte produzieren dort Teile für Straßenfahrzeuge. Direkte und indirekte Abhängigkeiten zusammengenommen betrafe ein Zulassungsverbot schätzungsweise mindestens 620.000 Beschäftigte. Das sind Stand 2015 gut 10% der deutschen Industriebeschäftigung.

Von den 457.000 direkt betroffenen Beschäftigten wären vor allem diejenigen 31.000 besonders bedroht, die in kleinen und mittleren Unternehmen tätig sind. Letzteren dürfte es im Vergleich zu Großunternehmen deutlich schwerer fallen, parallel oder alternativ zur Produktion von Verbrenner-Komponenten auf Produkte und Geschäftsfelder für Elektrofahrzeuge umzustellen. Unter den 163.000 indirekt betroffenen Beschäftigten wären sogar 101.000 in besonderem Maße gefährdet – allen voran bei der schwerpunktmäßig in kleineren Betriebseinheiten erfolgenden Herstellung von Metallteilen für Kfz.

Die Abhängigkeit von der Verbrennungstechnologie ist im Hinblick auf den Wertschöpfungsbeitrag für die deutsche Industrie noch stärker als bei der Beschäftigung. Ein Umstand, der im Wesentlichen auf die Automobilindustrie zurückzuführen ist und die hohe (Arbeits-)Produktivität ihres Personals widerspiegelt. Direkte und indirekte Effekte zusammengenommen wären von einem Zulassungsverbot potentiell knapp 13% der Bruttowertschöpfung der deutschen Industrie tangiert, was Stand 2015 einem Volumen von 48 Mrd. € entspricht. Gegen einen vollständigen Wegfall der Beschäftigung und Wertschöpfung in den genannten Größenordnungen spricht, dass gewisse Zulieferteile für den Verbrennungsmotor nicht ausschließlich für Pkw und leichte Nfz produziert werden, sondern weiterhin in – vom angedachten Zulassungsverbot wohl ausgenommenen – schweren Nfz

(Lastwagen, Omnibusse) einsetzbar sind. Zudem muss berücksichtigt werden, dass es im Bereich alternativer Antriebsarten in Deutschland zu einem Beschäftigungsaufbau kommen kann, der den Abbau im Verbrenner-Bereich im Aggregat zumindest teilweise kompensieren würde.

Hinsichtlich der Dynamik im Zeitraum 2011-2015 zeigt sich, dass die Wertschöpfung in denjenigen Produktgruppen stärker gewachsen ist, die von einem Zulassungsverbot nicht betroffen wären. Im gegebenen Regulierungsrahmen findet also bereits eine Verlagerungstendenz statt. Dies bezieht sich auch auf das Wachstum bei Technologien für batteriebetriebene Elektromotoren bei Pkw und leichten Nfz. Allerdings bewegt sich der Anteil, den Elektrofahrzeuge und zentrale Komponenten wie Elektromotor und Batterie bislang zu Beschäftigung und Bruttowertschöpfung der deutschen Industrie beisteuern, im Promille-Bereich.

Innovationsanreize in alternative Technologien

In der öffentlichen Diskussion ist die Wahrnehmung verbreitet, dass die Automobilindustrie in Deutschland es versäumt habe, technologische Kompetenz in den alternativen Antriebstechnologien aufzubauen. Dies wird als eine innovationspolitische Begründung für ein Zulassungsverbot angeführt. Die Investitionsbemühungen der deutschen Automobilindustrie werden in dieser Studie anhand von bewilligten Patentanmeldungen für Verbrennungsmotoren und alternative Antriebe im Zeitraum 1995-2015 analysiert und ins Verhältnis zu den wichtigsten Wettbewerbsnationen gestellt. Tatsächlich ist der deutsche Anteil an den Patenten der führenden Wettbewerbsnationen im Zeitraum 2010-2015 im Bereich Elektrofahrzeuge mit 34% führend, ebenso im Bereich Hybridfahrzeuge (32%). Darüber hinaus unterscheiden sich die Positionen nicht grundsätzlich vom Bereich Verbrennungsmotoren, in dem ein Anteil von 40% erreicht wurde. Bei Verbrennungsmotoren zielen zudem mehr als zwei von drei deutschen Patenten auf Verbrauchsreduktion ab. Es lässt sich somit nicht konstatieren, dass Anreize zur Investition in alternative Technologien im Vergleich zu den Wettbewerbern gefehlt hätten. Die technologische Basis für alternative Antriebe ist in Deutschland vorhanden und aus innovationspolitischer Sicht ist ein Zulassungsverbot für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren nicht zu begründen. Vielmehr könnte ein Fokus auf Infrastruktur und nachfrageorientierte (Politik)Maßnahmen die Marktdurchdringung mit innovativen Produkten beschleunigen.

Umweltauswirkungen

Die Studie konzentriert sich auf das klimarelevante Treibhausgas CO₂. Darüber hinaus wird eine qualitative Abschätzung der Auswirkungen auf lokale Emissionen und den Flächen- und Ressourcenverbrauch vorgenommen. Für den CO₂-Ausstoß wird ein

Emissionsprognosemodell der Well to Wheel (WTW) Emissionen von Pkw und leichten Nfz (<3,5t) bis 2050 entwickelt. Die Wirkung eines Zulassungsverbots wird anhand der Differenz eines „Business-as-usual“ (BAU) Szenarios und eines Verbotsszenarios berechnet. Für Pkw prognostiziert das Modell einen kumulierten Rückgang der CO₂-Emissionen von 32% für den Prognosezeitraum (2030-2050) durch ein Neuzulassungsverbot von Verbrennern ab 2030 gegenüber dem BAU Szenario. Bereits im BAU Szenario wird bis zum Jahr 2050 im Vergleich zu den Emissionen im Jahr 2016 durch technischen Fortschritt und die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte ein Rückgang von etwa 53% erzielt. Hinsichtlich lokal wirkender Emissionen sind ähnliche Rückgänge wie bei den CO₂-Emissionen zu erwarten. Nachteile für Elektrofahrzeuge ergeben sich vor allem bei der Fahrzeugherstellung durch den höheren Materialeinsatz und den Einsatz bestimmter Materialien in der Batterie, ressourcenseitig beim kumulierten Rohstoffaufwand und Wasserbedarf und umweltseitig durch Versauerung und gesundheitliche Belastungen (Feinstaubemissionen, Humantoxizität).

Die resultierende starke Anpassung bei der Zusammensetzung der Neuzulassungen ab 2030 macht allerdings erneut deutlich, dass die Verbotsmaßnahme einen starken Eingriff in die Produktion und das Wirtschaftsgeschehen darstellen würde: Im ersten Geltungsjahr eines vollständigen Zulassungsverbots für Pkw mit Verbrennungsmotoren müssten statt der ohne ein Verbot prognostizierten knapp 250.000 batterieelektrischen Fahrzeuge mehr als 3,3 Mill. solcher Autos zugelassen werden, um die fehlenden Neuzulassungen bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zu kompensieren. Dies würde parallel enorme zusätzliche Anforderungen an die Ladeinfrastruktur stellen, für welche eine aktuelle Studie ca. einen Ladepunkt je 30 Elektroautos anrät. Die Intensität des Eingriffs spiegelt sich auch in Hinblick auf den zusätzlichen Stromverbrauch wider: Im Jahr 2031 müsste die deutsche Stromproduktion insgesamt aufgrund des Zulassungsverbots um ca. 1,1% zunehmen – und dies CO₂-neutral, um die Einsparungsziele für den Energiesektor trotzdem zu erreichen. Bis zum Jahr 2050 steigt dann die zusätzliche Stromanforderung aufgrund des Verbots sogar auf 7,6% der Gesamtstrommenge an, was in einem Aufschlag auf den durchschnittlichen Strompreis in Deutschland von ca. 0,5% resultieren würde.

Gesamtbetrachtung

Unter den getroffenen Annahmen würde ein Zulassungsverbot im Zeitraum 2030-2050 zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen durch Pkw um etwa 32% gegenüber dem BAU Szenario führen, wenn gleichzeitig die Einsparziele im Bereich der Stromproduktion erreicht werden. Die hohe Intensität dieses Eingriffs zeigt sich bei den notwendigen Fahrzeugstückzahlen und den Anforderungen an die Stromerzeugung. Gleichzeitig ist die Technologie, auf die sich das Verbot beziehen würde, in der Wertschöpfungs- und

Beschäftigungsstruktur der Industrie in Deutschland und Europa breit verankert, was durch die vom Verbot betroffenen Beschäftigten und Wertschöpfungsanteile deutlich wird. Internationale Studien von führenden Wissenschaftlern zeigen, dass preiswirksame Maßnahmen mit geringerer Eingriffsintensität – im Vergleich zu Verboten oder Produktionsquoten – die erwünschte technologische Entwicklung befördern. Vor diesem Hintergrund gibt es also bessere Instrumente als ein Zulassungsverbot, um die Umwelt- und Innovationsziele zu erreichen.

Overview

We use empirical methods to analyze the effects of contemplated legislation banning permits for new cars and light trucks with internal combustion engines starting in 2030. The study has three distinct parts: In Chapter 2, we quantify the potential detrimental effects and risks of such a ban for the productivity and employment in the German industry. Chapter 3 focusses on the German automotive industry's incentives to innovate in the areas of combustion engines as well as alternative propulsion systems. Chapter 4 analyzes the effects of a ban on the environment, in particular CO₂ emissions.

Effects on production, value added and employment

Using highly detailed official manufacturing statistics, we study which groups of products would be affected by a ban of vehicles with combustion engines, in order to quantify potential risks for output and employment. Based on the structure of production in 2015, at least 457.000 employees are involved in producing types of products which would be directly affected by the ban (e.g., diesel engines). This is equivalent to 7,5% of overall manufacturing employment in Germany. The biggest share of these employees (426.000) works in the automotive industry itself. If one includes product groups which would be indirectly affected (e.g., transmission systems, which are more complex in vehicles with combustion engines), the number of potentially affected jobs rises by 163.000 or an additional 3% of overall manufacturing employment. These jobs are mainly clustered in the metal industry: 102.000 employees in metal processing produce parts destined for vehicles with combustion engines. Taking the direct and indirect channel together, in total at least 620.000 employees would be affected by the ban – more than 10% of total German manufacturing employment.

Among the 457.000 directly affected jobs, those 31.000 would be particularly at risk which are situated at small and medium-sized enterprises. These firms should face larger difficulties than large companies in developing new alternative fields of business against the background of a major shift in propulsion technology. This share

is substantially larger among indirectly affected jobs: Here 101.000 out of 163.000 are situated in small and medium-sized enterprises. These are especially widespread among automotive suppliers in the metal industry.

When considering value-added instead of employment, these effects become even more pronounced. This is due to the exceptionally high average labor productivity in the automotive industry. In the sum of direct and indirect effects, around 13% of German overall manufacturing value added would be affected by the ban; based on the 2015 figures, this would involve a volume of 48 billion €. In interpreting these figures, one has to bear in mind that not the entire workforce and value-added “at risk” would necessarily vanish. For example, certain parts are also used in heavier trucks and buses, which would probably not be subject to the ban. In addition, new jobs in the areas of alternative propulsion technologies in Germany would contribute to limiting employment reduction, at least in the aggregate.

Considering the development during the period 2011-2015, we find that those groups of products within automotive manufacturing that would not be affected by the ban display substantially stronger growth rates than affected product groups – one can therefore already observe a technological shift within the current regulatory setting. A similar finding applies to growth rates for product categories which are used in electric vehicles – though currently, the employment and value-added share of these vehicles and components makes up only a miniscule share of employment and value-added in German manufacturing.

Incentives to innovate in alternative technologies

In the public perception, the German automotive industry has failed to develop technological capabilities with regard to alternative propulsion technologies. This is used as an innovation-policy argument for introducing the contemplated ban. We analyze the track record of innovative investments of the German automotive industry using patent data for combustion engines and alternative technologies over the period 1995-2015, comparing the German patent output to those of the five major competitors. We find that the German share of patents among the leading automotive nations in the most recent period 2010-2015 in the area of electric vehicles was the highest with 34% of patents; a similar position is observed with regard to hybrid vehicles (32%). Further, the situation in these fields is not fundamentally different to the share of combustion engine patents (40%). Among German combustion engine patents, we find that more than two-thirds of all inventions focus on making engines more fuel-efficient. Therefore there is no evidence of lacking innovation incentives in the area of alternative propulsion technologies compared to competing countries. Overall, the technology base for alternative propulsion systems in Germany is sufficient – instead, focusing on the required infrastructure and demand-oriented

policy-measures could accelerate the diffusion of innovative products in this field. From the perspective of innovation policy, therefore, the rationale for banning cars and light trucks with combustion engines appears weak.

Effects on the environment

Our study focuses on CO₂ emissions. In addition, we provide a qualitative assessment of the potential effects on local emissions and consumption of land and resources. For CO₂ emissions, we develop a model predicting the well to wheel (WTW) emissions of cars and light trucks until 2050. The effect of the ban is calculated using the difference between a “business as usual” (BAU) scenario and a setting in which the ban is implemented. For cars, the model predicts a cumulated reduction of CO₂ emissions by 32% within the forecast horizon (2030-2050) due to implementation of the ban. Note that even in the BAU scenario, a reduction in emissions of about 53% is achieved due to expected technological advances and the composition of the vehicle fleet. The expected results for local emissions are analogous. Disadvantages of electric vehicles are associated with their production (amount and composition of materials), the required resources including water-usage, as well as adverse effects on the environment (acid impact, particulates).

These findings are associated with a very substantial adjustment with regard to the composition of new vehicle registrations from 2030 on, which underlines that the contemplated policy represents a serious intervention into the market. In the first year of the ban, instead of the predicted 250.000 new electric vehicles in the BAU scenario, 3,3 million new electric vehicles would have to be purchased to compensate for the otherwise newly registered vehicles with combustion engines. Clearly, this would put enormous pressure on the charging infrastructure, for which a recent study proposes a ratio of about 1 charger for 30 electric vehicles. Considering the electricity market yields a similar picture. In the year 2031, already, the registration ban would lead to an additional 1,1% increase in the required electricity generation in Germany overall, which would have to be generated completely from renewable sources to still meet the reduction targets for energy generation. This additional (renewable) electricity demand shock increases up to 7,6% of the overall German electricity generation by 2050. This would result in an increase of average electricity prices by about 0,5%.

Overall assessment

Given the assumptions of our prediction model, a registration ban would lead to a cumulative emission reduction of CO₂ by about 32% over the period 2030-2050 compared to the BAU scenario, if at the same time the reduction targets in electricity generation are achieved. The high intensity of this measure are reflected by the requirements with regard to vehicle numbers and electricity generation. On the other

hand, the technology which would be subject to the ban plays an important role for value-added and employment for manufacturing in Germany and Europe. International studies by leading researchers show that measures targeting relative prices – i.e., less intense interventions than bans or quotas – can achieve optimal transition paths between technologies. Taking these observations into account, the registration ban is not the best policy to achieve environmental and innovation goals.

1 Einleitung

Ein Zulassungsverbot von Personenkraftwagen (Pkw) und leichten Nutzfahrzeugen (Nfz) mit Verbrennungsmotoren ab dem Jahr 2030 in Deutschland, wie es beispielsweise das Wahlprogramm der Partei Bündnis 90/Die Grünen für die Bundestagswahl 2017 vorsieht, wäre ein erheblicher Eingriff der Politik in das Marktgeschehen. Solche Eingriffe, auch wenn sie massiver Natur sind, können prinzipiell aus ökonomischer Sicht gerechtfertigt sein. Allerdings gibt es für eine solche Rechtfertigung drei Voraussetzungen: Erstens müsste ein entsprechend schweres Versagen des Marktes vorliegen. Zweitens müsste die Politikmaßnahme dazu geeignet sein, dieses Marktversagen zu beseitigen oder zumindest signifikant abzumildern. Drittens muss man die (gewünschten) Wirkungen der Politik gegen unbeabsichtigte negative Auswirkungen und Risiken abwägen.

In der politischen Debatte und Forschung sind es insbesondere zwei Arten von Marktversagen, die im Zusammenhang mit Produktion, Verkauf und Nutzung von Automobilen mit Verbrennungsmotoren angeführt werden. Das erste ist eine klassische Externalität: Die im Individualverkehr durch Emissionen verursachten Auswirkungen auf das Klima werden von den Fahrern nicht ausreichend berücksichtigt, wodurch der Klimawandel beschleunigt wird – analog lässt sich natürlich auch für andere Emissionen und Immissionen argumentieren. Das zweite postulierte Marktversagen bezieht sich auf die Anreize für deutsche Automobilkonzerne und Zulieferer, an alternativen Antriebstechnologien zu forschen. Aufgrund der herausragenden Wettbewerbsposition im Bereich der Verbrennungsmotoren fehle der Anreiz, in Forschung und Entwicklung im Bereich alternativer Antriebskonzepte zu investieren (siehe beispielsweise Aghion et al. 2016). Man ruhe sich quasi auf den eigenen Lorbeeren aus.

Das Ziel dieser Studie ist, anhand von überprüfbaren empirischen Daten und Methoden hinsichtlich der Rechtfertigung für die angedachte Einführung eines Zulassungsverbots für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotoren Transparenz zu schaffen. Hierfür werden entsprechend der einleitend dargestellten Eingriffslogik insbesondere die folgenden drei Fragestellungen überprüft, wodurch die Struktur dieser Studie gegeben ist:

1. Was ist der Status quo im Hinblick auf die Bedeutung des Verbrennungsmotors für Produktionswert, Wertschöpfung und Beschäftigung in der deutschen (Automobil-) Industrie? Hieraus leiten sich unmittelbar die potentiellen

unbeabsichtigten negativen Auswirkungen und Risiken des Verbots ab.¹ Im Kapitel 2 werden diese zum heutigen Stand quantifiziert.

2. Liegt tatsächlich ein Marktversagen im Hinblick auf Innovationen bei alternativen Antrieben vor? In Kapitel 3 untersuchen wir die Innovationsbemühungen und Erfolge der deutschen Automobilindustrie im Bereich Elektromobilität, Hybridfahrzeuge und Brennstoffzelle relativ zur Position bei Verbrennungsmotoren sowie im Vergleich zu internationalen Wettbewerbern.
3. Zu welchem Grad ist die Verbotsmaßnahme geeignet, ab 2030 den Ausstoß von CO₂ gegenüber einem Szenario ohne solch ein Verbot zu reduzieren? Wie hoch fällt also bei den CO₂-Emissionen die gewünschte Wirkung, d.h., die Milderung des Marktversagens, durch die Politik aus? Diese Fragestellung bildet den zentralen Gegenstand² des abschließenden Kapitels 4 dieser Studie.

Für den Kontext des angedachten Verbots sind die Ergebnisse der aktuellen internationalen Forschung von Bedeutung. Nicht nur für die Politik, auch für die Wissenschaft ist die Thematik, wie der Übergang von einer Ausgangstechnologie auf „saubere“ Ersatztechnologien optimal gestaltet werden kann, von großem Interesse. Acemoglu et al (2016) zeigen anhand von Daten aus dem amerikanischen Energiesektor, dass man allein mithilfe von Maßnahmen, die sich auf effektive Marktpreise auswirken (also insbesondere mit Steuern und Subventionen anstatt mit Verboten oder Produktionsquoten) einen wohlfahrtsoptimalen Übergang erreichen kann. In Bezug auf die Verhältnismäßigkeit eines Zulassungsverbots sollte also berücksichtigt werden, dass der Politik andere Maßnahmen zur Verfügung stehen, um einen optimalen Übergang zu gestalten. Insbesondere sind die folgenden zu nennen: Mit Besteuerung (z.B. von Kraftstoffen, gefahrenen Kilometern, Fahrzeugen) können externe Effekte, wie der Ausstoß klimaschädlicher Gase, mit einem Preisaufschlag versehen werden, was zur Internalisierung durch die Nutzer beiträgt. Investitionen in Forschung und Entwicklung neuer Produkte lassen sich durch Instrumente der Innovationspolitik gezielt anregen. Nachfrageorientierte Instrumente wie Kaufprämien und Investitionen in Infrastruktur können zur schnelleren Marktdurchdringung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben beitragen. Diese Politikmaßnahmen stellen einen weniger einschneidenden Eingriff in den Markt dar und sind in verschiedenen Formen im In- und Ausland bereits implementiert.

¹ Gegenstand dieser Studie ist ein potentielles Zulassungsverbot in Deutschland – die Vorgehensweise und Mechanismen ließen sich jedoch auf Verbotsszenarien in anderen Ländern, in denen die Automobilindustrie eine ähnliche Rolle spielt, übertragen. Darüber hinaus hätte auch ein „deutsches“ Verbot nicht nur hierzulande Folgen. Deutschland ist ein wichtiger Absatzmarkt für ausländische Automobilfirmen, außerdem gibt es enge internationale Verflechtungen über Konzern- und Zuliefererstrukturen insbesondere in osteuropäische Staaten.

² Andere Auswirkungen, wie zum Beispiel lokale Immissionen, werden ebenfalls diskutiert.

2 Potentielle Auswirkungen auf Produktionswert, Wertschöpfung und Beschäftigung

In diesem Abschnitt analysieren wir potentielle negative Auswirkungen des angedachten Zulassungsverbots auf die deutsche Automobilindustrie und mit ihr verbundene Wirtschaftszweige. Dafür legen wir anhand detaillierter Daten aus der amtlichen Statistik dar, welche Rolle Verbrennungsmotoren gegenwärtig für den Produktionswert im deutschen Verarbeitenden Gewerbe spielen – diese Produktionswerte lassen sich dann in einem zweiten Schritt auf Wertschöpfung und Beschäftigung umrechnen. Im Gegensatz zu anderen im Wesentlichen auf Zukunftsszenarien aufbauenden Untersuchungen³ liefert der hier verwendete Ansatz belastbare Zahlen zur Bedeutung des Verbrennungsmotors für die deutsche Industrie im Ist-Zustand. Er bezifferte die potentielle Größenordnung der Effekte eines Zulassungsverbots und soll zur Versachlichung der Debatte darüber beitragen.

2.1 Methodik und Datengrundlage

Die potentiellen Effekte eines Zulassungsverbots von Pkw und leichten Nfz mit Verbrennungsmotor für den Produktionsstandort Deutschland hängen davon ab, wie tief die Verbrennungstechnologie in der deutschen Industriestruktur verankert ist. Um dies herauszufinden, wird in einem ersten Schritt (*Kapitel 2.2*) untersucht, wie abhängig jeweils die deutsche Industrie insgesamt⁴, die Automobilindustrie sowie ihre Zulieferbranchen vom Verbrennungsmotor sind. Ausgangspunkt und zentrale Datengrundlage für diese Analyse des Status quo ist die *Produktionserhebung im Verarbeitenden Gewerbe*⁵ des Statistischen Bundesamtes. Die Daten liegen (Stand April 2017) für den Zeitraum 2009 bis 2015 vor und erfassen alle Betriebe mit 20 und mehr Beschäftigten⁶. Ihre ausgeprägte Gliederungstiefe auf 9-Steller-Ebene des *Güterverzeichnisses für Produktionsstatistiken (GP-2009)* erlaubt sowohl die Identifikation fertiger Kfz nach Kategorie (Pkw, leichte und schwere Nfz) und Antriebstyp (Benziner, Diesel, alternative Antriebe) als auch nahezu aller in Kfz verbauter Teile (*Produktarten*). Auch Zuliefer-

³ Vgl. z.B. Hans-Böckler-Stiftung (2012).

⁴ Abschnitt C *Verarbeitendes Gewerbe* der amtlichen *Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ-2008)*.

⁵ Vgl. Statistisches Bundesamt (16. Januar 2017).

⁶ Nur in Ausnahmefällen dürften Industriebetriebe weniger als 20 Beschäftigte vorweisen, womit eine möglichst vollständige Erfassung der relevanten Produktionsbetriebe gewährleistet ist.

und Komplementärprodukte anderer Wirtschaftszweige lassen sich berücksichtigen. Damit können nicht nur die Auswirkungen eines Zulassungsverbots isoliert auf die Automobilindustrie (Wirtschaftszweig 29) analysiert werden, sondern ebenso auf diejenigen Branchen, die über Vorleistungsverflechtungen in die Kfz-Fertigung eingebunden sind.

Insgesamt ergibt sich für Pkw und leichte Nfz eine Liste von 106 relevanten Produktarten⁷, aus der diejenigen Produktgruppen näher betrachtet werden, die von einem Zulassungsverbot für Verbrennungsmotoren entweder *direkt* oder *indirekt* betroffen wären:

1. *Direkt betroffen* wären fertige Fahrzeuge mit Verbrennungsantrieb oder Komponenten, die ausschließlich in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren benötigt werden.
2. *Indirekt betroffen* wären vor allem Produktarten, die nur teilweise der Verbrennungstechnologie zuzurechnen sind (d.h., auch anderweitig in Kfz eingesetzt werden), oder Produktarten, die Komplementärgüter zum Verbrennungsmotor sind.

Für jede der entsprechenden Produktarten führen wir drei komplementäre Analysen durch. Der *Produktionswert* lässt sich direkt aus den Daten der amtlichen Statistik ableiten. Er bildet daher den Ausgangspunkt der Betrachtung – über Annahmen zu den Wertschöpfungs- und Beschäftigungsquoten bestimmen wir dann die dieser Produktgruppe zurechenbare *Bruttowertschöpfung* und *Beschäftigung*. Aggregiert geben diese Werte uns Hinweise darauf, wie stark verschiedene Branchen und die Industrie insgesamt – ausgehend von der Produktionsstruktur in Deutschland 2015 – von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor betroffen wären.

Die ermittelten Werte sind als Untergrenzen anzusehen. Zum einen liegen für einige Produktarten keine Daten vor oder sind durch die amtliche Statistik geheim gehalten. Zum anderen bleiben die Hersteller von Produktionsanlagen, auf denen Verbrenner-Komponenten hergestellt oder montiert werden – insbesondere aufgrund fehlender Möglichkeit der klaren Zuordnung – unberücksichtigt.

Die resultierenden Größen müssen dennoch mit Sorgfalt interpretiert werden. Sie liefern in erster Linie Richtwerte über die „potenziell betroffene“ Produktion, Bruttowertschöpfung und Beschäftigung am Standort Deutschland. Wieviel davon im Falle eines Zulassungsverbots für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor tatsächlich wegfal-

⁷ Vgl. Tabelle 3 im Anhang.

len würde, hängt von mehreren Faktoren ab, die mit erheblicher Unsicherheit behaftet sind. Entscheidende Determinanten sind hier der betrachtete Zeithorizont, der Zeitpunkt der Regulierung (unterstellt wird das Jahr 2030), mögliche Ausnahmen vom Verbot (z.B. für Hybrid-Fahrzeuge) sowie die entsprechende Reaktions- und Anpassungsfähigkeit der hierzulande ansässigen Automobilhersteller und Zulieferer und etwaig verbleibende Produktion für den Export.

Gerade die (zu untersuchende) Fähigkeit der deutschen Anbieter, sich an einen derartigen regulatorischen Eingriff anzupassen sowie markt- und wettbewerbsfähige Alternativtechnologien zum Verbrennungsmotor zu entwickeln, würden die Folgen eines Verbots mitbestimmen. Die Anpassungsfähigkeit von Unternehmen kann sich erheblich unterscheiden, beispielsweise abhängig von ihrer Größe, die daher explizit in unsere Betrachtung einfließt. Desweiteren wird in *Kapitel 2.3* aufgezeigt, wie sich die Produktion von Komponenten und Komplementärgütern für die alternative Antriebstechnologie „batteriebetriebener Elektromotor“⁸ in Deutschland bis 2015 entwickelt hat. Geprüft werden soll, ob erste Verlagerungstendenzen „weg vom Verbrennungsmotor“ existieren und wie stark diese gegebenenfalls ausgeprägt sind. Den Abschluss dieses Kapitels bilden Fragen zu einem theoretischen Exportszenario (*Kapitel 2.4*): Wie realistisch ist es, dass es zu einem rein nationalen Zulassungsverbot käme? Und wie wahrscheinlich wäre es, dass hierzulande dann weiterhin (Komponenten für) Pkw und leichte Nfz auf Verbrenner-Basis ausschließlich für Exportmärkte produziert werden?

2.2 Bedeutung des Verbrennungsmotors in Pkw und leichten Nfz für die deutsche Industrie, die Automobilindustrie sowie ihre Zulieferbranchen im Jahr 2015

2.2.1 Produktionswert

Zentrales Merkmal der Produktionserhebung im Verarbeitenden Gewerbe ist der *Wert der zum Absatz bestimmten Produktion* (kurz: Produktionswert). Beschränkt man die Betrachtung in einem ersten Schritt auf diese Kenngröße, entfielen im Jahr 2015 171,5 Mrd. € auf Produktarten, die in direktem Zusammenhang mit durch Verbrennungsmotoren betriebene Pkw und leichte Nfz stehen. Das entsprach 12% des Produktionswertes der gesamten Industrie. Der weit überwiegende Teil davon ist der Automobilindustrie (WZ-29) zuzurechnen (vgl. Spalte 1 bis 3 in *Tabelle 1*). Auf fertige Pkw und

⁸ Auch wenn der Wettbewerb mit anderen alternativen Antriebsformen und Energieträgern (Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe) noch nicht entschieden ist, deuten die bislang in Deutschland von hierzulande ansässigen Herstellern angebotenen und angekündigten Pkw- und leichten Nfz-Modelle auf den batteriebetriebenen Elektromotor als – zumindest mittelfristig – wesentliche Ersatztechnologie hin.

leichte Nfz mit Verbrennungsmotor, separate Benzin- und Dieselmotoren sowie entsprechende Zubehörteile gingen 59% des Produktionswerts der Branche zurück. Die Abhängigkeit der wichtigsten Kfz-Zulieferbranche, Maschinenbau (WZ-28), von der Verbrenner-Technologie ist deutlich geringer. 3% seines Produktionswertes resultierten 2015 aus der Fertigung entsprechender Zulieferteile. Auch die Elektrotechnikbranche (WZ-27) liefert mit den Starterbatterien wichtige elektrische Ausrüstungen für den Verbrennungsmotor, was 1% ihres Produktionswertes ausmacht.

Für die Automobilindustrie sowie den Maschinenbau und damit auch für die Industrie insgesamt dürften die Anteilswerte und folglich die Bedeutung des Verbrennungsmotors in Wirklichkeit noch etwas höher sein. So sind in der Automobilindustrie die Produktionswerte von Benzinmotoren bis einschließlich 1 000 cm³ Hubraum, fertigen Pkw mit Dieselmotoren zwischen 2 000 und 2 500 cm³ Hubraum sowie einiger Zubehörteile (Zündkerzen, Zündverteiler und -spulen, Anlasser sowie anderweitig nicht genannten Apparaten und Vorrichtungen für Verbrennungsmotoren) unbekannt oder durch die amtliche Statistik geheim gehalten und können daher nicht in die Betrachtung eingehen. Im Maschinenbau werden zudem Produktionsanlagen, die für die Herstellung und Montage von Verbrenner-Komponenten vorgesehen sind, mangels eindeutiger Zuordnung zum Kfz-Sektor nicht berücksichtigt.

Werden darüber hinaus auch diejenigen Produktarten mit einbezogen, die nur indirekt – das heißt teilweise oder über Komplementärbeziehungen – mit dem Verbrennungsmotor in Kfz in Verbindung stehen, erhöht sich der potentiell von einem Zulassungsverbot betroffene Produktionswert um weitere 41,3 Mrd. € und damit um 3% der 2015 insgesamt zum Absatz bestimmten deutschen Industrieproduktion. Neben Komponenten aus der Automobilindustrie (Bremsen und Schaltgetriebe), die in der Alternativtechnologie Elektroauto einem niedrigeren Verschleiß⁹ unterliegen oder geringere Komplexität¹⁰ aufweisen dürften, sind hier vor allem Zulieferteile aus der Metallindustrie (WZ-24 und WZ-25) zu nennen (vgl. Spalte 1 bis 3 in *Tabelle 2*). Zwar kommen Metallelemente auch im Fahrgestell als Achsen oder tragende Karosserieteile zum Einsatz. Allerdings dürfte gerade bei der Fertigung von Elektroautos der Leichtbau – mit der Reduzierung von Metallkonstruktionen und der verstärkten Verwendung von Carbonfaserverbundstoffen zur Kompensation des Batteriegewichts und damit der Reichweitenverlängerung – weiter an Bedeutung gewinnen. Auch Komponenten aus der Gummi- und Kunststoffwarenindustrie sind zum Teil (Keilriemen, Motordichtungen) an den Verbrennungsmotor gekoppelt. Wichtigstes Komplementärprodukt des Verbrennungsmotors ist der Benzin- und Dieselmotorkraftstoff. Beide Kraftstoffarten zusammengenommen waren 2015 für 45% des Produktionswertes der inländischen Ko-

⁹ Vgl. IFA (2012), S. 2.

¹⁰ Vgl. FAZ (2016).

kereien und Mineralölverarbeitung (WZ-19) verantwortlich. Keine andere Branche außerhalb der Automobilindustrie wäre – relativ betrachtet – indirekt so stark von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor betroffen. Selbst dann nicht, wenn man bedenkt, dass der Absatz von Diesel für schwere Nfz (Lastwagen, Omnibusse) und Schienenfahrzeuge sowie von Flugbenzin (ohne Kerosin) unbeeinträchtigt bliebe.

Die Summe der einzelnen Produktionswerte ist auch bei den indirekt betroffenen Produktarten eher als Untergrenze zu betrachten, da in der amtlichen Statistik Angaben zu Bremsbelägen und Ausgabepumpen für Kraftstoffe oder Schmiermitteln fehlen. Berücksichtigt man direkte sowie indirekte Abhängigkeiten vom Verbrennungsmotor, wären (ausgehend von der deutschen Industriestruktur im Jahr 2015) von dem Regulierungsvorhaben insgesamt mindestens 212,8 Mrd. € Produktionswert bzw. 15% der wertmäßigen deutschen Industrieproduktion potentiell betroffen. In den folgenden *Kapiteln 2.2.2 und 2.2.3* wird auf Basis dieser Ergebnisse analysiert, welche potentiellen Auswirkungen das Verbot auf Bruttowertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland hätte.

2.2.2 Bruttowertschöpfung

Die Produktionswertbetrachtung ist ein Benchmark für die Bedeutung des Verbrennungsmotors in Pkw und leichten Nfz für die deutsche(n) Industrie(branchen), der sich unmittelbar aus der amtlichen Statistik herleiten lässt. Allerdings sind in dem vom Statistischen Bundesamt im Verarbeitenden Gewerbe erfassten Produktionswert auch Vorleistungen – sei es aus dem Ausland oder von inländischen Zulieferern – enthalten. Dies führt zu Doppelzählungen von Bauteilen und potentiell einer verzerrten Darstellung der tatsächlichen Produktionsleistung.

Für das Ausmaß der Wirkungen eines Zulassungsverbots für den Produktionsstandort Deutschland ist daher entscheidend, welcher Anteil des Produktionswertes tatsächlich hierzulande als Wertschöpfung erbracht wird. Hierzu wird für alle relevanten Produktarten die in Deutschland anfallende Bruttowertschöpfung bestimmt. Da über die Bruttowertschöpfung auf 9-Steller-Ebene von amtlicher Seite keine Daten vorliegen, benutzen wir hier Schätzungen. Zu Hilfe genommen werden die *Wertschöpfungsquoten*¹¹ in den Wirtschaftszweigen der übergeordneten Produktklassen (4-Steller-Ebene). Diese lassen sich aus der Kostenstrukturerhebung im Verarbeitenden Gewerbe¹² für 2014 ermitteln. Die Approximation fußt auf zwei Annahmen: Erstens, dass sich die

¹¹ Für eine Auflistung der zugrunde gelegten Wertschöpfungsquoten vgl. *Tabelle 4* im Anhang.

¹² Vgl. Statistisches Bundesamt (Juni 2016). Die amtliche Kostenstrukturerhebung im Verarbeitenden Gewerbe deckt (Stand April 2017) den Berichtszeitraum 2008 bis 2014 ab und stellt bis maximal zur Gliederungstiefe der WZ-4-Steller Informationen zum Bruttoproduktionswert sowie der Bruttowertschöpfung bereits. Damit können auf Ebene der Produktklassen Wertschöpfungsquoten berechnet werden.

Wertschöpfungsquoten von 2014 bis 2015 nicht wesentlich verändert haben, und zweitens, dass sich die Wertschöpfungsanteile in den einzelnen Produktarten (9-Steller) durch diejenige der darüber stehenden Produktklasse (4-Steller) approximieren lassen.¹³

Gemessen an der Bruttowertschöpfung trugen 2015 Produktarten, die direkt auf Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor zurückgehen, (mindestens)¹⁴ 9% (35,7 Mrd. €) zur industriellen Wertschöpfung in Deutschland bei (vgl. Spalte 4 bis 6 in *Tabelle 1*). Der Anteilswert ist damit um 3 Prozentpunkte niedriger als nach der Produktionswertbetrachtung. Vor allem in der Automobilindustrie (WZ-29) stellt sich die „tatsächliche“ Abhängigkeit von der Verbrennungstechnologie geringer dar (wenngleich sie mit 56% der branchenweiten Bruttowertschöpfung weiterhin hoch bleibt). Grund dafür ist, dass die heimische Automobilindustrie eine vergleichsweise niedrige Wertschöpfungsquote aufweist.¹⁵ Sie belief sich 2014 auf lediglich 22% des Bruttoproduktionswertes, wohingegen die Quote im Industriemittel bei 28% lag. Gerade die Kraftwagen- und Motorenbauer – das heißt die großen und weltweit operierenden Automarken – beziehen einen wesentlichen Teil der in den Fahrzeugen inkorporierten Produktionsleistung in Form spezialisierter Komponenten von Zulieferindustrien.¹⁶ Die direkte Betroffenheit des Maschinenbaus (WZ-28) von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor fällt mit Blick auf die Bruttowertschöpfung nur unwesentlich geringer aus als unter Berücksichtigung des Produktionswertes. Der Anteil betroffener Produktarten an der Bruttowertschöpfung der Branche bleibt bei ca. 3%. Im Fall der elektrischen Ausrüstungen (WZ-27) halbiert sich der Anteilswert auf 0,5%.

Anders bei den indirekt vom Verbrennungsmotor für Pkw und leichte Nfz abhängigen Produktarten: Ihr anteiliger Beitrag zur Bruttowertschöpfung der deutschen Industrie liegt mit gut 3% (12,6 Mrd. €) etwas höher als bei Betrachtung des Produktionswertes. Dies ist in erster Linie auf Teilbereiche der Metallerzeugung und -bearbeitung (WZ-24) sowie der Automobilindustrie (WZ-29) zurückzuführen. So führen die relativ hohen Wertschöpfungsquoten der inländischen Eisen-, Stahl- und Leichtmetallgießereien sowie die leicht überdurchschnittliche Wertschöpfungsquote bei nicht-elektrischen Teilen und sonstigem Zubehör für Kfz (u.a. Servobremsen und Teile für Bremsen, Schaltgetriebe) dazu, dass die Betroffenheitswerte der jeweiligen Branchen auf 12

¹³ Da sich Wertschöpfungsketten und -quoten bis auf kleinere Schwankungen (mit Ausnahmen von Krisenjahren) nur über einen längeren Zeitraum verschieben und sich die Produktarten einer Produktklasse in der Regel ähnlich sind, dürfte es sich hier um vergleichsweise schwache Annahmen handeln, die zu keinen systematischen Verzerrungen der Ergebnisse führen sollten.

¹⁴ Siehe Erläuterungen unter *Kapitel 2.1*.

¹⁵ Vgl. *Tabelle 4* im Anhang.

¹⁶ Vgl. ifo Institut (2016).

(WZ-24) bzw. 6% (WZ-29) ansteigen (vgl. Spalte 4 bis 6 in Tabelle 1). Bei den übrigen Industriezweigen¹⁷ ist es vergleichsweise unerheblich, ob Bruttowertschöpfung oder Produktionswert betrachtet werden. Direkte und indirekte Abhängigkeiten vom Verbrennungsmotor zusammengenommen wären von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit entsprechender Antriebstechnologie ausgehend von der Produktionsstruktur im Jahr 2015 potentiell 13% der Bruttowertschöpfung der deutschen Industrie betroffen. Das entspricht einem jährlichen Volumen von 48,3 Mrd. €.

2.2.3 Beschäftigung

Die Automobilindustrie (WZ-29) allein beschäftigte 2015 in Deutschland 813.000 Personen. Sie ist mit einem Anteil von 13% der im gesamten Verarbeitenden Gewerbe tätigen Personen nach dem Maschinenbau die beschäftigungsstärkste Industriebranche.¹⁸ Hinzu kommen noch Beschäftigte außerhalb der Automobilindustrie, die sich mit der Fertigung von Zuliefer- und Komplementärprodukten für den Kfz-Bereich befassen. Würde die Produktion von Pkw und leichten Nfz mit Verbrennungsmotor aufgrund eines Zulassungsverbots in Deutschland aufgegeben¹⁹, gingen damit wohl auch erhebliche Beschäftigungseffekte einher. Um diese quantifizieren zu können, müssen die bereits vorliegenden Produktionswerte (bzw. die dazugehörige ermittelte Bruttowertschöpfung) der relevanten Produktarten in Beschäftigtenzahlen umgerechnet werden – von amtlicher Seite liegen auf der stark disaggregierten Ebene der WZ-9-Steller keine Beschäftigungsdaten vor. Für die Schätzung auf Ebene der einzelnen Produktarten werden jeweils die *Beschäftigungsquoten* der übergeordneten Produktklassen (WZ-4-Steller)²⁰ herangezogen. Sie zeigen an, wie viele Beschäftigte notwendig sind, um einen bestimmten Produktionswert (bzw. eine bestimmte Bruttowertschöpfung) zu generieren und sind damit zugleich ein inverses Maß für die Arbeitsproduktivität in den einzelnen Wirtschaftszweigen.²¹

In der Summe waren 2015 in die Herstellung von Produktarten, die von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz direkt betroffen wären, ca. 457.000 Beschäftigte involviert. Das sind 7,5% der deutschen Industriebeschäftigung (vgl. Spalte 7 bis 9 in Tabelle 1). Die Abhängigkeit von der Verbrennungstechnologie ist also unter Beschäf-

¹⁷ Einen Sonderfall bildet die Kokerei und Mineralölverarbeitung. Da auf 4-Steller-Ebene keine Angaben zur Bruttowertschöpfung verfügbar sind, wurde bei der Berechnung die Wertschöpfungsquote des 2-Stellers (WZ-19) unterstellt. Die Anteile von Motorenbenzin und Dieselmotoren an der Gesamtbranche sind demnach in der Produktionswert- und Bruttowertschöpfungs-Betrachtung annahmegemäß identisch.

¹⁸ Vgl. Statistisches Bundesamt (April 2016).

¹⁹ Kapitel 2.4 diskutiert die Möglichkeit eines Exportszenarios, in dem in Deutschland weiterhin Pkw und leichte Nfz ausschließlich für den Auslandsmarkt produziert werden würden.

²⁰ Tiefste Gliederungsebene, für die das Statistische Bundesamt sowohl Angaben zum Produktionswert (bzw. zur Bruttowertschöpfung) als auch zur Beschäftigung bereitstellt.

²¹ Für eine Auflistung der zugrunde gelegten Beschäftigungsquoten vgl. Tabelle 5 im Anhang.

tigungsgesichtspunkten weniger stark ausgeprägt als nach Produktionswert und Bruttowertschöpfung (dort betragen die entsprechenden Anteilswerte gut 12 bzw. gut 9%). Ein Umstand, der im Wesentlichen auf die Automobilindustrie (WZ-29) zurückzuführen ist und die hohe (Arbeits-)Produktivität ihres Personals widerspiegelt. Um 1 Mill. € Produktionswert (bzw. Bruttowertschöpfung) zu erzielen, werden in der Automobilfertigung im Mittel nur 2,9 (bzw. 13,5) Beschäftigte benötigt. Im Industrieschnitt liegt die Quote mit 4,4 (bzw. 15,9) Personen deutlich höher. Nichtsdestotrotz treten die potentiellen Beschäftigungseffekte in der Automobilindustrie am stärksten zu Tage: 93% bzw. 426.000 der 457.000 direkt von einem Zulassungsverbot betroffenen Beschäftigten sind dort angesiedelt. Dies entspricht 52% der in der Automobilindustrie tätigen Personen. Zu Buche schlagen vor allem fertige Benzin- (202.000 Beschäftigte) und Diesel-Pkw (>159.000 Beschäftigte²²), fertige Nfz mit einem zulässigen Gesamtgewicht von maximal 5 t (16.000 Beschäftigte) sowie fertige Ottomotoren mit einem Hubraum über 1.000 cm³ (14.000 Beschäftigte). Aber auch in der Herstellung von Zubehörteilen für Verbrennungsmotoren, wie Schaltkupplungen (11.000) oder Auspufföpfen und -rohren (9.500), ist eine höhere Zahl von Personen beschäftigt.

Außerhalb der Automobilindustrie standen 2015 rund 31.000 Arbeitsplätze in direkter Verbindung zur Verbrennungstechnologie. Der Großteil im Maschinenbau (28.000), dessen Beschäftigung damit zu knapp 3% betroffen wäre. Fast die Hälfte davon (13.500) fertigt Abgasreinigungssysteme (Katalysatoren), die im Verbotsfall – zumindest in Pkw und leichten Nfz – obsolet würden. Neben WZ-28 sind mit knapp 1% der Branchenbeschäftigung auch die Hersteller elektrischer Ausrüstungen (WZ-27) unmittelbar an den Verbrennungsmotor gebunden, wenngleich in vergleichsweise geringfügigem Umfang. So waren dort im Betrachtungsjahr 3.500 Personen mit der Produktion entsprechender Starterbatterien beschäftigt.

Werden darüber hinaus Beschäftigte aus Bereichen mit einbezogen, die nur indirekt an den Verbrenner gekoppelt sind, erhöht sich die Zahl der potentiell von einem Zulassungsverbot betroffenen Arbeitsplätze um 163.000 Personen, bzw. knapp 3% der deutschen Industriebeschäftigung (vgl. Spalte 7 bis 9 in *Tabelle 2*). Im Fokus steht hier in erster Linie die Metallindustrie: 2015 produzierten dort 102.000 Beschäftigte Teile für Straßenfahrzeuge, die hauptsächlich in der Motorentechnik und -konstruktion Verwendung finden.²³ Der größere Teil davon (70.000 Beschäftigte) stellt fertige Metallerteugnisse (WZ-25) bereit, während die kleinere Zahl (32.000 Beschäftigte) in den vorgelagerten Gießereien tätig ist, die der Metallerteugung und -bearbeitung (WZ-24)

²² Da für Diesel-Pkw in der Hubraumklasse 2.000 bis 2.500 cm³ keine Daten vorliegen, dürfte der tatsächliche Wert noch deutlich höher liegen.

²³ Vgl. Hinweise zu alternativen Einsatzzwecken von Metallteilen in Kfz und dem geringeren „Metallgehalt“ von Elektroautos in *Kapitel 2.2.1*.

angehören. Gerade Gießereien sind vergleichsweise arbeitsintensiv und einer der wenigen Bereiche, für die im Verbotsfall mit einem (leicht) überproportionalen Beschäftigungseffekt zu rechnen ist. So sind die für Kfz relevanten Gussarten für nur 7% des Produktionswertes (bzw. 12% der Bruttowertschöpfung) von WZ-24 verantwortlich, stellen aber 12,5% der Branchenbeschäftigung. Bei WZ-25 liegen die entsprechenden Abhängigkeitswerte von Kfz-Teilen hingegen relativ konstant bei 11%.

In der Automobilindustrie (WZ-29) hängen – neben den 426.000 Beschäftigten (siehe oben), die direkt der Verbrennungstechnologie in Pkw und leichten Nfz zugerechnet werden können – mindestens²⁴ 44.500 weitere Arbeitsplätze indirekt von dieser Technik ab. Davon entfallen 27.000 Beschäftigte auf Schaltgetriebe sowie 17.500 auf Servobremsen und Teile für Bremsen. Beide Produktarten stellten 2015 zusammen 5,5% der Branchenbeschäftigung. Sie werden in Elektroautos zwar weiterhin benötigt, dürften aufgrund der dort geringeren Komplexitätsanforderungen und Verschleißerscheinungen bei einem Wegfall des Verbrennungsmotors aber an Bedeutung verlieren.²⁵ Die Gummi- und Kunststoffwarenindustrie (WZ-22) liefert ebenfalls wichtige (Zubehör-) Teile für den Verbrennungsmotor. Ihr Abnehmerkreis ist aber breit gefächert, so dass sich der Anteil der Branchenbeschäftigung, der auf Gummi-Metalteile für Kfz (insbesondere Motordichtungen) und Keilriemen entfällt (8.000 Personen), mit 2% vergleichsweise niedrig darstellt. Ähnlich viele Beschäftigte sind in der Mineralölverarbeitung mit der Herstellung der beiden wichtigsten Komplementärprodukte zum Verbrennungsmotor – nämlich Benzin- und Dieselmotorkraftstoff – befasst. Diese 8.000 Arbeitsplätze entsprechen (Stand 2015) 44% der Beschäftigung in der Kokerei- und Mineralverarbeitungsbranche (WZ-19). Sie wäre damit selbst unter der Annahme, dass der Absatz von Diesel für schwere Nfz und Schienenfahrzeuge sowie Flugbenzin (ohne Kerosin) unverändert bliebe, von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor erheblich eingeschränkt. Keine statistischen Informationen liegen hingegen über die (Beschäftigung in der) Produktion von Ausgabepumpen für Kraftstoffe vor, die an Tankstellen die Übertragung von Benzin oder Diesel in die Fahrzeuge ermöglichen und dem Maschinenbau (WZ-28) zugeordnet sind.

Unter Berücksichtigung direkter und indirekter Abhängigkeiten arbeiteten in Deutschland 2015 in der Produktion von Pkw und leichten Nfz mit Verbrennungsmotor sowie in der Herstellung entsprechende Zuliefer- und Komplementärprodukte schätzungsweise 620.000 Personen. Das waren 10% der deutschen Industriebeschäftigung. Analog zu den Ergebnissen nach Produktionswert und Bruttowertschöpfung handelt es sich bei der Schätzung der Beschäftigtenzahl insofern um eine Untergrenze, dass einige Produktarten aufgrund fehlender Daten nicht einbezogen werden konnten. Ob bei

²⁴ Die tatsächliche Zahl liegt höher, da zur Produktart Bremsbeläge keine Daten vorliegen.

²⁵ Vgl. Kapitel 2.2.1.

einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor tatsächlich Arbeitsplätze in diesem Umfang wegfallen würden, hängt unter anderem von der Anpassungsfähigkeit der hierzulande ansässigen Automobilhersteller und Zulieferer bis zum unterstellten Greifen der Regulierung im Jahr 2030 ab.

Das folgende *Kapitel 2.3* analysiert in diesem Zusammenhang die mögliche Rolle der Unternehmensgröße und prüft dahingehend, inwiefern in der deutschen Industrie die Voraussetzungen gegeben sind, sich an einen Wandel der Antriebstechnologie im Kfz-Bereich anzupassen, bzw., diesen entscheidend mitzugestalten. Gegen einen vollständigen Wegfall der Beschäftigung in der genannten Größenordnung spricht etwa, dass gewisse (indirekte) Zulieferteile für den Verbrennungsmotor nicht ausschließlich für Pkw und leichte Nfz produziert werden, sondern weiterhin in schweren Nfz (Lastwagen, Omnibusse) eingesetzt werden könnten.²⁶ Zudem muss berücksichtigt werden, dass es im Bereich alternativer Antriebsarten in Deutschland zu einem Beschäftigungsaufbau kommen kann, der den Abbau im Verbrennerbereich zumindest teilweise kompensieren würde. Dass dies aber die gleichen Beschäftigten, oder sogar Beschäftigte innerhalb des gleichen Unternehmens (sowohl Verlagerungen zwischen Herstellern, als auch zwischen Zulieferern und Herstellern – etwa zur Nutzung von Kapazitäten – sind denkbar) wären, ist unwahrscheinlich. Der Aufbau von Produktionskapazitäten für Elektrofahrzeug-Komponenten wird in der Regel parallel zu und losgelöst von der Verbrenner-Fertigung erfolgen. Auch die Qualifikationsprofile der dafür benötigten Fachkräfte verschieben sich in Richtung Elektrik und Elektronik. Abgesehen davon besteht die Gefahr, dass neue Kapazitäten für vergleichsweise weniger komplexe Teile von Anfang an in Regionen mit Kostenvorteilen bei Elektromotoren und Batterietechnik, wie Asien oder Mittel-/Osteuropa, aufgebaut werden.

²⁶ Die vorliegende Studie unterstellt, dass das Zulassungsverbot nur für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor gilt.

Tabelle 1: Produktarten, die von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor direkt betroffen wären (2015)

WZ-/GP-Code	(1) Produktionswert		(2) Anteil an dt. Industrie (WZ-C)		(3) Bruttowertschöpfung (Schätzung)		(4) Anteil an dt. Industrie (WZ-C)		(5) Beschäftigung (Schätzung)		(6) Anteil an dt. Industrie (WZ-C)		(7) Beschäftigung (Schätzung)		(8) Anteil an dt. Industrie (WZ-C)		(9) Beschäftigungsanteil von Großbetrieben mit mehr als 500 Personen (Schätzung)		
	Miil.-€	%	Miil.-€	%	Miil.-€	%	Miil.-€	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	
27 2720 21 000	858	1,2	0,1	0,06	122	0,5	0,0	0,0	3.380	0,8	0,1	0,06	3.380	0,8	0,06	0,1	53	53	
Herstellung von elektrischen Ausrüstungen																			
Blei-Akkumulatoren zum Starten von Kolbenverbrennungsmotoren (Starterbatterien)																			
28	5.686	2,9	0,4	0,03	1.736	2,7	0,5	0,02	27.810	2,7	0,5	0,03	27.810	2,7	0,5	0,03	84	84	
Maschinenbau																			
Teile für Verbrennungsmotoren mit Fremdzündung (Benziner)																			
Zylinderblöcke, -nieten, -köpfe																			
Stangen, Kolben, Ringe																			
Vergaser, Einspritzsysteme																			
Teile für Verbrennungsmotoren mit Selbstzündung (Diesel- oder Halbdiesel)																			
Stangen, Kolben, Ringe																			
Einspritzsysteme für Kraftfahrzeuge																			
Sonstige Teile																			
Kraftstoff-, Öl-, Kühlmittelpumpen für Kolbenverbrennungsmotoren																			
Abgasreinigungssysteme für Straßenfahrzeuge																			
29	164.969	59,2	11,9	0,10	33.847	56,2	8,9	0,23	425.780	52,4	7,0	0,22	425.780	52,4	7,0	0,22	96	96	
Automobilindustrie																			
Verbrennungsmotoren mit Fremdzündung (Benziner)																			
Hubraum ≤ 1000 cm ³																			
Rumpfe- bzw. halbfertige Motoren mit Hubraum > 1000 cm ³																			
fertige Motoren mit Hubraum > 1000 cm ³																			
Verbrennungsmotoren mit Selbstzündung (Diesel- oder Halbdiesel)																			
alle Hubraum-Klassen																			
Pkw mit Verbrennungsmotor mit Fremdzündung (Benziner)																			
Hubraum ≤ 1500 cm ³																			
Hubraum > 1500 - 2500 cm ³																			
Hubraum > 2500 cm ³																			
Pkw mit Verbrennungsmotor mit Selbstzündung (Diesel- oder Halbdiesel)																			
Hubraum ≤ 1500 cm ³																			
Hubraum > 1500 - 2000 cm ³																			
Hubraum > 2000 - 2500 cm ³																			
Hubraum > 2500 cm ³																			
Leichte Nfz mit Verbrennungsmotor mit Selbstzündung (Diesel- und Halbdiesel)																			
Lkw mit zulässigem Gesamtgewicht ≤ 5 t																			
Teile und Zubehör für Nfz																			
Zündkabelsätze																			
Zündkerzen																			
Zünd- und Schwung-Magnetzündler																			
Zündverteiler, -spulen																			
(Licht-)Anlasser																			
Andere Lichtmaschinen																			
Andere Apparate und Vorrichtungen für Verbrennungsmotoren																			
Teile für elektrische Zündapparate und -vorrichtungen																			
Auspuffköpfe (Schalldämpfer), -rohre																			
Schaltkupplungen und Teile dafür																			
Bremssattelhalter																			
Insgesamt	171.513	0,1	12,4	0,03	35.705	9,3	0,03	0,03	456.970	0,2	0,02	0,02	456.970	0,2	0,02	0,02	93	93	

* = Wert unbekannt oder durch amtliche Statistik geheim gehalten. - a) Schätzung auf Basis vorheriger Werte.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Produktionserhebung, Jahresbericht und Kostenstrukturerhebung im Verarbeitenden Gewerbe), Ifo Institut.

Tabelle 2: Produktarten, die von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor indirekt betroffen wären (2015)

Industriebranche (WZ-2008) / Produktart (GP-2009)	WZ-/GP-Code	(1) Produktionswert		(2) Anteil an dt. Industrie (WZ-C)		(3) Anteil an dt. Industrie (WZ-C)		(4) Bruttowertschöpfung (Schätzung)		(5) Anteil an dt. Industrie (WZ-C)		(6) Anteil an dt. Industrie (WZ-C)		(7) Beschäftigung (Schätzung)		(8) Anteil an dt. Industrie (WZ-C)		(9) Anteil an dt. Industrie (WZ-C)	(10) Beschäftigungsanteil von Großbetrieben mit mehr als 500 Personen (Schätzung)
		Mill. €	%	%	%	Mill. €	%	%	%	Anzahl	%	%	%	Anzahl	%				
																Mill. €	%		
Kokerei und Mineralölverarbeitung Motorenbenzin (einschließlich Flugbenzin) Dieselkraftstoff für Straßen- und Schienenfahrzeuge	19	11.035	45,1	0,8	0,8	2.892	45,1	0,8	8.140	44,4	0,1	57	8.140	44,4	0,1	57			
	1920 21 000	4.058	16,6	0,29	0,29	1.064	16,6	0,28	2.990	16,3	0,05	57	2.990	16,3	0,05	57			
	1920 26 005	6.977	28,5	0,50	0,50	1.829	28,5	0,48	5.150	28,1	0,08	57	5.150	28,1	0,08	57			
Gummi- und Kunststoffwarenindustrie Keilriemen (Treibriemen) Gummi-Metallteile für Kraftfahrzeuge	22	1.257	1,9	0,1	0,1	413	2,1	0,1	8.150	2,1	0,1	35	8.150	2,1	0,1	35			
	2219 40 300	168	0,3	0,01	0,01	55	0,3	0,01	1.090	0,3	0,02	35	1.090	0,3	0,02	35			
	2219 73 450	1.089	1,6	0,08	0,08	357	1,8	0,09	7.060	1,8	0,12	35	7.060	1,8	0,12	35			
Metallerzeugung und -bearbeitung <i>Teile für Straßenfahrzeuge aus</i> Gussseisen mit Kugelgraphit nicht verformbarem Gussseisen (Eisenguss) Stahlguss Leichtmetallguss Bunt-/Schwermetallguss	24	5.546	6,7	0,4	0,4	1.908	12,1	0,5	32.140	12,5	0,5	37	32.140	12,5	0,5	37			
	2451 12 100	1.080	1,3	0,08	0,08	369	2,3	0,10	6.330	2,5	0,10	39	6.330	2,5	0,10	39			
	2451 13 100	1.232	1,5	0,09	0,09	420	2,7	0,11	7.220	2,8	0,12	39	7.220	2,8	0,12	39			
	2452 10 100	223	0,3	0,02	0,02	83	0,5	0,02	1.700	0,7	0,03	24	1.700	0,7	0,03	24			
	2453 10 100	2.918	3,5	0,21	0,21	1.017	6,4	0,27	16.040	6,3	0,26	35	16.040	6,3	0,26	35			
	2454 10 100	93	0,1	0,01	0,01	20	0,1	0,01	850	0,3	0,01	49	850	0,3	0,01	49			
Herstellung von Metallerzeugnissen <i>Teile für Straßenfahrzeuge</i> Kaltfließpresseteile aus Stahl Gesenschnideteile aus Stahl Blechformteile aus Stahl Pulvermetallurgische Erzeugnisse Drehteile aus Metall	25	11.090	11,3	0,8	0,8	3.913	10,7	1,0	70.190	10,7	1,2	20	70.190	10,7	1,2	20			
	2550 11 510	651	0,7	0,05	0,05	216	0,6	0,06	3.780	0,6	0,06	26	3.780	0,6	0,06	26			
	2550 12 100	1.812	1,8	0,13	0,13	601	1,7	0,16	10.530	1,6	0,17	26	10.530	1,6	0,17	26			
	2550 13 100	5.933	6,1	0,43	0,43	1.968	5,4	0,52	34.490	5,3	0,57	26	34.490	5,3	0,57	26			
	2550 20 201	292	0,3	0,02	0,02	97	0,3	0,03	1.690	0,3	0,03	26	1.690	0,3	0,03	26			
	2562 10 350	2.403	2,5	0,17	0,17	1.032	2,8	0,27	19.700	3,0	0,32	5	19.700	3,0	0,32	5			
Maschinenbau Ausgabepumpen für Kraftstoffe oder Schmiermittel	28	52		
	2813 11 050	52		
Automobilindustrie Bremsbeläge Servobremsen und Teile für Bremsen Schalgetriebe	29	12.396	4,4	0,9	0,9	3.489	5,8	0,9	44.470	5,5	0,7	65	44.470	5,5	0,7	65			
	2932 30 201	65		
	2932 30 205	4.886	1,8	0,35	0,35	1.376	2,3	0,36	17.530	2,2	0,29	65	17.530	2,2	0,29	65			
	2932 30 330	7.510	2,7	0,34	0,34	2.114	3,5	0,55	26.940	3,3	0,44	65	26.940	3,3	0,44	65			
Insgesamt		41.325		3,0		12.615		3,3	163.090		2,7		163.090		2,7	38			

. = Wert unbekannt oder durch amtliche Statistik geheim gehalten.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Produktionserhebung, Jahresbericht und Kostenstrukturerhebung im Verarbeitenden Gewerbe), ifo Institut.

2.3 Größenstruktur und Anpassungsfähigkeit von Herstellern betroffener Produktarten

Nicht alle in die Automobilproduktion involvierten Unternehmen könnten auf eine Änderung des Regulierungsumfeldes, wie ein Zulassungsverbot von Pkw und leichten Nfz mit Verbrennungsmotor es vorsähe, gleich flexibel reagieren. Ein wichtiges Anpassungskriterium dürfte die Unternehmensgröße sein. Die Hersteller und großen Automobilzulieferer besitzen in der Regel deutlich mehr Handlungsoptionen, um ihre Modellpalette und Geschäftsschwerpunkte neu zu justieren sowie Forschungsaktivitäten in zukunftsträchtigen Produktfeldern zu betreiben, als teils sehr spezialisierte kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Gerade die drei führenden deutschen Zulieferfirmen sind stark diversifiziert²⁷ und potentiell in der Lage, auch an alternativen Antriebstechnologien zu partizipieren. Wohingegen das komplette Geschäftsmodell kleinerer, häufig mittelständischer Zulieferer nicht selten auf sehr wenigen und zugleich spezifischen Komponenten basiert. Selbst die Tatsache, dass manche KMU auf ihrem Gebiet Weltmarktführer sind, sollte nicht über ihre teils starke Technologiegebundenheit und Abhängigkeit von den entsprechenden Abnehmern hinwegtäuschen. Es ist daher anzunehmen, dass die Unternehmensgröße bei der Fähigkeit, sich an technologische Entwicklungen anzupassen und diese eigenständig mitzubestimmen, ein entscheidender Parameter sein wird.

Um zu untersuchen, inwiefern die Hersteller (der von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor betroffenen Produktarten) dahingehend vergleichsweise gute oder schlechte Voraussetzungen haben, wird jeweils ermittelt, welcher Anteil der einer Produktart zurechenbaren Beschäftigtenzahl 2015 in Großbetrieben tätig war, wobei wir uns an der Definition des Instituts für Mittelstandsforschung orientieren, wonach Großbetriebe mehr als 500 Beschäftigte aufweisen.²⁸ Selbstverständlich gibt es hinsichtlich der Flexibilität keinen plötzlichen Anstieg, sobald ein Betrieb eine bestimmte Mitarbeiteranzahl erreicht – größere Betriebe sind nicht automatisch hinreichend diversifiziert. Vielmehr sind es umgekehrt

²⁷ Die Robert Bosch GmbH fertigt in ihrer Kraftfahrzeugtechnik-Sparte nicht nur Motorelektronik sondern auch Sensoren, elektronische Fahrsicherheits- und -assistenzsysteme sowie Lenksysteme. Die Continental AG entwickelt neben Reifen, Antriebssträngen und -komponenten sowie Bremsystemen auch Fahrzeugelektronik, wie Technologien für aktive und passive Sicherheit. Auch die ZF Friedrichshafen AG ist nicht nur auf Getriebe spezialisiert, sondern verfügt mittlerweile zudem über Kompetenzen und Komponenten im Bereich Sicherheitssysteme, Sensortechnik, autonomes Fahren und entwickelt darüber hinaus eigene Elektroantriebe einschließlich Leistungselektronik. Vgl. Manager Magazin und FAZ (2016).

²⁸ Das Institut für Mittelstandsforschung (IfM) zieht die Grenze zwischen kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) und Großunternehmen bei 500 Beschäftigten; vgl. IfM (2016). Die hier verwendeten Daten liegen jedoch nur auf Betriebs-ebene vor, was in der Abgrenzung zu leichten Verzerrungen führen kann. Zwar gehören alle Großbetriebe ab 500 Beschäftigten zwangsläufig Großunternehmen an. Umgekehrt ist es aber möglich, dass sich Großunternehmen aus mehreren Betrieben mit weniger als jeweils 500 Beschäftigten zusammensetzen.

die kleineren Betriebe, bei denen die Wahrscheinlichkeit besonders hoch ist, dass keine ausreichenden Diversifizierungsmöglichkeiten vorhanden sind. Da über die Beschäftigtenverteilung nach Betriebsgrößen auf 9-Steller-Ebene keine statistischen Informationen vorliegen, müssen hierfür erneut Schätzungen vorgenommen werden. Die Approximation erfolgt – analog zur Vorgehensweise bei den Wertschöpfungs- und Beschäftigtenquoten in den *Kapiteln 2.2.2* und *2.2.3* – über die strukturellen Gegebenheiten in der übergeordneten 4-Steller-Ebene im Jahr 2015 und greift hierfür auf Daten aus dem amtlichen Jahresbericht für Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe²⁹ zurück.

Unter den direkt von einem Zulassungsverbot betroffenen Produktarten findet die Herstellung von Verbrennungsmotoren und fertigen Pkw bzw. leichten Nfz mit Verbrennungsmotor (GP-2910...) nahezu ausschließlich in Großbetrieben statt. 2015 arbeiten 99% des entsprechenden Personals in Betriebsstätten mit mehr als 500 Beschäftigten (vgl. Spalte 10 in). Hier kommt zum Ausdruck, dass es sich bei diesen Produktarten um Bereiche handelt, die von den Herstellern abgedeckt werden. Für diese Firmen steht als Mobilitätsanbieter und Modellentwickler der Erfolg der Marke im Vordergrund und weniger die verwendete Antriebstechnologie. Sie sind aufgrund ihrer Größe, Marktposition und Nähe zum Endkunden eher fähig, (auch politikinduzierte) Nachfrageentwicklungen aufzunehmen, und können dafür notwendige Vorleistungen im Zweifel durch den Austausch von Zulieferern zukaufen. So bieten deutsche Automobilmarken im Pkw-Segment erste batteriebetriebene Elektro-Modelle an und zeigen damit, dass sie in der Lage sind, Alternativen zum verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeug zu entwickeln und zur Marktreife zu führen.³⁰ Auch im – der Automobilindustrie (WZ-29) zurechenbaren – Teile- und Zubehörbereich für Kfz sind mit 69 (GP-2931...) bzw. 65% (GP-2932...) deutlich mehr als die Hälfte der Beschäftigten in Großbetrieben tätig. Selbiges trifft auf die Beschäftigten zu, die Maschinenbauteile für den Verbrennungsmotor (GP-2811...) fertigen. Hier beträgt der entsprechende Anteilswert sogar 84%. Diese Arbeitsplätze sollten per Annahme aufgrund der unterstellten besseren Anpassungsfähigkeit von Großunternehmen³¹ weniger stark bedroht sein, als die Stellen der schätzungsweise 13.400 Beschäftigten, die Abgasreinigungssysteme für Straßenfahrzeuge (GP-2825...) produzieren. Sie sind hauptsächlich bei mittelständischen, typischerweise weniger breit aufgestellten Zulieferern angesiedelt und nur zu 33% in Großbetrieben beschäftigt. Im Mittel der direkt von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor betroffenen Produktar-

²⁹ Vgl. Statistisches Bundesamt (April 2016).

³⁰ Um welche Modelle es sich hierbei handelt und inwiefern die hierfür nötigen Komponenten auch in Deutschland produziert werden, wird in *Kapitel 2.3* aufgezeigt.

³¹ Beispielsweise kaufte die deutsche Mahle GmbH, Marktführer bei Kolben und anderen Motorenbauteilen, 2014 den slowenischen Elektromotoren-Hersteller Letrika, der unter anderem die Marke Renault mit den Antrieben für den Zweisitzer Twizy beliefert; vgl. FAZ (2016). Die finanziellen Möglichkeiten kleinerer Unternehmen für solche Übernahmen sind dagegen deutlich eingeschränkter.

ten lag der Beschäftigtenanteil in Großbetrieben mit mehr als 500 Personen 2015 bei 93%. Von den rund 457.000 durch ein Zulassungsverbot potentiell direkt betroffenen Beschäftigten sind demnach vor allem diejenigen 7% (bzw. 31.400 Personen) in besonderem Maße gefährdet, die in kleinen und mittleren Betriebseinheiten tätig sind.

Ein völlig anderes Bild ergibt sich bei den indirekt vom Verbrennungsmotor abhängigen Produktarten. Kleine und mittlere Zulieferer sind dort deutlich präsenter, nur 38% der 163.100 entsprechenden Beschäftigten arbeiten in Großbetrieben (vgl. Spalte 10 in *Tabelle 2*). Die Teilmenge der besonders betroffenen Arbeitsplätze läge hier mit einem Anteil von 62% (bzw. 100.800 Personen) deutlich höher. Vor allem die Herstellung von Metallerzeugnissen für Kfz erfolgt schwerpunktmäßig in kleineren Betriebseinheiten. Lediglich 26% der mit Kaltfließpress-, Gesenkschmiede- und Blechformteilen aus Stahl sowie pulvermetallurgischen Erzeugnissen (GP-2550...) befassten Personen sind in Großbetrieben tätig. Besonders kleinbetrieblich ist die Herstellung von Drehteilen aus Metall (GP-2562...) organisiert, in der gerade einmal 5% der Beschäftigten Großbetrieben angehören. Kfz-Teile aus der vorgelagerten Metallerzeugung und -bearbeitung wie Gusseisen, Stahl- und Leichtmetallguss (GP-2451..., GP-2452..., GP-2453...) sowie der Gummi- und Kunststoffwarenindustrie (GP-2219...) weisen ebenfalls vergleichsweise niedrige Beschäftigungsanteile (zwischen 24 und 39%) in Großbetrieben ab 500 Personen auf. Zwar wären diese Produktgruppen von einem Zulassungsverbot nur mittelbar betroffen, den damit befassten Akteuren dürfte es aber aufgrund ihrer Größenstruktur und Schwerpunktlegung schwerer fallen, auf alternative Produkte und Geschäftsfelder umzustellen. Eine Ausnahme bei den indirekt betroffenen Produktarten bilden Schaltgetriebe und (Teile für) Bremsen (GP-2932...). Gemessen an den Beschäftigtenzahlen findet deren Produktion zu 65% in Großbetrieben statt, was auch damit zusammenhängen dürfte, dass diese Komponenten von der Automobilindustrie (WZ-29) selbst hergestellt werden und dort größere Betriebseinheiten aktiv sind.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass sich mit einem Wandel bei der Antriebstechnologie – unabhängig davon, ob dieser durch ein Zulassungsverbot von Pkw und leichten Nfz forciert wird – insbesondere die Zulieferlandschaft der Automobilindustrie verändern wird. So werden für batteriebetriebene Elektroautos (als unterstellte Alternativtechnologie) deutlich weniger verschiedene Komponenten benötigt als für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.³² Dies begünstigt einen Strukturwandel weg von mittelständisch geprägten Unternehmen hin zu einer eher kapitalintensiveren und damit konzentrierteren Zulieferbranche. Kompetenzen in Elektrik und Elektronik werden wichtiger, wohingegen klassische metall- und mechaniklastige Produzenten im Automobilbau künftig weniger gefragt sein werden.³³ Gerade in der Übergangsphase müssen

³² Vgl. FAZ (2016).

³³ Vgl. Hans-Böckler-Stiftung (2012), S. 49.

viele Ausrüster aber sowohl Verbrenner- als auch Elektrobauteile bereitstellen können. Eine Herausforderung, der die großen Zulieferunternehmen wohl besser gerecht werden können, als kleine bislang ausschließlich auf den Verbrennungsmotor spezialisierte Firmen.

2.4 Gibt es bereits eine Verlagerungstendenz „weg vom Verbrennungsmotor“? Produktion von Komponenten für Elektroautos in Deutschland bis 2015

Im Zentrum der Betrachtung steht die Technologie des batteriebetriebenen Elektroautos, obwohl auch an anderen (am Fahrzeug) emissionsfreien³⁴ Antrieben geforscht wird, wie den ebenfalls durch einen Elektromotor bewegten und teils bereits marktfähigen Brennstoffzellenfahrzeugen³⁵ oder an regenerativen Kraftstoffen. Zahlreiche Automobilmarken bieten in verschiedenen Segmenten mittlerweile erste batteriebetriebene Elektromodelle an – entweder in Reinform (BEV), mit einem zusätzlichen Verbrennungsmotor als Reichweitenverlängerer (REEV) oder als Plug-In Hybrid (PHEV). Bei Letzterem kann die Batterie für den Elektromotor über das Stromnetz geladen werden. Auch die deutschen Fabrikate führen in ihrer Produktpalette entsprechende Fahrzeugvarianten.³⁶ Der überwiegende Teil der Neufahrzeuge beruht jedoch auf der Verbrennungstechnologie. Ein für 2030 diskutiertes Zulassungsverbot von Pkw und leichten Nfz mit Verbrennungsmotor würde den Handlungsbedarf der deutschen Autobauer zweifelsohne erhöhen. Um abzuschätzen, ob die deutsche Industrie solch einen Technologiewandel überhaupt entscheidend begleiten könnte oder dies vielleicht schon tut, wird untersucht, wie sich die Produktion und Wertschöpfung von für batteriebetriebene Elektroautos elementaren Komponenten in Deutschland zwischen 2011 und 2015³⁷ entwickelt hat. Die Analyse greift hierfür wie in *Kapitel 2.2* auf Daten

³⁴ Emissionsfrei heißt in diesem Zusammenhang nur, dass am Fahrzeug kein Ausstoß erfolgt. Sowohl bei der Stromgewinnung aus nicht erneuerbaren Energien für die Batterien als auch bei der Gewinnung von Wasserstoff aus fossilen Energieträgern für die Brennstoffzelle werden jedoch CO₂ und andere Schadstoffe freigesetzt.

³⁵ In Deutschland erhältliche Brennstoffzellen-Modelle sind derzeit der Toyota Mirai und der Hyundai ix35 (Stand April 2017).

³⁶ Rein batteriebetriebene Modelle gibt es im Kleinwagen-Segment (VW e-up!, Smart fortwo/forfour ed, BMW i3), der Kompaktklasse (VW e-Golf, Opel Ampera-e, Ford Focus electric, Mercedes-Benz B250e), im Sportwagen- (Mercedes-Benz SLS AMG) sowie im VAN-Segment (Mercedes-Benz Vito E-Cell). In der Mittel-, Ober- und SUV-Klasse handelt es sich bei den bislang (Stand März 2017) angebotenen Fahrzeugen ausschließlich um Plug-In Hybrid-Versionen.

³⁷ Die amtliche Produktionserhebung im Verarbeitenden Gewerbe ließe auch eine Betrachtung ab 2009 zu. Da die verschiedenen Produktarten von der Wirtschaft- und Finanzkrise 2008/09 aber unterschiedlich stark betroffen waren und folglich auch die Aufholbewegung in den Jahren 2010 und 2011 ungleichmäßig ausfiel, würde ein Vergleich mit dem Jahr 2009 die tatsächliche Entwicklungsdynamik verzerrt wiedergeben.

der amtlichen *Produktionserhebung im Verarbeitenden Gewerbe*³⁸ zurück und konzentriert sich auf die beiden wichtigsten E-Auto-Komponenten: den Elektromotor und die Akkumulatoren(technik).³⁹ Zudem wird auf Basis von Daten der European Alternative Fuels Observatory (EAFO)⁴⁰ die Aufbauentwicklung von Ladeinfrastruktur in Deutschland aufgezeigt. Sie gilt als entscheidendes Komplementärgut für die Realisierbarkeit der Elektromobilität.

Zunächst einmal zeigt sich, dass sich das wertmäßige Produktionsvolumen von Komponenten für den Verbrennungsmotor und darauf basierender Pkw und leichter Nfz bereits in den letzten Jahren im Vergleich zur Gesamtindustrie sowie der Automobilindustrie (WZ-29) nur unterdurchschnittlich entwickelt hat (vgl. *Abbildung 1a*). Dies gilt sowohl für die direkt, als auch für die indirekt betroffenen Produktarten. Dagegen wurde die Produktion von anderen Bauteilen, die von einem Zulassungsverbot von Pkw und leichten Nfz mit Verbrennungsmotor nicht betroffen wären, insbesondere in den Jahren 2013 bis 2015 deutlich ausgeweitet. Dieser Befund hat auch mit Blick auf die in Deutschland erbrachte Bruttowertschöpfung Bestand (vgl. *Abbildung 1b*), so dass ausgeschlossen werden kann, dass der gegensätzliche Verlauf von betroffenen und nicht betroffenen Produktarten auf Verschiebungen im Vorleistungsbezug zurückzuführen ist. Die Wachstumsdynamik im Automobilbereich liegt – zumindest was die Produktionstätigkeit in Deutschland angeht – außerhalb der Verbrenner-technologie. Eine Verlagerung „weg vom Verbrennungsmotor“ ist demnach bereits im Gange.

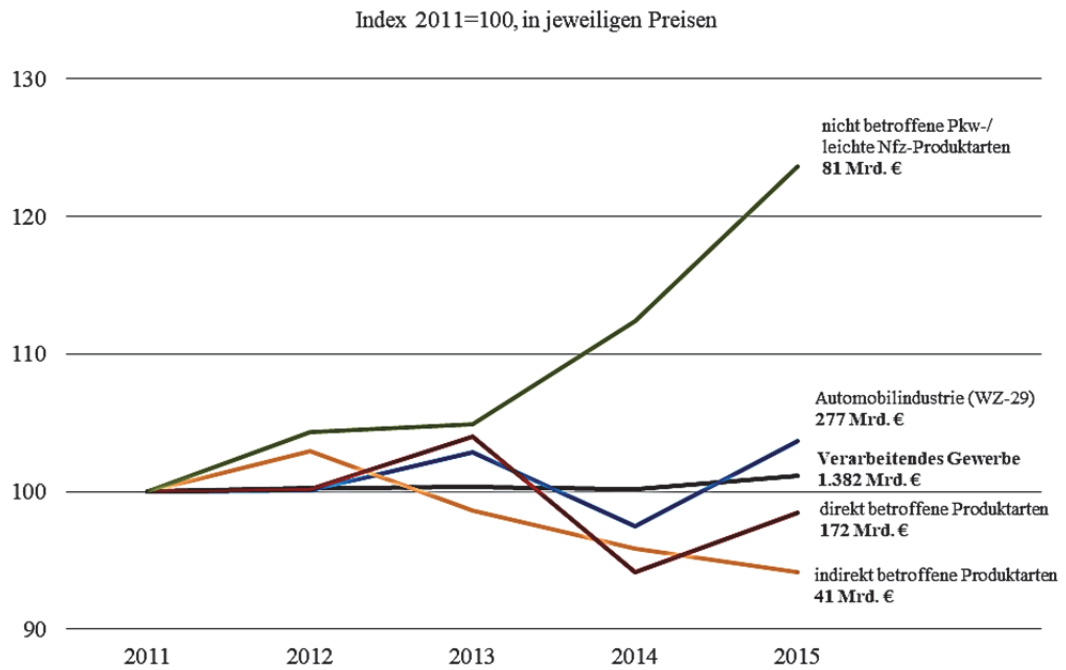
³⁸ Vgl. Statistisches Bundesamt (Januar 2017).

³⁹ Neben Elektromotor und Batterie nehmen in Elektrofahrzeugen auch die Leistungselektronik, Schalt- und Regelschaltung sowie Verkabelung eine wichtige Rolle ein.

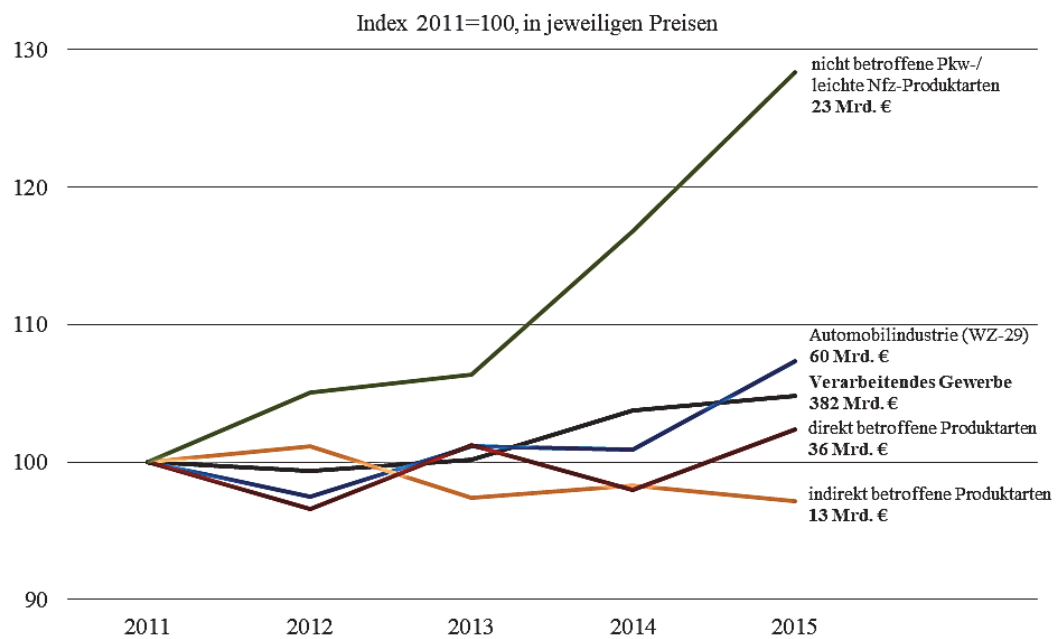
⁴⁰ Vgl. EAFO (März 2017).

Abbildung 1: Herstellung von betroffenen/nicht betroffenen Produktarten in Deutschland

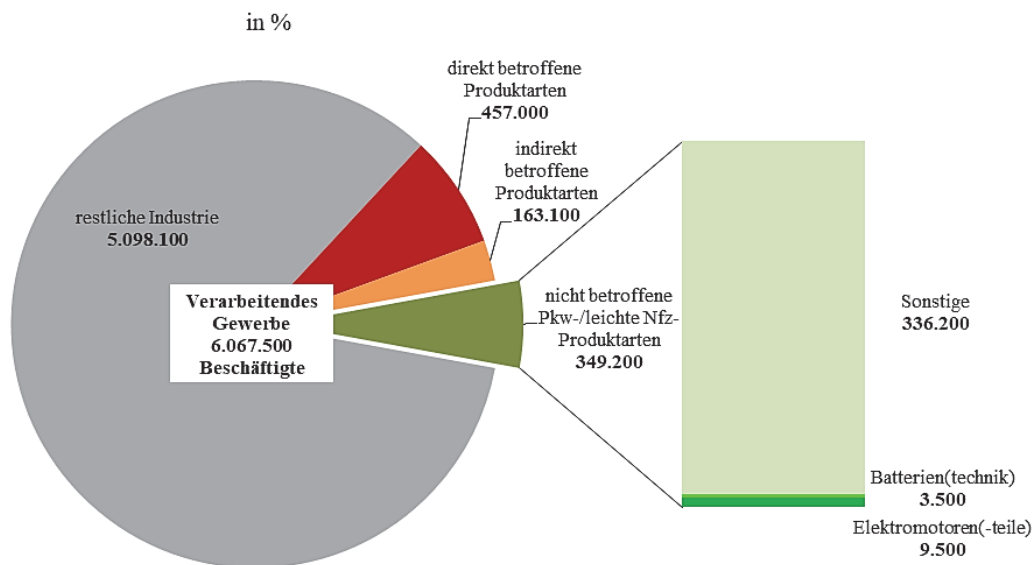
a) Produktionswert



b) Bruttowertschöpfung (Schätzung)



c) Beschäftigungsanteile Verarbeitendes Gewerbe 2015



Quelle: Statistisches Bundesamt (Produktionserhebung, Jahresbericht und Kostenstrukturerhebung im Verarbeitenden Gewerbe), ifo Institut

Wie haben sich unter den nicht mit dem Verbrennungsmotor in Verbindung stehenden Produktarten die beiden zentralen Elektroautokomponenten entwickelt? Sowohl Elektromotoren (und Teile dafür) als auch die Akkumulatorentechnik sind elektrische Ausrüstungen und werden statistisch (bislang) nicht in der Automobilindustrie (WZ-29) nachgewiesen, sondern gehören gemäß der amtlichen Klassifikation der Elektrotechnikbranche (WZ-27) an. Beide Produktgruppen entwickelten sich in den vergangenen Jahren höchst unterschiedlich. Die Herstellung von Elektromotoren in dem für Elektroautos notwendigen Leistungsspektrum (etwa 10 bis 300 kW)⁴¹ war seit 2011 – insbesondere was die heimische Bruttowertschöpfung angeht – in Deutschland rückläufig⁴² (vgl. *Abbildung 2a* und *2b*). Verbaut werden in Elektroautos mittlerweile nahezu ausschließlich (mehrphasige) Wechselstrom-Motoren. Die im Vergleich zur Gesamt- und Automobilindustrie (WZ-29) unterdurchschnittliche Entwicklung trifft gleichermaßen für kleine (>7,5-37 kW; GP-2711 24 050), mittlere (>37-75 kW; GP-2711 24 070)

⁴¹ Während die größere, als Pkw eingestufte Version des Renault Twizy über einen Elektromotor mit 13 kW Leistung verfügt, ist der Tesla S mit einer Maximalmotorisierung von 310 kW das derzeit leistungsstärkste ausschließlich batteriebetriebene in Deutschland verfügbare Elektroauto (Stand März 2017).

⁴² Gilt sowohl in jeweiligen Preisen (wie in den Abbildungen dargestellt) als auch preisbereinigt. Die Erzeugerpreise für Elektromotoren, Generatoren, Transformatoren (und Teile dafür) sind zwischen 2011 und 2015 lediglich um 0,6% gestiegen. Vgl. Statistisches Bundesamt (20. Januar 2017).

und große (>75-375 kW, ≤1000 V; GP-2711 25 401) entsprechende Aggregate zu.⁴³ Einschließlich der Teile für Elektromotoren und elektrische Generatoren (GP-2711 61 003) kamen diese Produktarten 2015 zusammen auf einen Produktionswert von 1,7 Mrd. €, wovon schätzungsweise 0,5 Mrd. € auf die heimische Bruttowertschöpfung entfielen. Dies entsprach gerade einmal 0,12% des Produktionswerts bzw. der Bruttowertschöpfung der deutschen Industrie. Der diesen Produktarten zurechenbare Beschäftigtenanteil (9 500 Personen) lag mit 0,16% nur unwesentlich höher (vgl. *Abbildung 1c*).⁴⁴

Deutschland verfügt zwar grundsätzlich über Ressourcen und Kompetenzen im Elektromotorenbau. Die Tatsache, dass in der jüngeren Vergangenheit insbesondere in den für Elektroautos notwendigen Leistungsklassen die ohnehin nur in vergleichsweise kleinem Umfang stattfindende Fertigung zurückgefahren wurde, stimmt aber eher skeptisch, ob bei einem (womöglich regulierungsbedingten) Anziehen der Nachfrage nach Elektroautos der entsprechende Bedarf an Elektromotoren aus heimischer Produktion gedeckt würde, oder ob diese, worauf der unterproportionale Verlauf der Bruttowertschöpfung hindeutet, zunehmend von ausländischen Zulieferern bezogen werden.

Hinsichtlich der Wachstumsraten beobachten wir in Deutschland bei Batterien und Batterietechnik zwar hohe Wachstumsraten, allerdings stammen die in hierzulande produzierten Elektroautos verwendeten Batteriezellen größtenteils aus Japan und Südkorea.⁴⁵ So hat sich der Produktionswert von Primärelementen und -batterien (GP-2720 11 000) sowie von Lithium-Ionen-⁴⁶, Lithium-Polymer- und anderen elektrischen Akkumulatoren (GP-2720 23 000) zwischen 2011 und 2015 nominal um 84 bzw. 54% erhöht (vgl. *Abbildung 3a*), allerdings von einem extrem niedrigen Niveau ausgehend. Die Bruttowertschöpfung entwickelte sich (analog zu den Elektromotoren) unterproportional, fiel aber dennoch in beiden Produktarten erheblich höher aus als im Vergleichsjahr 2011 (nominal + 60 bzw. + 34%; vgl. *Abbildung 3b*).

⁴³ Elektromotoren der kleinsten Kategorie verbauen deutsche Hersteller lediglich in (hier nicht näher betrachteten) Vollhybrid-Fahrzeugen. Diese verfügen über keine Plug-In-Funktion. Die Batterie für den Elektrobetrieb wird ausschließlich im Fahrbetrieb durch den Verbrennungsmotor und mittels Rekuperation geladen. Aggregate mittlerer Größe finden sich in den PHEV-Modellen BMW 225xe at, 330e und 5er, Mercedes-Benz C350e und E350e, Golf GTE, Audi A3 e-tron sowie in den BEV-Modellen Mercedes-Benz Vito E-Cell, Smart fortwo ed und forfour ed sowie VW e-up!. Größere Elektromotoren kommen in den PHEV-Modellen BMW 7er iPerformance, X5 40e und i8, Mercedes-Benz GLE 500e und S500e, VW Passat GTE, Ford C-Max, Audi Q7 e-tron, Porsche 918 Spyder und Panamera sowie in den BEV- bzw. REEV-Modellen VW e-Golf, Ford Focus Electric, Opel Ampera-e, BMW i3 sowie Mercedes-Benz B250e und SLS AMG zum Einsatz.

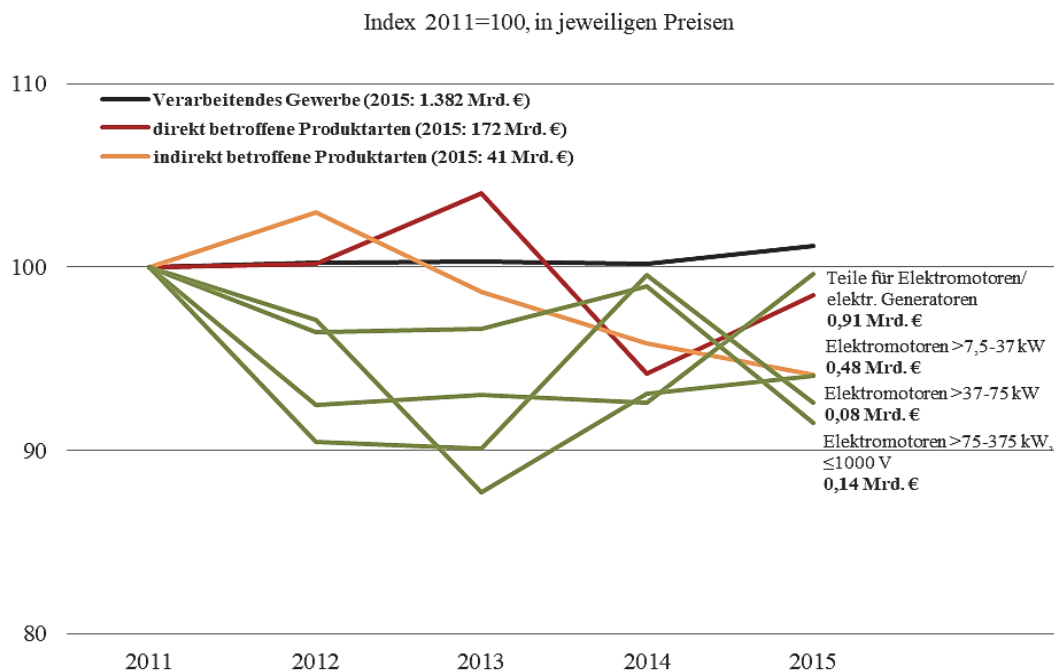
⁴⁴ Die Fertigung von Elektromotoren ist im deutschen Industrievergleich überdurchschnittlich arbeitsintensiv. Dies könnte sich jedoch bei einer wachsenden Marktdurchdringung von Elektroautos und damit einhergehenden höheren Stückzahlen von in diesen Leistungsklassen benötigten Elektroaggregaten (durch Automatisierung und steigenden Skalenerträge) allmählich ändern.

⁴⁵ Vgl. FAZ (5. Dezember 2016).

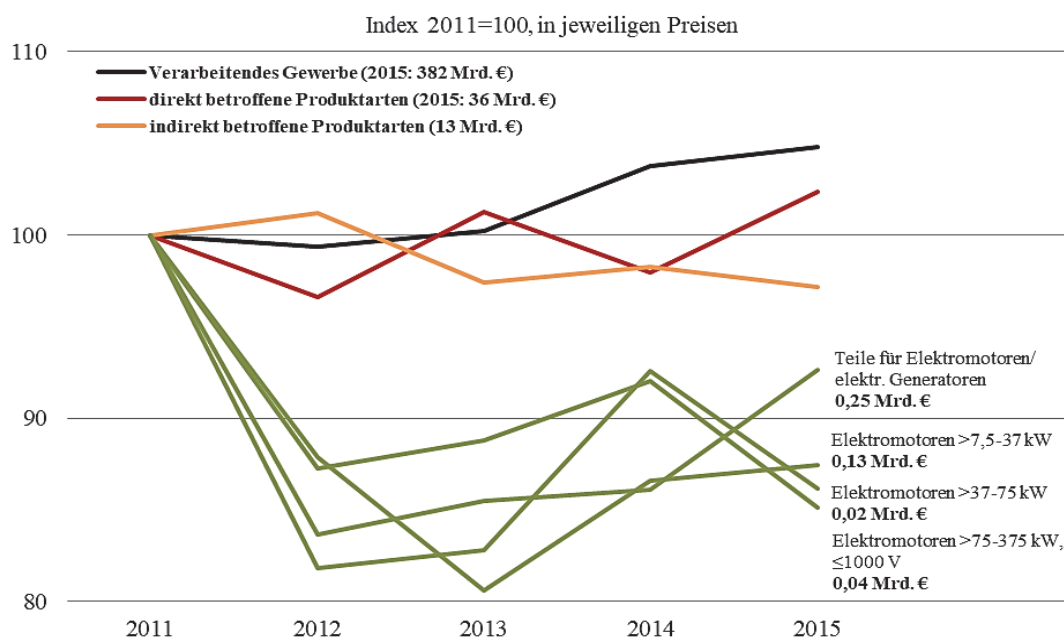
⁴⁶ Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind die im Elektroauto-Segment derzeit am häufigsten verwendete Batterieart. Es wird davon ausgegangen, dass sie ihre dominierende Rolle auch im kommenden Jahrzehnt beibehalten werden. Vgl. FAZ (2012).

Abbildung 2: Herstellung von Elektromotoren (Mehrphasen-Wechselstrom) in Deutschland

a) Produktionswert



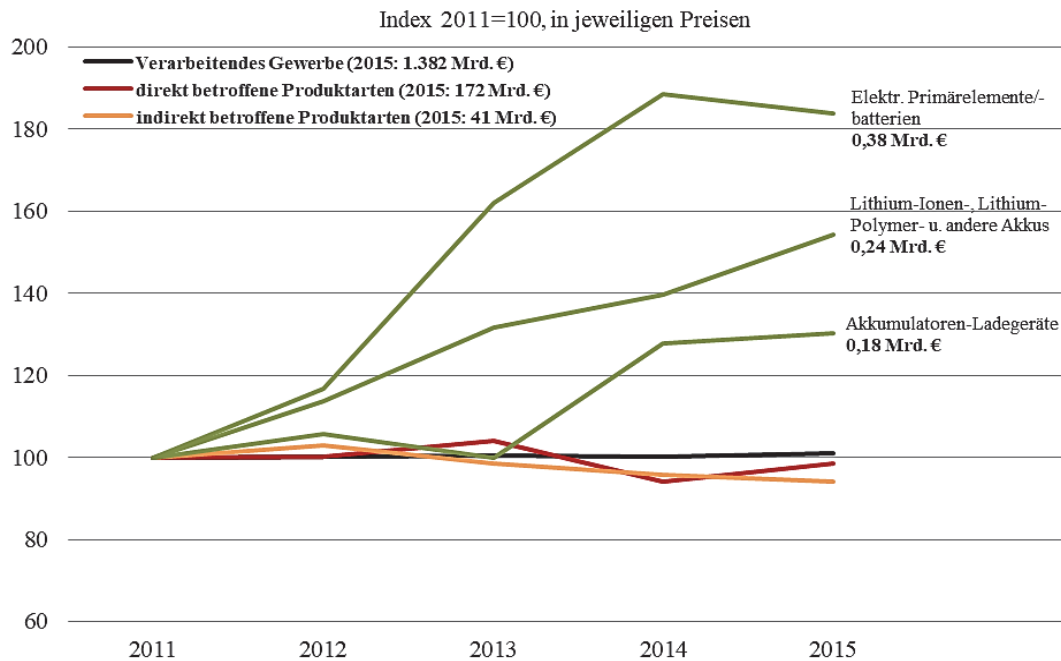
b) Bruttowertschöpfung (Schätzung)



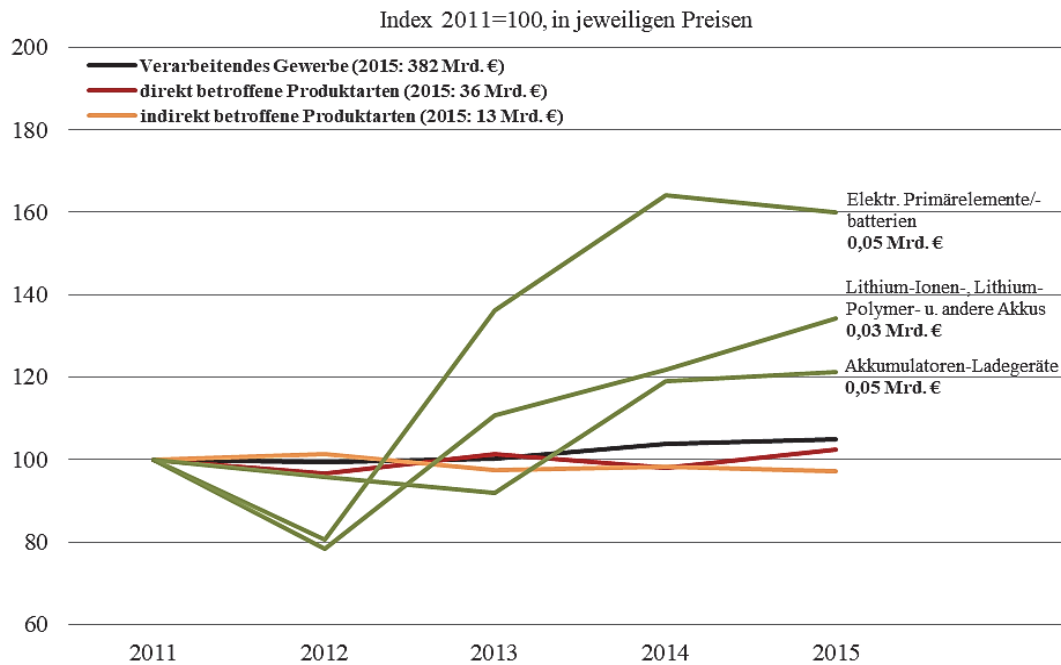
Quelle: Statistisches Bundesamt (Produktions- und Kostenstrukturerhebung im Verarbeitenden Gewerbe), ifo Institut

Abbildung 3: Herstellung von Batterien und Batterietechnik in Deutschland

a) Produktionswert



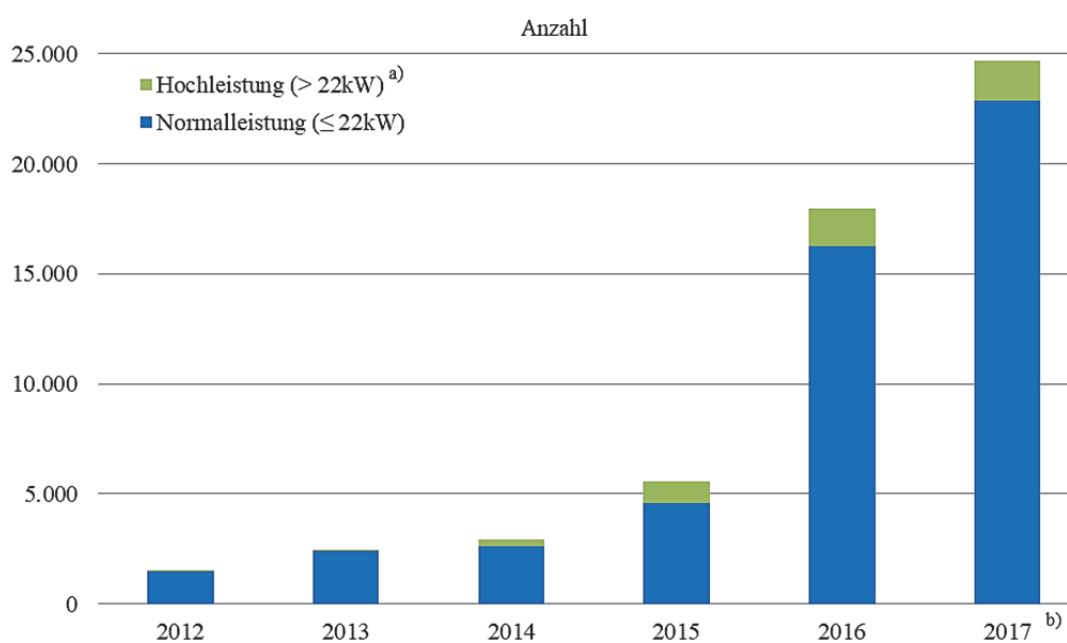
b) Bruttowertschöpfung (Schätzung)



Quelle: Statistisches Bundesamt (Produktions- und Kostenstrukturerhebung im Verarbeitenden Gewerbe), ifo Institut.

Fortschritte gab es ab 2014 auch bei der Herstellung von Ladegeräten für Akkumulatoren (GP-2711 50 330), deren Produktionswert (Bruttowertschöpfung) bis Ende 2015 nominal um 30% (21%) stieg. Preiseffekte können – bei einer Erhöhung der Erzeugerpreise für Akkumulatoren und Batterien im Vergleichszeitraum von 4,2% – nur einen relativ kleinen Teil der Zuwächse erklären. Für die Zukunft ist sogar eher davon auszugehen, dass es bei größeren Stückzahlen, zunehmender Fertigungserfahrung sowie dem Preisdruck durch asiatische Produzenten zu einer Kostendegression in der Batterieherstellung kommt.

Abbildung 4: Ladesäulen für Elektroautos in Deutschland



a) Type-2AC, ChaDeMo, CCS, Tesla SC. - b) Stand März.

Quelle: European Alternativ Fuels Observatory

Ein zentraler Faktor ist die Ladesäulen-Technik für Elektroautos. Erhebung der EAFO zufolge hat sich die Zahl der Ladestationen für Elektro-Fahrzeuge in Deutschland insbesondere 2016 sowie im bisherigen Jahresverlauf 2017 erhöht und lag im März bei 24.700 Einheiten (vgl. *Abbildung 4*). Es handelt sich dabei aber hauptsächlich um Stationen mit Normalleistung (≤22 kW), nur 7% der Ladesäulen waren Hochleistungs-Schnellladestationen (>22 kW). Eine gemeinsame Initiative der deutschen Automobilhersteller hat sich nun insbesondere den beschleunigten Ausbau des Netzes von Schnellladestationen ab dem Jahr 2017 zum Ziel gesetzt.⁴⁷ Die Ladeinfrastruktur bildet das entscheidende Komplementärgut für die Realisierbarkeit von Elektromobilität. Ein

⁴⁷ Vgl. FAZ (29. November 2016).

unzureichendes Netz an Lademöglichkeiten könnte potentielle Kunden vom Kauf eines Elektrofahrzeugs abschrecken.⁴⁸

Insgesamt standen die drei Batterie(technik)-Produktarten trotz der Anstiege seit 2011 bezogen auf das Jahr 2015 nach wie vor nur für einen Produktionswert von 0,8 Mrd. € und generierten dabei eine Bruttowertschöpfung von 0,1 Mrd. €. Dies entsprach gerade einmal 0,06% der wertmäßigen deutschen Industrieproduktion bzw. 0,04% der industrieweiten Bruttowertschöpfung.⁴⁹ Der Beschäftigungsanteil lag ebenfalls bei lediglich 0,06%, das heißt, nur etwa 3.500 Personen waren in der Herstellung entsprechender Produkte tätig (vgl. *Abbildung 1c*). Die bisherige Bedeutung dieser Produktarten für die deutsche Industrie ist damit noch einmal geringer als die des Elektromotorenbereichs. Im Gegensatz dazu konnte die deutsche Batterietechnik in den vergangenen Jahren eine Wachstumsdynamik vorweisen, die sicherlich auch dem niedrigen Ausgangsniveau geschuldet ist. Für die nähere Zukunft sind nennenswertere Produktionsausweitungen jedoch nicht unwahrscheinlich. So ziehen sowohl führende Automobilzulieferer als auch Hersteller den Aufbau einer eigenen Batteriezellenproduktion in Erwägung.⁵⁰ Gerade die Zellfertigung dürfte beim Bau von Elektroautos eine strategisch wichtige Rolle einnehmen. Auf sie entfallen bis zu 70%⁵¹ der Wertschöpfung einer Batterie, welche wiederum allein bis zu 40%⁵² der Wertschöpfung des Elektroautos ausmachen soll. Ob diese Produktionskapazitäten aber schlussendlich in Deutschland entstehen, ist fraglich. Entsprechende mit der Verbrennertechnologie vergleichbare Industriecluster müssten samt den benötigten Vorleistungsketten erst sukzessive aufgebaut werden. Erschwerend kommt hinzu, dass asiatische Hersteller auf diesem Gebiet – ähnlich wie bei Elektromotoren – über erhebliche Kostenvorteile verfügen.

Fertige Elektroautos sind in der amtlichen Produktionserhebung bislang nicht gesondert ausgewiesen. Sie werden noch in der Produktart *Pkw mit Elektro- oder anderem Motoren (GP-2910 240 00)* geführt, worunter beispielsweise auch Autogas- und Erdgasfahrzeuge fallen. Der Produktionswert dieser Mischgruppe wurde 2015 erstmals veröffentlicht und belief sich auf 1,7 Mrd. €. Schätzungsweise 0,4 Mrd. € davon entfielen auf eigene Bruttowertschöpfung. Das entsprach 0,63 bzw. 0,58% der Automobil-(WZ-29)

⁴⁸ Um dieses Investitionshemmnis zu beheben, hat der Gesetzgeber für den Aufbau der Ladesäulen ein Fördervolumen von 300 Mill. € bereitgestellt (vgl. BMVI, 2017). Unter Effizienzgesichtspunkten ist im Falle eines Marktversagens die Subventionierung von Infrastrukturmaßnahmen der (zusätzlich erfolgenden) direkten Gewährung von Prämien beim Kauf von Elektroautos vorzuziehen, da hier die Gefahr von Mitnahmeeffekten deutlich geringer ausfällt.

⁴⁹ Die Wertschöpfungsquote der deutschen Hersteller war bei Akkumulatoren und Batterien (WZ-2720) nur halb so hoch (14%) wie bei Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren (WZ-2711: 28%).

⁵⁰ Vgl. FAZ (2017).

⁵¹ Vgl. FAZ (5. Dezember 2016).

⁵² Vgl. Handelsblatt (7. Februar 2017).

und 0,13 bzw. 0,09% der Gesamtindustrie. Die dieser Produktart zurechenbare Beschäftigtenzahl lag bei 4.500 Personen. Beim Vergleich mit Benzin- (202.000 Personen) und Diesel-Pkw (>159.000 Personen) sowie leichten Nfz mit Dieselmotor (16.000 Personen) zeigt sich die bisher nicht nur von Elektroautos geringe Bedeutung für die deutsche Industrieproduktion, sondern von alternativen Antriebsformen im Allgemeinen. Grund ist weniger eine fehlende Fähigkeit deutscher Hersteller, entsprechende Modelle zu entwickeln und zu produzieren, sondern vielmehr die bislang grundsätzlich sehr geringe Marktdurchdringung von Elektroautos.

Angaben zu leichten Nfz auf Elektrobasis gibt es für das Berichtsjahr 2015 in der amtlichen Produktionserhebung aufgrund zu geringer Fallzahlen nicht. Unter anderem durch den Einstieg der Deutschen Post AG in die Fertigung von Elektrofahrzeugen dürften sich die Produktionswerte von leichten Elektro-Nfz mittlerweile messbar erhöht haben. Seit 2016 lässt die Post von der Streetscooter GmbH in Nordrhein-Westfalen, einem ehemaligen Start-up der RWTH Aachen, das sie im Jahr 2014 übernommen hat, elektrisch betriebene Zustellfahrzeuge für die Pakettochter DHL in Serie fertigen. Die Produktion beläuft sich derzeit auf 10.000 Fahrzeuge pro Jahr.⁵³ Auch etablierte deutsche Automobilhersteller wollen im leichten Nfz-Bereich aktiv werden. So kündigte die Daimler AG für 2018 einen Elektrotransporter für Handwerker und Lieferanten an. Bereits 2011 hatte der Autobauer mit dem Mercedes Benz Vito E-Cell ein entsprechendes Elektromodell ins Angebot aufgenommen, das Projekt mangels Nachfrage jedoch wieder eingestellt. Auch die Volkswagen AG hat mit dem e-Crafter inzwischen ein rein elektrisch betriebenes (leichtes) Nfz vorgestellt.⁵⁴

Anknüpfungspunkte und Kompetenzen für einen Technologiewandel weg vom Verbrennungsmotor hin zum batteriebetriebenen Elektromotor bei Pkw und leichten Nfz sind in der deutschen Industrie durchaus vorhanden. Das – wenn auch noch begrenzte – Angebot deutscher Hersteller an Elektroautos zeigt, dass sie in der Lage sind, entsprechende Modelle zur Marktreife zu bringen. Der Anteil, den fertige Elektrofahrzeuge und zentrale Komponenten wie Elektromotor und Batterie zu Produktionswert, Bruttowertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland beisteuern, bewegt sich bislang jedoch im Promille-Bereich. Zudem erfolgt die Produktion entsprechender Elektromotoren und der Akkumulatoren(technik) – sofern nicht von ausländischen Herstellern bezogen – vergleichsweise häufig in kleinen und mittleren Unternehmen. Nur rund 50% der jeweils in der Fertigung von Elektromotoren sowie Batterien und Akkumulatoren tätigen Personen waren in Großbetrieben mit mehr als 500 Mitarbeitern beschäftigt. In der Automobilindustrie (WZ-29) lag der Wert bei über 90% (vgl. Tabelle 1).

⁵³ Vgl. SZ (10. Februar 2017).

⁵⁴ Vgl. Handelsblatt (24. Februar 2017).

Es ist unklar, inwiefern gerade kleinere Betriebseinheiten ihre Produktion bei einem steigenden Bedarf an Elektrokomponenten nach oben skalieren könnten.

Nicht auszuschließen ist, dass die Automobilhersteller und großen Zulieferer versuchen werden, die Entwicklung von Elektromotoren und Batterien künftig selbst in die Hand zu nehmen. Die im Vergleich zu Verbrennerkomponenten niedrigere Komplexität und ihre bei großen Stückzahlen relativ niedrige Beschäftigungsintensität wecken aber Zweifel, ob dann auch deren Produktion hierzulande stattfinden wird. Bezogen auf die Gesamtindustrie könnte die Ko-Existenz von Verbrennungs- und batteriebetriebenen Elektromotor als Fahrzeugantrieb zwischenzeitlich dennoch zu einem Beschäftigungsaufbau führen. Eine dauerhafte Kompensation der mit der Verbrennungstechnologie verbundenen Beschäftigung lässt sich daraus jedoch nicht ableiten. So ist zu befürchten, dass Deutschland im Zuge des Technologiewandels die bereits manifestierten komparativen Nachteile bei der Herstellung von Elektromotoren und Batterietechnik nicht gänzlich aufholen kann und mit dem Verschwinden der Verbrennerproduktion (sowie der damit verbundenen komparativen Vorteile) in der globalen Automobilerzeugung Wertschöpfungsanteile verliert.

2.5 Deutschland als reiner Anbietermarkt?

Die in *Kapitel 2.2* durchgeführte Quantifizierung potentieller Effekte eines Zulassungsverbots für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor auf Produktionswert, Bruttowertschöpfung und Beschäftigung der deutschen Industrie nimmt an, dass nicht nur die Herstellung entsprechender Produktarten für den inländischen Absatz betroffen wäre, sondern auch diejenige für Exportmärkte. Aufgrund der starken Exportorientiertheit der deutschen Automobilindustrie stellt sich die Frage, inwiefern es sich hierbei um eine realistische Annahme handelt. So werden insbesondere im Kraftwagen- und Motorenbereich (WZ-2910) mehr als 70% der Umsätze im Ausland erzielt,⁵⁵ der Großteil davon mit europäischen Kunden. Allerdings ist es nicht unwahrscheinlich, dass es bis oder spätestens ab 2030 (dem unterstellten Inkrafttreten eines Zulassungsverbots) auch außerhalb Deutschlands zu einer verstärkten Regulierung des Verbrennungsmotors kommen könnte. Beispielsweise erwägt China – als weltweit größter Automobilmarkt – die Einführung einer Elektroquote. Damit dürften sich Automobilhersteller und ihre Zulieferer bereits deutlich vor dem Jahr 2030 mit entsprechenden regulatorischen Eingriffen auseinandersetzen müssen. Abgesehen davon werden regulatorische Maßnahmen, die auf die Reduktion von Emissionen im Verkehrssektor abzielen (CO₂-Grenzwerte, Euro-Normen), in der Regel nicht auf nationa-

⁵⁵ Vgl. Tabelle 6.

ler, sondern auf Ebene der Europäischen Union implementiert und betreffen somit den vollständigen gemeinsamen Binnenmarkt.

Käme es dennoch zu einer ausschließlich in Deutschland implementierten Politikmaßnahme, wäre es zumindest zweifelhaft, ob (Komponenten für) Pkw und leichte Nfz auf Verbrenner-Basis in Deutschland dauerhaft nur für den Export produziert werden könnten, während ihre Nutzung im Heimatmarkt untersagt ist. Ergebnisse der Neuen Handelstheorie deuten darauf hin, dass Industrien, in denen Skaleneffekte eine Rolle spielen, ihre Produktion zur Minimierung der Transportkosten vor allem dort ansiedeln, wo sich auch die Absatzmärkte dafür befinden. In der Literatur wird dieses Phänomen als Heimatmarkteffekt bezeichnet⁵⁶. Fällt nun im Verbrennerbereich der Heimatmarkt zur Erzielung von Skalenerträgen weg, so verliert die deutsche Automobilindustrie bei dieser Technologie im internationalen Wettbewerb Kostenvorteile, was die Exportchancen von Pkw und leichten Nfz schmälert. Dies macht es für die Hersteller unattraktiv, auf dem Verbrennungsmotor basierende Fahrzeuge weiterhin in Deutschland für den Exportmarkt zu produzieren. Die theoretischen Erklärungen decken sich zudem mit den Beobachtungen zu dem in der jüngeren deutschen Industriegeschichte einzigen Beispiel für ein vergleichbares Technologieverbot – dem im Jahr 2002 mit der Novellierung des Atomgesetzes⁵⁷ eingeleiteten und bis Ende 2022 geplanten Atomausstieg. Er führte dazu, dass sich die Siemens AG, als wichtigster deutscher Hersteller von Kernkrafttechnik, 2011 vollständig aus dem Atomgeschäft zurückzog.⁵⁸ Auch die institutionellen Rahmenbedingungen für ein allein auf dem Export aufbauendes Geschäftsmodell verschlechterten sich 2014 mit dem Beschluss der Bundesregierung, keine Exportkreditgarantien (sogenannte Hermesdeckungen) mehr für Anlagen zur nuklearen Stromerzeugung zu übernehmen.⁵⁹

2.6 Fazit

Ausgehend von der deutschen Produktionsstruktur im Jahr 2015 stellen mindestens 457.000 Beschäftigte Produktarten her, die von einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotor direkt betroffen wären (z.B. Benzin- und Dieselmotoren, Abgasreinigungssysteme). Das entspricht 7,5% der deutschen Industriebeschäftigung. Der weit überwiegende Teil davon (426.000) ist in der Automobilindustrie angesiedelt. Dort würden die Beschäftigungseffekte am stärksten zu Tage treten, 52% ihres Personals wären potentiell betroffen. Die Abhängigkeit des Maschinenbaus, der

⁵⁶ Vgl. Cordon (1970) und Krugman (1980).

⁵⁷ Es folgten zwei weitere Novellierungen in den Jahren 2010 und 2011.

⁵⁸ Vgl. WiWo (2011).

⁵⁹ Vgl. BMWi (2014).

wichtigsten Kfz-Zulieferbranche, von der Verbrenner-Technologie ist deutlich geringer. Werden auch Beschäftigte aus Zuliefer- und Komplementärbereichen mit einbezogen, die nur indirekt an den Verbrenner gekoppelt sind (z.B. Schaltgetriebe, die in alternativen Antrieben weniger Komplexität aufweisen, oder die Kraftstoffherstellung), erhöht sich die Zahl der potentiell von einem Zulassungsverbot betroffenen Arbeitsplätze um mindestens 163.000 Personen bzw. knapp 3% der deutschen Industriebeschäftigung. Im Fokus steht hier in erster Linie die Metallindustrie: 102.000 Beschäftigte produzieren dort Teile für Straßenfahrzeuge, die hauptsächlich in der Motorentechnik und -konstruktion Verwendung finden dürften. Direkte und indirekte Abhängigkeiten zusammengenommen beträfe ein Zulassungsverbot schätzungsweise 620.000 Beschäftigte (Untergrenze). Das sind Stand 2015 gut 10% der deutschen Industriebeschäftigung.

Ob im Verbotsfall tatsächlich Arbeitsplätze in diesem Umfang wegfallen würden, hängt von der Anpassungsfähigkeit der hierzulande ansässigen Automobilhersteller und Zulieferer ab. Unter anderem die Größenstruktur der betroffenen Unternehmen dürfte eine Rolle spielen. Von den 457.000 direkt betroffenen Beschäftigten wären vor allem diejenigen 31.000 besonders bedroht, die in kleinen und mittleren Unternehmen tätig sind. Letzteren dürfte es im Vergleich zu Großunternehmen deutlich schwerer fallen, parallel zur Produktion von Verbrenner-Komponenten auf Produkte und Geschäftsfelder für Elektrofahrzeuge umzustellen. Bei den indirekt vom Verbrennungsmotor abhängigen Produktarten sind kleine und mittlere Akteure deutlich präsenter – vor allem die Herstellung von Metallteilen für Kfz erfolgt schwerpunktmäßig in kleineren Betriebseinheiten. Bezieht man auch hier Größenaspekte mit ein, dann wären von den 163.000 indirekt betroffenen Beschäftigten sogar 101.000 in besonderem Maße gefährdet.

Die Abhängigkeit von der Verbrennungstechnologie stellt sich gemessen an ihrem Wertschöpfungsbeitrag für die deutsche Industrie ausgeprägter dar als unter Beschäftigungsgesichtspunkten. Ein Umstand, der im Wesentlichen auf die Automobilindustrie zurückzuführen ist und die hohe (Arbeits-)Produktivität ihres Personals widerspiegelt. Produktarten, die in direkter Verbindung zu Pkw und leichten Nfz mit Verbrennungsmotor stehen, tragen – gemessen an der Produktionsstruktur im Jahr 2015 – (mindestens) 9% bzw. 36 Mrd. € zur industriellen Bruttowertschöpfung in Deutschland bei. Indirekt betroffene Produktarten kommen auf einen Wertschöpfungsanteil von über 3% bzw. 13 Mrd. €. Zusammengenommen wären von einem Zulassungsverbot damit potentiell knapp 13% der Bruttowertschöpfung der deutschen Industrie tangiert, was einem jährlichen Volumen von 48 Mrd. € entspricht.

Gegen einen vollständigen Wegfall der Beschäftigung und Wertschöpfung in den genannten Größenordnungen spricht, dass gewisse Zulieferteile für den Verbrennungs-

motor nicht ausschließlich für Pkw und leichte Nfz produziert werden, sondern weiterhin in – vom Zulassungsverbot annahmegemäß ausgenommenen – schweren Nfz (Lastwagen, Omnibusse) einsetzbar sind. Zudem muss berücksichtigt werden, dass es im Bereich alternativer Antriebsarten in Deutschland zu einem Beschäftigungsaufbau kommen kann, der den Abbau im Verbrenner-Bereich zumindest teilweise kompensieren würde. Dass dies aber die gleichen Beschäftigten oder sogar Beschäftigte innerhalb des gleichen Unternehmens wären ist unwahrscheinlich, da der Aufbau von Produktionskapazitäten für Elektrofahrzeug-Komponenten parallel zu und losgelöst von der Verbrenner-Fertigung erfolgen dürfte.

Zwar liegt im deutschen Automobilbau die Wachstumsdynamik bereits außerhalb der Verbrennertechnologie, d.h. in Produktgruppen, die von einem Zulassungsverbot nicht betroffen wären. Auch sind in der deutschen Industrie Anknüpfungspunkte und Kompetenzen für einen Technologiewandel weg vom Verbrennungsmotor hin zum batteriebetriebenen Elektromotor bei Pkw und leichten Nfz vorhanden. So zeigt das Angebot deutscher Hersteller an Elektroautos, dass sie in der Lage sind, entsprechende Modelle zur Marktreife zu bringen. Allerdings bewegt sich der Anteil, den fertige Elektrofahrzeuge sowie zentrale Komponenten wie Elektromotor und Batterie bislang zu Beschäftigung und Bruttowertschöpfung der deutschen Industrie beisteuern, noch im Promille-Bereich.

3 Innovationsanreize in Verbrennungsmotoren und Alternativtechnologien

3.1 Zielsetzung, Methodik und Datengrundlage

In diesem Kapitel befassen wir uns intensiv mit den Investitionen und den Investitionsanreizen in alternative Antriebstechnologien durch die deutsche Automobilindustrie. Dieses Thema ist nicht nur für die Politik, sondern auch für die Wissenschaft aktuell von hohem Interesse. Eine Reihe von hochkarätigen Studien befasst sich damit, den Übergang von einer etablierten Technologie auf eine weniger entwickelte, aber „sauberere“ Alternativtechnologie zu analysieren. Eine zentrale Frage ist hierbei, ob Akteure (Individuen, Firmen oder sogar Länder), die einen hohen Wissensstock in der etablierten Technologie haben, möglicherweise weniger stark in alternative Technologien investieren (siehe z.B. Acemoglu et al. 2012). Konkret auf die Automobilindustrie angewendet würde dies bedeuten, dass die deutschen Firmen möglicherweise aufgrund ihrer führenden Position bei der Technologie von Verbrennungsmotoren Investitionen in Alternativen (also Elektroautos, Hybridfahrzeuge und Brennstoffzellen) vernachlässigen. In einer Analyse von Patentdaten auf Firmenebene kommen Aghion et al. (2016) zu dem Ergebnis, dass ein größerer vorhandener Stock an Verbrennerpatenten zwar sowohl die Wahrscheinlichkeit, ein zusätzliches Verbrennerpatent anzumelden, als auch die Wahrscheinlichkeit, ein Patent in einer alternativen Antriebstechnologie anzumelden, erhöht. Dabei ist aber der Effekt auf zusätzliche Patente in der etablierten, bekannten Technologie stärker.

In der öffentlichen Diskussion ist die Wahrnehmung verbreitet, dass die Automobilindustrie in Deutschland es versäumt habe, technologische Kompetenz in den alternativen Antriebstechnologien aufzubauen. In der Politik kommt dies insbesondere im Antrag des Bundesvorstands der Partei Bündnis 90/Die Grünen vom 29.9.2016 zum Ausdruck, in dem es heißt: „Die Automobilwirtschaft hat nur dann eine Zukunft, wenn sie Fahrzeuge entwickelt, die sauber und leise sind und kein CO₂ mehr verursachen. [...] Ein ‚Weiter so‘ führt unweigerlich zum Verlust von Arbeitsplätzen.“⁶⁰ Fehlende Investitionen aufgrund des Verharrens auf der etablierten Technologie des Verbrennungsmotors würden ein Marktversagen implizieren, das einen Eingriff durch die Politik begründen könnte. Die entsprechende These, die wir überprüfen, lautet dementsprechend: *„Wegen der herausragenden Stellung der deutschen Automobilindustrie bei Verbrennungsmotoren wurden Investitionen in alternative Antriebstechnologien ver-*

⁶⁰ Siehe https://bdk.antragsgruen.de/40/Energiewende_rettet_Verkehrswende_einleiten-49684.

nachlässigt.“ Im Folgenden werden wir das Vorliegen eines solchen Marktversagens detailliert untersuchen, indem wir die Investitionsbemühungen der deutschen Automobilindustrie anhand von bewilligten Patentanmeldungen in den verschiedenen Technologiefeldern im Zeitraum 1995-2015 analysieren und ins Verhältnis zu den wichtigsten Wettbewerbsnationen stellen: China, Frankreich, Japan, Südkorea und die USA.

Patentschriften enthalten eine Zuordnung zu technischen Feldern – eingeteilt in Sektionen A – H und fein gegliederte Untersektionen – gemäß der Internationalen Patentklassifikation (IPC). Anhand dieser Klassifikation können wir Patente für die folgenden fünf Kategorien identifizieren:

1. Verbrennungsmotoren – hierbei handelt es sich um die „etablierte“ Antriebstechnik
 - a. darunter auf Reduktion des Benzinverbrauchs abzielende Innovationen
2. Batterie-elektrische Fahrzeuge (Elektroautos)
3. Hybridfahrzeuge
4. Brennstoffzellenfahrzeuge
5. Allgemeine Batterie- und Akkumulatorentechnik

Hinsichtlich der Zuordnung von Patenten in die verschiedenen Kategorien übernehmen wir in den Punkten 1. bis 4. den Ansatz von Aghion et al. (2016).⁶¹ Hinsichtlich der Kategorie der Verbrennungsmotoren definiert deren Studie zudem eine Unterkategorie von Innovationen, die vordringlich auf Reduktion des Benzinverbrauchs abzielen, was für unsere Analyse ebenfalls von Interesse ist. Für die Wettbewerbsfähigkeit von rein elektrischen Fahrzeugen spielt schließlich vor allem die Leistungsfähigkeit der Batterien eine zentrale Rolle. Deswegen führen wir auch eine Analyse der Patente in der entsprechenden Kategorie durch – für diese Klassifikation berufen wir uns auf das von einer IPC Expertengruppe ausgearbeitete „IPC Green Inventory“.⁶² Die relevante Unterkategorie ist „Speicher für elektrische Energie“ (storage of electrical energy). Die von uns benutzten Zuordnungen der entsprechenden IPC-Codes zu den verschiedenen technologischen Kategorien findet sich in *Tabelle 7* bis *Tabelle 12* im Anhang.

Die Datenquelle für dieses Kapitel der Studie ist die internationale Patentdatenbank der Weltorganisation für geistiges Eigentum (im Englischen: World Intellectual Property Organization, WIPO), einer Teilorganisation der Vereinten Nationen mit dem Ziel, Rechte an immateriellen Gütern weltweit zu fördern. Über eine Suchmaschine (Pa-

⁶¹ Die ausgewählte Zuordnung von Patentklassen zu Antriebstechnologie beruht auf Vorarbeiten der OECD sowie IPC-Expertengruppen, siehe im Detail Aghion et al. (2016) und www.oecd.org/environment/innovation.

⁶² Siehe "IPC Green Inventory - Storage of Electrical Energy", <http://www.wipo.int/classifications/ipc/en/est>.

tentscope) hat man Zugang zu den mehr als 58 Millionen Patentedokumenten, die seit 1978 bei den Patentbehörden der Mitgliedstaaten eingegangen sind. Enthalten sind nur veröffentlichte Patente, also solche Anmeldungen, die den (teils langwierigen) Begutachtungsprozess bereits durchlaufen und bestanden haben. Als Folge ist der aktuelle Rand der Beobachtungen, insbesondere das Jahr 2015, unvollständig erfasst, da Anmeldungen noch in der Prüfung durch die Behörden sind.

Um die Innovationsanstrengungen der deutschen Automobilindustrie zu messen, benutzen wir die Anzahl der gewährten Patente nach dem Anmeldejahr. Eine Analyse auf Grundlage von Patentdaten hat einige zentrale Vorteile gegenüber anderen Methoden, weswegen sie in der ökonomischen Literatur häufig Anwendung findet (siehe auch Aghion et al. 2016). Die wichtigsten Argumente sind für uns:

1. Informationen beziehen sich direkt auf die betreffenden Produktkategorien – Investitionsmaße lassen eine derartig feine Differenzierung nicht zu
2. Patente werden generell veröffentlicht, unabhängig davon, ob der Eigentümer zur Veröffentlichung von Bilanzen oder ähnlichem verpflichtet ist
3. Patente spielen für die Automobilindustrie eine wichtige Rolle

Ein häufig erwähnter Nachteil von Patenten als Maß für Innovationsbemühungen ist die Tatsache, dass sich viele Patente für die Antragsteller als wenig werthaltig erweisen. Wie in der Literatur üblich konzentrieren wir uns auf sogenannte „triadische“ Patente, also solche Patente, die jeweils bei der amerikanischen, europäischen und japanischen Patentbehörde angemeldet wurden und damit fast weltweite Geltung haben. Diese Patente sind typischerweise werthaltiger, da die Anmelder zusätzliche Kosten auf sich nehmen, um den breiteren Geltungsraum zu erzielen. Eine weitere mögliche Verzerrung ist darin begründet, dass die Forschungsbemühungen von Herstellern mit Mutterkonzernen im Ausland potentiell als Patent dem Mutterkonzern und damit z.B. den USA zugerechnet werden. Damit würde der deutsche Anteil an Patenten tendenziell unterschätzt.

Insgesamt fließen ca. 48.000 Patente, die im Zeitraum zwischen 1995 und 2015 in den fünf Kategorien durch Antragsteller aus den sechs betrachteten Nationen angemeldet und von den Patentbehörden erteilt wurden, in unsere Analysen ein.⁶³

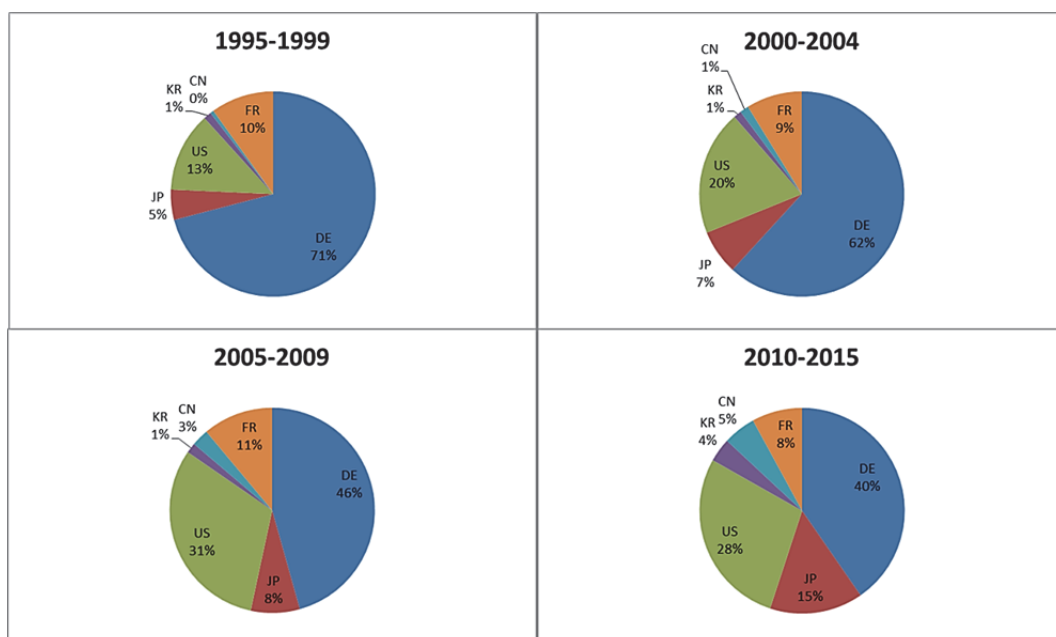
⁶³ Die Patentrecherche wurde mittels Patentscope im März 2017 durchgeführt. Da neu erteilte Patente wöchentlich in die Datenbank eingepflegt werden und teils Änderungen der Klassifikation vorgenommen werden, ändern sich die Ergebnisse für Datenbankabfragen im Zeitverlauf. Zum Vergleich: Für den Zeitraum 1995 bis 2005 beobachten wir in unseren Daten rund 12.000 Patente, während sich die Studie von Aghion et al. (2016) auf Basis von PATSTAT auf ca. 25.000 Patente stützt – für den (längeren) Betrachtungszeitraum 1978-2005 und Antragsteller aus *allen* Ländern.

3.2 Investitionen in Verbrennungsmotoren, alternative Antriebe und Batterien

Fehlen der deutschen Automobilindustrie aufgrund der Dominanz bei Verbrennungsmotoren die Anreize, in alternative Antriebstechnologien zu investieren? In diesem Teil der Studie werden wir analysieren, wie sich die Position der deutschen Automobilbauer und Zulieferer relativ zu den wichtigsten Wettbewerbern im Hinblick auf Verbrennungsmotoren gegenüber den alternativen Antriebssträngen unterscheidet. Hierbei unterteilen wir den Zeitraum 1995 bis 2015 in vier Teilperioden: 1995 bis 1999, 2000 bis 2004, 2005 bis 2009 und 2010 bis 2015. Für jede dieser Teilperioden analysieren wir, welcher Anteil der erfolgreichen Patentanmeldungen jeweils auf Anmelder mit Firmen- oder Wohnsitz in Deutschland, China, Frankreich, Japan, Südkorea und den USA entfielen. *Abbildung 5* stellt die Entwicklung für die Patente, welche Verbrennungsmotoren betreffen, dar. In der ersten Teilperiode lag der Anteil der von deutschen Marktteilnehmern beantragten Patente bei 71%, was die starke Stellung der deutschen Industrie widerspiegelt. Bemerkenswert ist allerdings, dass der deutsche Anteil der Patente sich im Zeitablauf deutlich verringert, erst auf 62% (2000-2004), dann weiter auf 46% (2005-2009) und schließlich aktuell auf nur noch 40% (2010-2015). Zu beachten ist hierbei weiter, dass sich die Gesamtzahl der Patentanträge je Periode über den Beobachtungszeitraum hinweg massiv erhöht hat (ein Phänomen, das sich auf alle Klassen von Patenten erstreckt und unter anderem als „Patente-Explosion“ bezeichnet wird, siehe z.B. Hall 2005): Von knapp 2000 Patenten im Zeitraum 1995 bis 1999 auf mehr als 8.000 Patente in der aktuellsten Teilperiode. Die deutsche Industrie erhält somit über den gesamten Betrachtungszeitraum ca. 49% der gewährten Patente im Bereich Verbrennungsmotoren.

Für den starken Rückgang über die Zeit sind insbesondere zwei Faktoren verantwortlich: Zum einen hat sich der Forschungsoutput zweier vergleichsweise „etablierter“ Konkurrenten, nämlich der japanischen und amerikanischen Industrie, signifikant erhöht. War ihr gemeinsamer Anteil in der ersten Teilperiode nur bei 18% (USA 13%, Japan 5%), verdoppelte er sich bis zur aktuellsten Teilperiode auf 43% (USA 28%, Japan 15%). Der zweite zentrale Faktor ist das Aufkommen zweier „neuer“ Wettbewerber in China und Südkorea. Lag der gemeinsame Anteil an Verbrennerpatenten dieser Länder in der ersten Teilperiode bei unter 1%, so hat er sich bis zur aktuellsten Teilperiode auf rund 9% mehr als verneunfacht. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund bemerkenswert, dass in diesen beiden Ländern eine aktive Industriepolitik betrieben wurde – und im Fall von China weiterhin betrieben wird.

Abbildung 5: Patente Verbrennungsmotoren – Anteile der jeweiligen Länder



Quelle: Patentscope, ifo Institut

Diesem Benchmark werden wir in der Folge mit dem Verlauf in anderen Technologiefeldern vergleichen, beginnend mit den Patenten, die sich auf reine Elektroautos beziehen (siehe *Abbildung 6*). Es zeigt sich unmittelbar, dass in der ersten betrachteten Teilperiode die Position der deutschen Industrie mit einem Anteil von 56% ebenfalls sehr stark war. In der nächsten Teilperiode ging der Anteil deutlich auf 32% zurück, um sich dann in den folgenden Teilperioden auf einem etwas höheren Niveau einzupendeln (37% im Zeitraum 2005-2009, 34% im Zeitraum 2010-2015). Die absolute Anzahl der erfolgreichen deutschen Patentanträge im Datensatz hat sich von ca. 60 (1995-1999) auf über 1.300 (2010-2015) mehr als verzwanzigfach.

Der aktuellste Anteil der deutschen Hersteller an den Patenten für Elektrofahrzeuge von 34% unterscheidet sich zum einen nicht kategorisch von den 40%, welche bei den Verbrennerpatenten erreicht werden. Auch relativ zu den stärksten Wettbewerbern ist die deutsche Position im Bereich Elektrofahrzeuge mit einem deutlichen Abstand zum stärksten Wettbewerber Japan (23%) ähnlich dominant. Im Bereich der reinen Elektrofahrzeuge sind wiederum zwei Entwicklungen besonders bemerkenswert. Zum einen ist die Entwicklung der beiden „neuen“ Wettbewerber China und Südkorea mit einer Verdreifung des gemeinsamen Marktanteils von knapp 5% auf rund 13% ähnlich rapide. Zum anderen fällt auf, dass die USA mit dem Elektro-Pionier Tesla alles andere als eine dominante Position aufweisen konnten. Nur in der Zeitperiode zwischen 2000 und 2004 waren die USA bei den Patentanmeldungen führend (worauf das 2003 gegründete Unternehmen keinen Einfluss hatte). Über den gesamten Zeitraum hinweg kommen amerikanische Erfinder auf einen Anteil von rund 20% der angemeldeten

Patente, während der deutsche Anteil bei mehr als 35% deutlich höher liegt. Dies ist ein deutliches Anzeichen dafür, dass die Einführung erfolgreicher (oder als erfolgreich wahrgenommener) Elektrofahrzeuge nicht vornehmlich der technologischen Basis zu verdanken ist, sondern andere Faktoren die entscheidende Rolle spielen müssen.⁶⁴ Auf dieses Thema kommen wir in der Folge in *Kapitel 3.4* im Detail zurück.

Als nächstes wenden wir uns der Entwicklung bei den Patenten, die sich auf Hybridtechnologie beziehen, zu (siehe *Abbildung 7*). Vorreitermodell in der Serienproduktion war von 1997 an der Toyota Prius. In der Zwischenzeit hat der Toyota-Konzern mehr als 10 Mill. Hybridfahrzeuge verkauft.⁶⁵ Daher mag es überraschen, dass hinsichtlich der Innovationstätigkeit die japanische Automobilindustrie keine führende Rolle hatte. Tatsächlich waren es vor allem deutsche Entwickler, die in der frühesten Periode von 1995-1999 mit einem Anteil von 60% der angemeldeten Patente die Technologie etabliert haben. Die japanische Industrie kam in dieser frühen Phase im Vergleich nur auf einen Anteil von 11% der internationalen Patente. In der Folge konnte die deutsche Industrie dieses extrem hohe Niveau nicht ganz beibehalten: Mit Anteilen von 51% (2000-2004) und 52% (2005-2009) behielt sie aber ihre klar führende Position über das nächste Jahrzehnt bei. Mit einem Anteil von 32% in der aktuellsten Periode (2010-2015) waren die deutschen Erfinder weiterhin führend, wenn auch die japanische Industrie nun mit einem Anteil von 27% beinahe aufgeholt hat.

⁶⁴ Dies gilt noch mehr für die rein elektrischen Modelle der französischen Autobauer. Der Anteil der französischen Autoindustrie an den Patenten für Elektroautos lag über den gesamten Beobachtungszeitraum hinweg bei 11,9%.

⁶⁵ Siehe zum Beispiel <http://newsroom.toyota.eu/global-sales-of-toyota-hybrids-reach-10-million>.

Abbildung 6: Patente Elektrofahrzeuge – Anteile der jeweiligen Länder

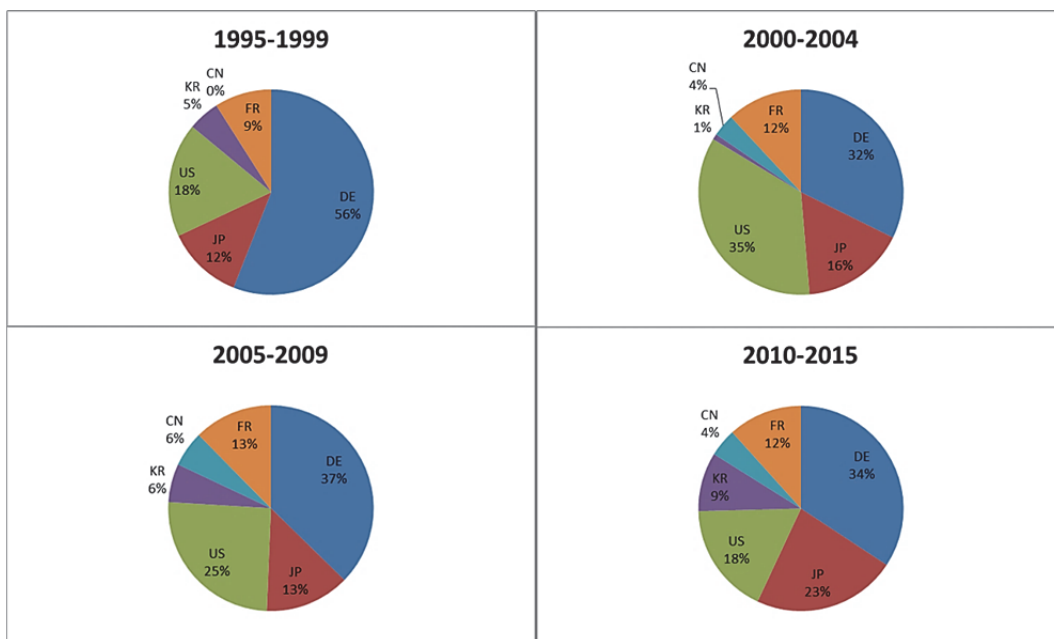
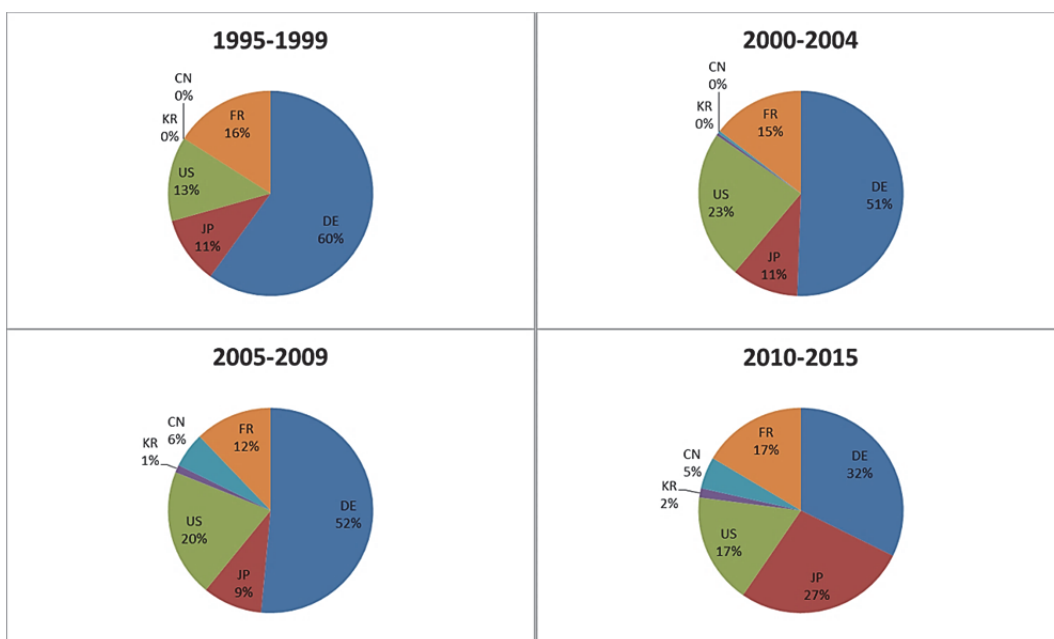
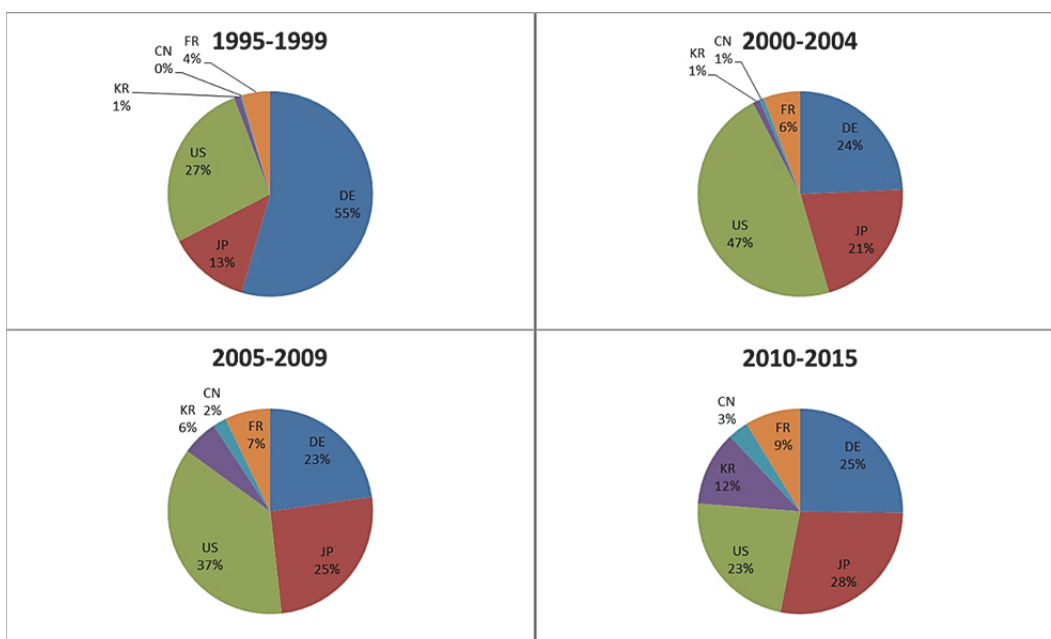


Abbildung 7: Patente Hybridfahrzeuge – Anteile der jeweiligen Länder



Quelle: Patentscope, ifo Institut

Abbildung 8: Patente Brennstoffzellenfahrzeuge – Anteile der jeweiligen Länder



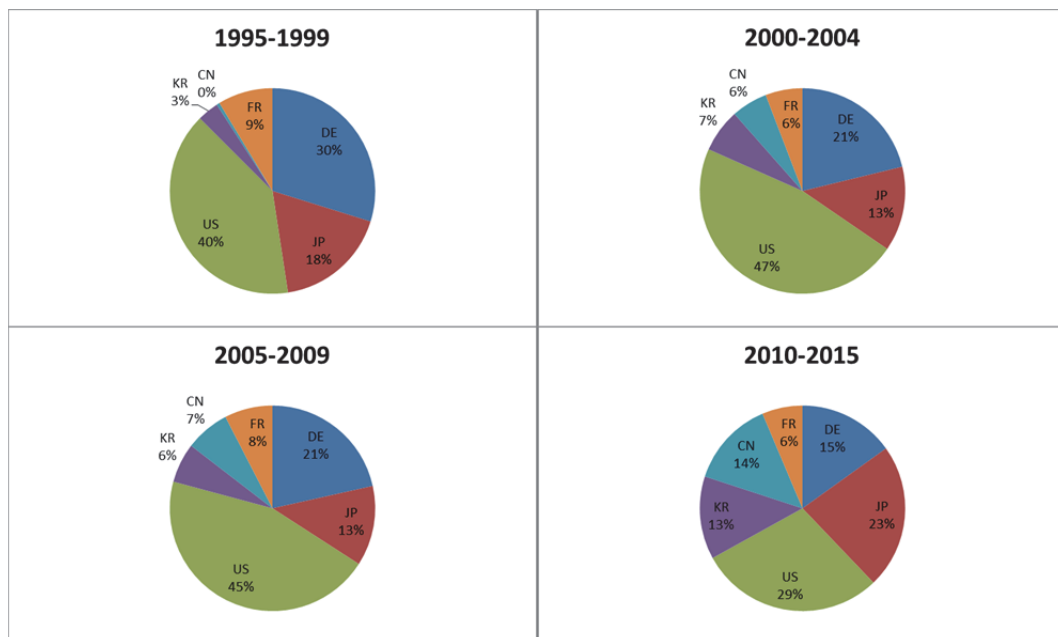
Quelle: Patentscope, ifo Institut

Im Vergleich zur reinen Elektromobilität verläuft somit die Entwicklung fast parallel; wenn überhaupt, dann war und ist die Position der deutschen Industrie in der Hybridtechnologie sogar noch etwas stärker. Dementsprechend kann auch von einem fundamentalen Unterschied in der Position zwischen Verbrenner- und Hybridpatenten keine Rede sein.

Der Verlauf hinsichtlich der Anteile bei Patenten zu Brennstoffzellen (siehe *Abbildung 8*) unterscheidet sich ebenfalls nicht grundsätzlich von den vorangegangenen Technologiefeldern. Auch hier waren es ursprünglich deutsche Entwickler, welche den technologischen Grundstein für diese Antriebsart gelegt haben, mit einem Anteil von 55% der Patente in der Periode 1995-1999. In den Folgejahren sieht man den Effekt der Fusion zwischen Daimler und Chrysler, wodurch sich ein Teil der Forschung in diesem Feld in die USA verlagert hatte. Am aktuellen Rand sind Deutschland, Japan und die USA mit jeweils einem Anteil von ca. einem Viertel der erfolgreichen Patentanmeldungen in etwa gleichauf. Aber auch für die Brennstoffzellentechnologie gilt, dass deutsche Firmen über die gesamte Entwicklung der Technologie hinweg zu den weltweit führenden Akteuren zählen. Von einem „Ausruhen“ auf der Verbrennertechnologie kann keine Rede sein.

Zum Abschluss dieses Abschnitts betrachten wir eine allgemeinere Technologiegruppe: Batterien und Akkumulatoren. In einer möglichen von Elektroautos geprägten Zukunft würde dieser Technologie jedoch offensichtlich eine fundamentale Rolle für die Automobilindustrie zufallen. Dieser Forschungsbereich ist generell etwas näher an

Abbildung 9: Patente Batterien und Akkumulatoren – Anteile der jeweiligen Länder



Quelle: Patentscope, ifo Institut

Grundlagenforschung und bezieht sich insbesondere im Gegensatz zu den oben bereits betrachteten nicht ausschließlich auf den Fahrzeugbau. Hier sehen wir nun erstmalig ein Feld, in dem die deutsche Industrie nicht führend ist: Im gesamten Zeitablauf erreichen die USA die höchsten Anteile bei den Patenten – mit 15% in der aktuellsten Periode sind deutsche Patente in etwa auf dem jeweiligen Level von China und Südkorea, die im Zeitraum 1995-1999 gemeinsam nur auf 3% der Anmeldungen kamen. Die USA können mit 29% einen fast doppelt so hohen Anteil ausweisen, auch Japan, wo mit Panasonic auch der weltgrößte Hersteller seinen Sitz hat, ist mit 23% wesentlich stärker aufgestellt. Während Deutschland also in den direkt auf den Automobilbau bezogenen Technologiefeldern eine Führungsposition einnimmt, ist die Situation bei der Grundlagentechnologie Batterie weniger komfortabel.

Allerdings erscheint es wenig einleuchtend, weswegen ein Zulassungsverbot für Verbrennungsmotoren hier Abhilfe schaffen sollte. Näher liegend wäre vielmehr eine verstärkte Forschungsförderung im Bereich der Grundlagenforschung. Selbst wenn die energieintensive Fertigung von Batterien in Deutschland keine Zukunft haben sollte, ist es aufgrund der zahlreichen Schnittstellen auch für die Fahrzeugentwicklung und den Einkauf im deutschen Automobilsektor wichtig, dass technologische Kompetenz in Bezug auf Batterien in Deutschland verbleibt und ausgebaut wird.

3.3 Innovation bei Verbrauchsreduktion und alternativen Kraftstoffen

Selbst wenn in entwickelten Märkten mit belastbarer Energieinfrastruktur Pkws und leichte Nfz mit Verbrennungsmotoren in absehbarer Zukunft vielleicht verzichtbar sein werden, so gilt das gleiche nicht für viele bevölkerungsreiche Gebiete in der Welt, in denen eine mangelhafte Stromversorgung einen flächendeckenden Umstieg auf Elektrofahrzeuge fürs Erste als nicht plausibel erscheinen lässt. Weltweit wird in den kommenden Jahrzehnten der Verbrennungsmotor weiterhin eine wichtige Rolle im Individualverkehr spielen. Auch im Hinblick auf das Erreichen von Klimazielen ist es daher von Bedeutung, dass der Bestand an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zunehmend effizient mit Treibstoff umgeht.

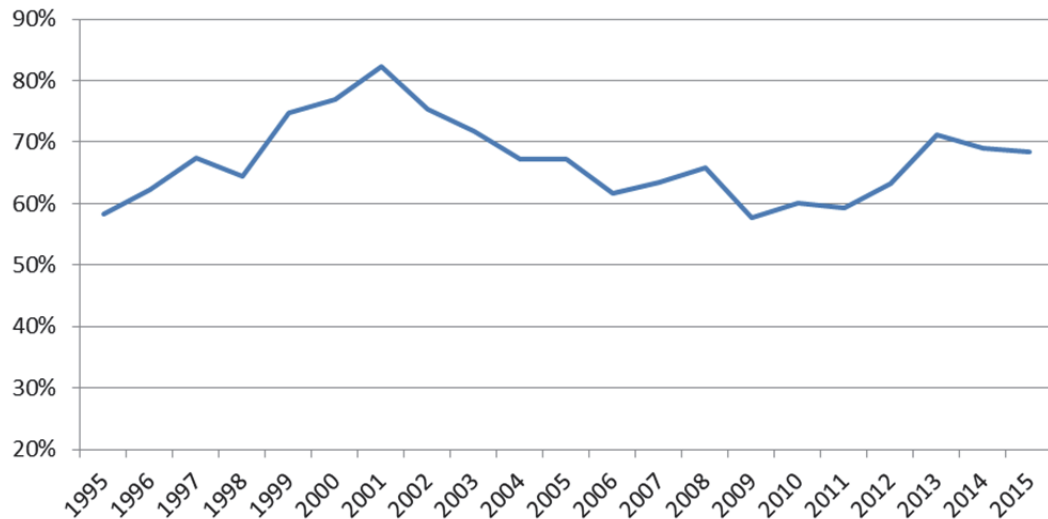
Auch hier leisten Innovation und Forschung einen zentralen Beitrag, wie die Analysen im folgenden Kapitel 4 deutlich machen werden. Anhand der internationalen Patentklassifikation lassen sich im Detail nicht nur diejenigen Codes identifizieren, die sich auf Verbrennungsmotoren beziehen. Man kann darüber hinaus noch feiner unterscheiden, welche Unterkategorien innerhalb dieser Codes solche Erfindungen abdecken, die dazu beitragen, Verbrennungsmotoren effizienter zu machen.

Die *Abbildung 10* stellt den Anteil der verbrauchsreduzierenden Patente an der Gesamtzahl der deutschen Verbrennerpatente im Zeitablauf dar. Im langfristigen Mittel über den Beobachtungszeitraum hinweg lassen sich 69%, also mehr als 2/3, der Verbrennerpatente den verbrauchsreduzierenden Patentkategorien zuordnen. Einhergehend mit der Einführung der EURO 2 (1996/7) und Euro 3-Abgasnormen (2000/2001) erreichte der Anteil der verbrauchssparenden Patentanmeldungen 2001 seinen Höchststand mit mehr als 80% an den Verbrennerpatenten in Deutschland. Die überwiegende Mehrheit der patentfähigen Entwicklungen im Bereich der Verbrennungsmotoren zielen in Deutschland also darauf ab, den Benzin- und Dieserverbrauch der Motoren zu reduzieren.

Von diesen Erfindungen und Erkenntnissen profitieren nicht nur deutsche Fahrzeugbauer. In der Motorenentwicklung ist Kooperation zwischen Herstellern (und Zulieferern) eine gängige Praxis. Zudem haben alle Patente eine befristete Gültigkeit von 20 Jahren und können dann von der Allgemeinheit uneingeschränkt genutzt werden. Da außerdem Patentunterlagen veröffentlicht werden, tragen sie direkt zur Verbreitung der zugrundeliegenden Technologie bei. Zum Teil ermöglichen sie unmittelbar angelehnte Innovationen, die vom Geltungsbereich des ursprünglichen Patents nicht abgedeckt sind. Mit einem Zulassungsverbot für Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotoren (im Gegensatz zur jetzigen Praxis der zunehmend strengeren Abgas- und

damit Verbrauchszielwerte) würde der Anreiz für die deutsche Industrie, weiter in verbrauchsreduzierende Innovationen zu investieren, mit sofortiger Wirkung reduziert.

Abbildung 10: Anteil der verbrauchsreduzierenden Patente an deutschen Verbrennerpatenten



Quelle: Patentscope, ifo Institut

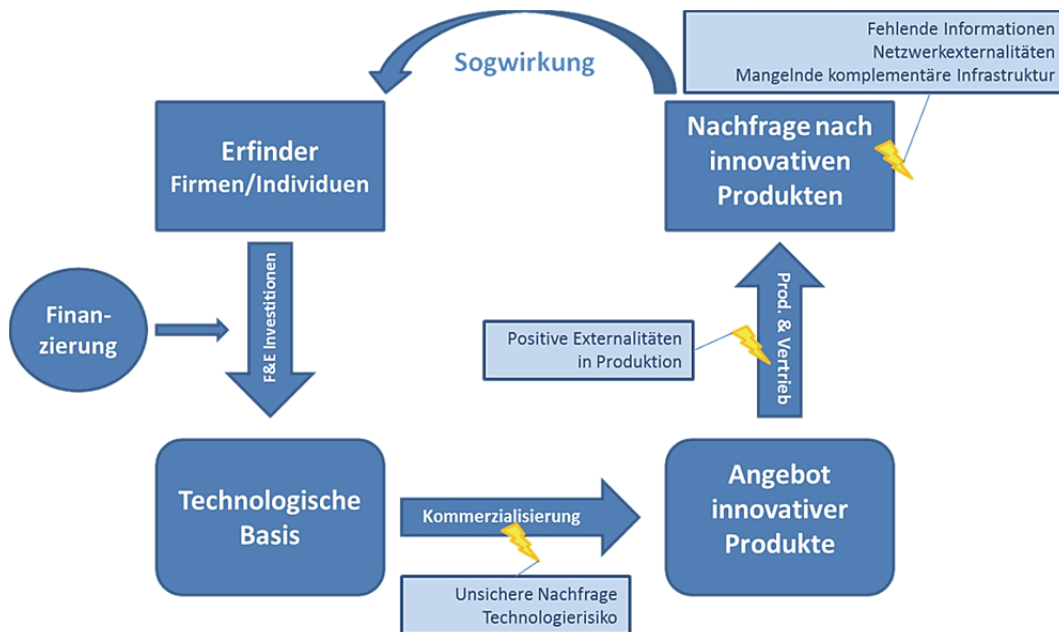
3.4 Warum fassen alternative Antriebe nicht schneller im (deutschen) Markt Fuß?

Gegenwärtig scheint es so gut wie unmöglich, dass das Ziel der Bundesregierung, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektroautos in Deutschland auf den Straßen zu haben, erreicht wird. Um die Ursachen und potentielle Lösungsansätze besser zu verstehen, ist es hilfreich, den gesamten Innovationsprozess zu betrachten. In *Abbildung 11* stellen wir ein vereinfachtes Modell der Innovationsschritte vom Erfinder und seiner Idee bis hin zum finalen Produkt am Markt dar. Die Forschungstätigkeiten von unabhängigen oder angestellten Erfindern generieren die technologische Basis für neue Produkte. Von der Idee bis zum lukrativen Produkt sind – insbesondere bei hochkomplexen Produkten wie Fahrzeugen – erhebliche Investitionen über einen längeren Zeitraum hinweg notwendig. Deswegen spielt die Finanzierung eine wichtige Rolle – im Fall der deutschen Automobilbauer erfolgt diese weitestgehend intern aus dem eigenen Cash-flow, der zum jetzigen Zeitpunkt wesentlich auf Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren beruht.

Die Analysen in den vorigen Abschnitten legen nahe, dass die technologische Basis für alternative Antriebstechnologien in Deutschland im internationalen Vergleich mit am stärksten ausgeprägt ist. Die Erklärungen für die langsame Marktdurchdringung mit

diesen Fahrzeugen sind also in den späteren Stufen des Innovationsprozesses zu suchen – sie sind in der *Abbildung 11* repräsentiert durch die Blitze.

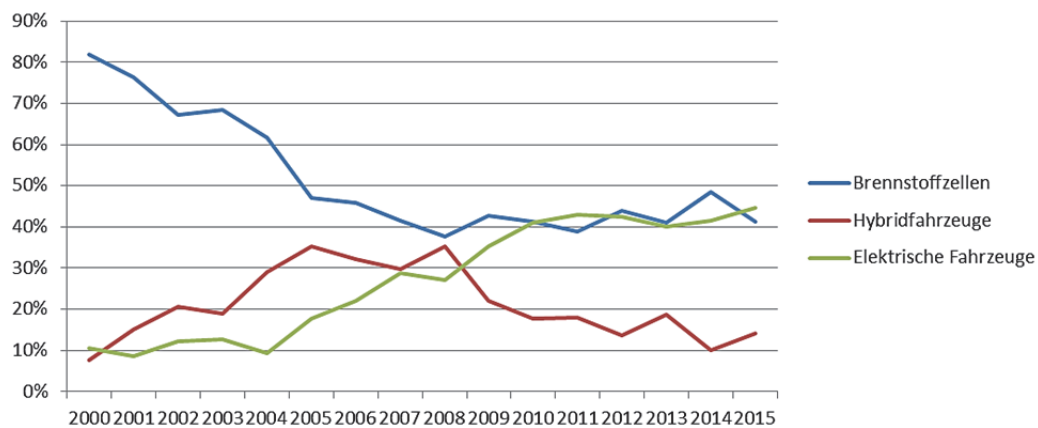
Abbildung 11: Ein Modell des Innovationsprozesses - potentielle Marktversagen bei der Einführung innovativer Produkte



Quelle: ifo Institut

Der nächste Innovationsschritt ist die Kommerzialisierung, also die Entwicklung von marktfähigen neuen Produkten auf der Basis vorliegender Erfindungen und Patente. Ein prinzipielles Risiko an dieser Stelle ist, dass die zukünftige Nachfrage insbesondere nach Elektrofahrzeugen noch schwierig abzuschätzen ist. Erschwert wird dieses Problem durch die Tatsache, dass sich noch keine „eine“ technologische Alternative zum Verbrennungsmotor als dominanter Standard durchgesetzt hat – sowohl für die Hersteller als auch für die Politik besteht also noch das Risiko, auf die falsche Technologie zu setzen. Hinsichtlich Forschung und Entwicklung deuten die Patententwicklungen der deutschen Industrie darauf hin, dass man sich mehrere Möglichkeiten im Raum Elektor-/Hybrid-/Brennstoffzellenfahrzeuge offen hält. Die *Abbildung 12* zeigt für die deutsche Industrie die Anteile der Patente in den Alternativtechnologien über die Zeit für diese drei Produktklassen (die Anteile addieren sich in jedem Jahr zu 100%). Zu beobachten ist eine Bedeutungsverschiebung von Brennstoffzellen, die bis ca. 2005 im Mittelpunkt standen, hin zu Elektroautos. Seit 2008 halten sich die deutschen Patentanmeldungen in diesen beiden Feldern etwa die Waage.

Abbildung 12: Anteile deutscher Patente über alternative Antriebstechnologien



Quelle: Patentscope, ifo Institut

Der darauffolgende Innovationsschritt umfasst die Produktion und den Vertrieb des neuen Produkts. Hier lauert ein Risiko, von dem zuletzt die deutsche Solarindustrie intensiv betroffen war: Industrieweite Lerneffekte in der Produktion sorgen potentiell dafür, dass sich die ersten Produzenten von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben wesentlich höheren Kosten ausgesetzt sehen werden als später Eintretende. Denn gerade für neue Produkte spielen Skalen- und Lerneffekte eine wichtige Rolle (einen Überblick über die grundlegende Literatur zu diesem Thema bietet Lieberman 1987). Hierbei profitieren nicht nur die führenden Unternehmen, sondern auch ihre Wettbewerber, zum Beispiel durch Nachahmung und Austausch von Kenntnissen und teilweise auch von Personalfluktuatation durch Abwerben von erfahrenen Kräften.

Der letzte hemmende Faktor, den unser Modell abbildet, ist die (mangelnde) Nachfrage nach Fahrzeugen mit alternativen Antrieben in Deutschland. Deutsche Verbraucher sind die Flexibilität und Reichweiten von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren gewöhnt. Ein Umdenken hinsichtlich des tatsächlichen Mobilitätsbedarfs und neuer Möglichkeiten, diesen abzudecken, hat erst begonnen. Die mangelnde komplementäre Infrastruktur für Elektrofahrzeuge (es fehlen bislang sowohl ausreichende Ladeinfrastruktur – siehe auch die *Abbildung 4* – als auch ein flächendeckendes Netzwerk an qualifizierten Werkstätten) und mehr noch für Brennstoffzellenfahrzeuge ist zum jetzigen Zeitpunkt ein substantieller Wettbewerbsnachteil.

3.5 Fazit

Die Untersuchung in diesem Kapitel wurde von der These geleitet, dass deutsche Automobilhersteller aufgrund der starken Position bei Verbrennungsmotoren Anstrengungen in alternativen Antriebstechnologien unterlassen. Nach Analyse internationaler Patente für Verbrennungsmotoren, Elektrofahrzeuge, Hybridfahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge lässt sich diese These eindeutig widerlegen. Die deutsche

(Automobil-)Industrie gehört bei den alternativen Antriebstechnologien jeweils zu den führenden internationalen Wettbewerbern. Die Position bei Verbrennungstechnologien ist zwar stark, aber nicht fundamental verschieden im Vergleich zu den anderen Technologien. Hieraus lässt sich direkt ableiten, dass die notwendigen Investitionen – aus dem eigenen Cashflow heraus – getätigt werden: Das technische Fundament ist gelegt. Darüber hinaus ist ein Großteil der deutschen Forschung im Bereich des Verbrennungsmotors auf die Reduktion des Verbrauchs ausgerichtet – im Mittel der vergangenen 20 Jahre waren zwei von drei erteilten deutschen Verbrennerpatente Innovationen zur Reduktion des Benzin- oder Dieserverbrauchs. Deutlich schwächer ist die Position der deutschen Forschung im Vergleich bei der Grundlagentechnologie Batterie und Akkumulator. Hier kann und sollte die Politik im Bereich der Forschungsförderung – gerade auch hinsichtlich der Grundlagenforschung – tätig werden, um Kompetenzen in diesem Feld in Deutschland zu halten und auszubauen. Schließlich gibt es einige nachfrageseitige Faktoren, welche zur langsamen Marktdurchdringung mit alternativen Antriebstechnologien beitragen. Um diese anzugehen, steht der Politik ein Instrumentenkasten nachfrageorientierter Innovationspolitiken zur Verfügung (siehe z.B. Falck und Wiederhold 2013), was ein Zulassungsverbot zusätzlich unverhältnismäßig erscheinen lässt.

4 Umweltauswirkungen

4.1 Methodik und Datengrundlage

Ein Neuzulassungsverbot von Kfz mit Verbrennungsmotoren⁶⁶ wirkt sich über mehrere Kanäle auf die Umwelt aus. Der maßgebliche Effekt einer solchen Politikmaßnahme besteht jedoch in der Reduzierung der Schadstoffemissionen durch einen höheren Anteil von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen am Gesamtfahrzeugbestand als im Falle eines „Business-as-usual“ (BAU) Szenarios. Unter dem BAU-Szenario liegt ein Marktversagen vor, da individuelle Fahrzeugnutzer die Kosten für die Allgemeinheit durch den Ausstoß an Emissionen nicht in ihr Kalkül aufnehmen. Weitere Effekte sind Änderungen im Flächenverbrauch, sowie im Ressourcenverbrauch. Der Fokus dieser Studie liegt auf der Reduktion der Schadstoffemissionen, der Flächen- und Ressourcenverbrauch werden nur qualitativ betrachtet.

Bei den Schadstoffemissionen wiederum liegt das Hauptaugenmerk der quantitativen Analyse auf dem Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂). Die Reduktion der lokal wirkenden Emissionen⁶⁷ findet ebenfalls in einer qualitativen Analyse Berücksichtigung.

Um die CO₂-reduzierende Wirkung eines Zulassungsverbots für Verbrennungsmotoren ab 2030 quantifizieren zu können, werden im Rahmen eines BAU Szenarios und eines Verbotsszenarios Prognosen über die Entwicklung der CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahr 2050 berechnet. Die Differenz der daraus resultierenden Emissionspfade quantifiziert die Wirksamkeit des Neuzulassungsverbots aus klimapolitischer Sicht.

Die Berechnung der CO₂-Emissionen beruht auf folgender Identität:

$$E_t = \sum_i (\text{Fahrz Best}_{it} \cdot \text{jährl Fahr}_{it} \cdot \emptyset \text{ Verbr}_{it} \cdot \text{Emissionsint}_{it}) \quad (1)$$

Die Emissionen im Jahr t setzen sich entsprechend *Gleichung 1* zusammen aus der Anzahl der Fahrzeuge, die in Betrieb sind, der durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung (in km), dem Durchschnittsverbrauch (in Treibstoffmenge pro km) und der Emissionsintensität des jeweiligen Treibstoffs (in t CO₂ pro Treibstoffmengeneinheit). Der Index i bezeichnet die verschiedenen Antriebsarten, für die die Emissionen jeweils

⁶⁶ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit steht im Folgenden der Begriff „Neuzulassungsverbot“ für das Neuzulassungsverbot von Kfz mit Verbrennungsmotoren.

⁶⁷ Zu den lokal wirkenden Bestandteilen von Kfz-Abgasen gehören unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) und Feinstaub.

einzelnen berechnet werden⁶⁸. Die Summe über die Antriebsartenspezifischen CO₂-Emissionen zu einem bestimmten Zeitpunkt ergibt die Gesamtemissionen in dem jeweiligen Jahr. Die Unterscheidung nach Antriebsarten ist bei der Analyse eines Neuzulassungsverbots entscheidend, da der Wirkungskanal dieser Intervention darin besteht, dass der Anteil an Fahrzeugen mit emissionsärmeren Antrieben (batterieelektrisch, ggf. Wasserstoff) am Gesamtfahrzeugbestand erhöht wird. Unterschieden wird nach den folgenden Antriebstechnologien: Ottomotor (Benzin, Erdgas (CNG), Autogas (LPG)), Dieselmotor, batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Hybridfahrzeuge (Mildhybrid und Plug-In-Hybrid (PHEV)) sowie Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV).

Die antriebsartenspezifischen Emissionen werden nach der Well-to-Wheel (WTW) Methode erfasst. Hierbei werden die Emissionen der gesamten Treibstoffkette berücksichtigt – von der Gewinnung und Bereitstellung eines Treibstoffs bis hin zur Umwandlung in Bewegungsenergie im Fahrzeug.⁶⁹ Diese Betrachtungsweise der Emissionen ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Fahrzeugen mit verschiedenen Antriebstechnologien. Gerade weil bei batterieelektrischen Fahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen die Emissionen ausschließlich in dem Bereich Well-to-Tank (WTT) anfallen und nicht wie bei Verbrennungsfahrzeugen hauptsächlich im Bereich Tank-to-Wheel (TTW). Bei Fahrzeugen mit Ottomotoren beispielsweise liegt der Anteil der WTT-Emissionen bei 15%, da der Großteil der Emissionen beim Verbrennungsvorgang im Fahrzeug entsteht und nicht bei der Herstellung und Bereitstellung des Benzins. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen ist die Energieumwandlung im Fahrzeug aus elektrischer Energie in Bewegungsenergie emissionsfrei und alle Emissionen fallen auf der vorherigen Stufe – der Stromerzeugung – an. Eine ausschließliche Betrachtung des Teilsystems TTW wäre daher irreführend bei einer Analyse der Umweltauswirkungen eines Neuzulassungsverbots. Der gegenwärtig deutlich höhere Energieaufwand bei der Produktion batterieelektrischer Fahrzeuge wird in dieser Studie quantitativ nicht berücksichtigt – eine Diskussion zu diesem Thema findet sich in Abschnitt 4.5.

Die Hauptdatengrundlage für die Analyse der Umweltauswirkungen stellt eine Studie zur Entwicklung der Energiemärkte⁷⁰ dar, die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie in Auftrag gegeben wurde. In dieser umfangreichen Studie wurden sowohl der gesamte Stromverbrauch, als auch die Stromproduktion und -übertragung in Deutschland in mehreren partiellen Gleichgewichtsmodellen im Bottom-up-Verfahren dargestellt. Mit diesen Modellen wurde, unter der Annahme einer Fort-

⁶⁸ Die in dieser Studie berücksichtigten Antriebsarten umfassen die nach aktuellem technologischen Kenntnisstand sowohl für die Gegenwart als auch für die Zukunft wichtigsten Antriebsarten: Benzin, Diesel, LPG, CNG, Batterie, Hybrid Benzin, Plug-In-Hybrid Benzin und Brennstoffzellen.

⁶⁹ Vgl. FIS (2016).

⁷⁰ Vgl. Prognos, EWI, GWS (2014).

schreibung der gesellschaftlichen, politischen und technologischen Rahmenbedingungen⁷¹, eine Referenzprognose bis zum Jahr 2030 erstellt. Ab 2030 bis 2050 schließt sich das sogenannte Trendszenario an die Referenzprognose an. In diesem werden die gesellschaftlichen, politischen und technologischen Trends aus der Referenzprognose fortgeschrieben. In der vorliegenden Studie dient das Trendszenario als Referenzszenario, da es die aktuell beobachtbaren Anstrengungen der verschiedenen Akteure fortschreibt und in keinem Bereich einen disruptiven Wandel unterstellt. Von dem Referenzszenario ausgehend werden dann Verbotsszenarien berechnet, die ein Neuzulassungsverbot modellieren. Die Referenzprognose und das Trendszenario der Studie von Prognos, EWI und GWS liefern Daten über den Fahrzeugbestand, Neuzulassungen, die Fahrleistung, sowie über den durchschnittlichen Verbrauch.

Zur Berechnung der Emissionen, die aus dem Stromverbrauch von batterieelektrischen Fahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen entstehen, wird mit Hilfe des EU REGEN Modells⁷² eine Prognose über den deutschen Strommix und dessen Emissionsintensität erstellt. Informationen zu Emissionskoeffizienten der übrigen Energieträger des Verkehrssektors stammen unter anderem von der U.S. Energy Information Administration (EIA)⁷³.

Da sich diese Studie auf ein Neuzulassungsverbot von Verbrennungsmotoren bei Pkw und leichten Nfz bezieht, wird in *Kapitel 4.2* die Emissionsauswirkung eines Neuzulassungsverbots im Segment der Pkw analysiert und in *Kapitel 4.3* die Auswirkungen im Segment der leichten Nfz. Daran anschließend werden die durch das Neuzulassungsverbot erzielten Emissionsreduktionen mit den Klimazielen der Bundesregierung abgeglichen (*Kapitel 4.4*). Abschließend wird kurz auf die Auswirkungen eines größeren Anteils von Nicht-Verbrenner-Fahrzeugen am deutschen Fahrzeugbestand hinsichtlich lokal wirkender Emissionen (*Kapitel 4.5*) und hinsichtlich des Flächen- und Ressourcenverbrauchs (*Kapitel 4.6*) eingegangen.

4.2 Emissionen von Pkw

Die Berechnung der Emissionen setzt sich gemäß *Gleichung 1* zusammen aus der jährlichen Gesamtfahrleistung nach Antriebstechnologie, dem durchschnittlichen Treibstoffverbrauch pro Kilometer (ebenfalls nach Antriebstechnologie) und den spezifischen Emissionen des jeweiligen Treibstoffs.

⁷¹ Für eine ausführlichere Beschreibung der Prognoseannahmen siehe Prognos, EWI, GWS (2014), S. 41.

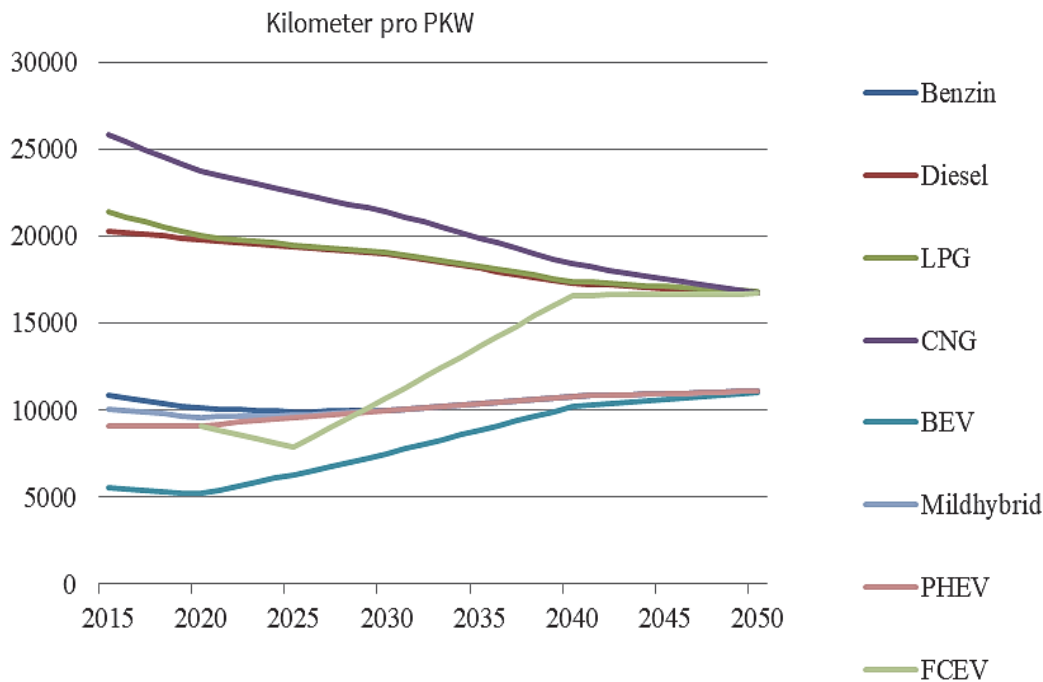
⁷² Blanford et al. (2015).

⁷³ EIA (2016).

4.2.1 Jährliche Gesamtfahrleistung

Die jährliche Gesamtfahrleistung wird berechnet aus der durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung eines Fahrzeugs auf Antriebsartebene und dem deutschen Fahrzeugbestand auf Antriebsartebene.

Abbildung 13: Jahresfahrleistung



Quelle: Prognos, EWI, GWS (2014)

Abbildung 13 zeigt die Entwicklung der jährlichen Fahrleistung nach Antriebstechnologien über den gesamten Prognosezeitraum. Aus dem Verlauf lassen sich drei Trends ablesen, die die Annahmen hinter der Prognose getrieben haben. Erstens, die Vielfahrer legen zukünftig weniger Kilometer mit Autos zurück. Zweitens, die Reichweiten von batterieelektrischen Fahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen nehmen zu, was sowohl auf Fortschritte in der Fahrzeugtechnologie als auch auf einen Ausbau der Lade- bzw. Wasserstofftankstelleninfrastruktur zurückgeführt werden kann. Und drittens nehmen die Autoren der zugrundeliegenden Studie⁷⁴ an, dass sich die Fahrleistungen der verschiedenen Antriebsarten zu zwei Gruppen konsolidieren werden. CNG-, LPG-, Dieselfahrzeuge und FCEV stellen die Fahrzeuge der Wahl für Vielfahrer (mehr als 15.000 km pro Jahr), und Benzin- und Mildhybridfahrzeuge sowie BEV und PHEV werden nachgefragt für einen jährlichen Fahrbedarf von bis zu 11.000 km.

⁷⁴ Prognos, EWI, GWS (2014).

Um auf die jährliche Gesamtfahrleistung nach Antriebsart zu kommen, wird die Fahrleistung pro Pkw mit dem Pkw-Gesamtbestand multipliziert. In diesem Schritt findet auch die Modellierung der Politikmaßnahme des Neuzulassungsverbots statt. Die Analyse teilt sich auf in zwei Arten von Szenarien: das Referenzszenario und zwei alternative Verbotsszenarien (ein Szenario mit einem kompletten Verbrennerverbot und eines, in dem die Zulassung von PHEV erlaubt bleibt). Im Referenzszenario werden die Bestandswerte aus der Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie⁷⁵ übernommen. Die Modellierung des jeweiligen Verbotsszenarios geschieht über eine Anpassung der Zusammensetzung und Entwicklung des Fahrzeugbestands. Diese geschieht über eine Fortschreibung des Bestands von 2030 mit Hilfe angepasster Neuzulassungs- und Außerbetriebsetzungsdaten.

Im kompletten Verbotsszenario werden die Neuzulassungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren entsprechend der Politikmaßnahme auf null gesetzt. Die daraus entstehende Übernachfrage wird auf batterieelektrische Fahrzeuge übertragen, die nicht von dem Verbot betroffen sind. Eine zentrale Annahme ist hierbei, dass die zusätzliche Nachfrage nach BEV, welche sich im Jahr 2031 auf rund 3 Mill. Fahrzeuge belaufen würde (3,3 Mill. Fahrzeuge im Verbotsszenario gegenüber 245.000 Fahrzeugen im Referenzszenario), tatsächlich bedient werden kann. Diese Zahlen unterstreichen die Intensität des Eingriffs. Man muss hierbei berücksichtigen, dass innerhalb der kommenden 13 Jahre nicht nur die physischen Produktionskapazitäten geschaffen werden müssten, sondern auch das notwendige qualifizierte Personal gefunden und ausgebildet werden müsste.

Im Verbotsszenario, in dem PHEV erlaubt bleiben, werden hingegen bei der Aufteilung die Antriebsartencluster, die sich aus *Abbildung 13* ergeben, zugrunde gelegt.

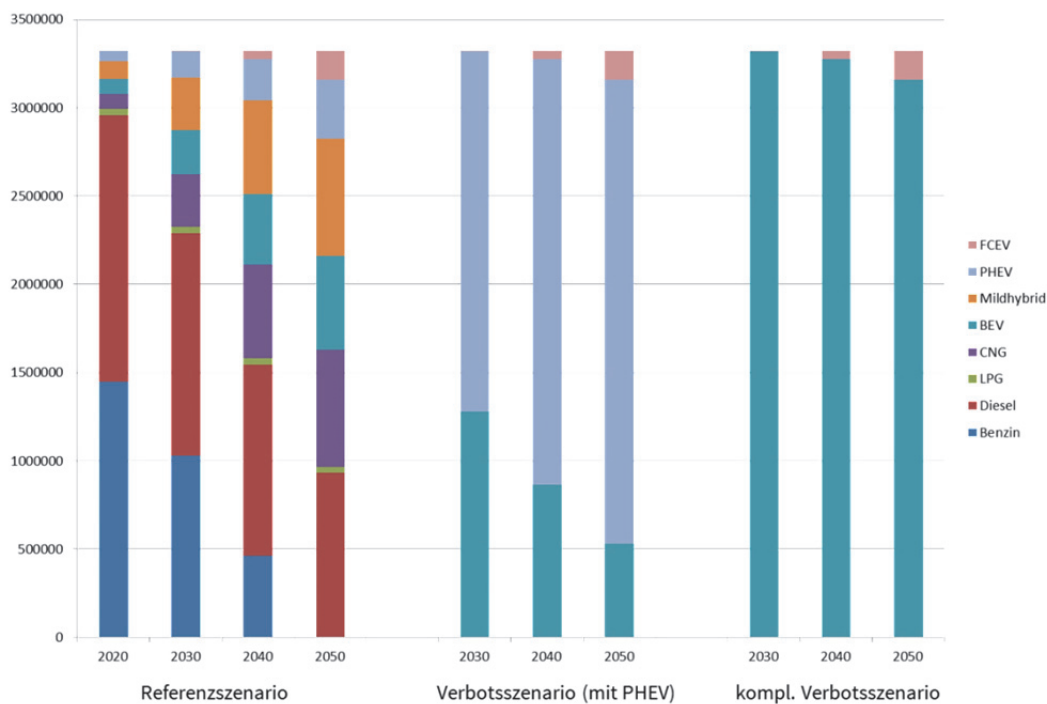
Das heißt, die Nachfrage nach Diesel-, LPG- und CNG-Fahrzeugen wird den PHEV zugeschrieben und die Übernachfrage, die durch den Wegfall von Benzinfahrzeugen und Mildhybridfahrzeugen entsteht, wird den BEV zugeschrieben. Hinter dieser Vorgehensweise steckt die Annahme, dass sich durch das Neuzulassungsverbot das Fahrverhalten hinsichtlich der Jahresfahrleistung nicht ändert gegenüber dem Referenzszenario. Hinsichtlich der Außerbetriebsetzungen nach Antriebsart wählen wir die jährliche Ersatzrate so, dass der Gesamtfahrzeugbestand und die Gesamtfahrleistung in den Jahren 2040 und 2050 ca. denjenigen im Referenzszenario entsprechen. In einer Robustheitsanalyse im Anhang legen wir stattdessen die Durchschnittslebensdauer von Pkw bei der Ersatzrate zugrunde, was zu einem langsameren Ausscheiden von Verbrennern und einem wesentlich höheren Gesamtfahrzeugbestand führt.⁷⁶ *Abbil-*

⁷⁵ Vgl. Prognos, EWI, GWS (2014).

⁷⁶ Die Daten hierzu stammen vom Kraftfahrtbundesamt (vgl. KBA (2017)).

Abbildung 14 illustriert die sich ergebende Entwicklung der Neuzulassungen. Die Kombination aus dem Saldo von Neuzulassungen und Außerbetriebsetzungen und dem Vorjahresbestand ergibt den antriebsartspezifischen Bestand des aktuellen Jahres (siehe Anhang *Abbildung 17* für eine grafische Darstellung der Bestandsentwicklungen in den jeweiligen Szenarien).

Abbildung 14: Entwicklung der PKW-Neuzulassungen im Referenz- und in den Verbots-szenarien



Quelle: Prognos, EWI, GWS (2014), ifo Berechnungen

4.2.2 Treibstoffverbrauch

Der Treibstoffverbrauch unterscheidet sich nicht zwischen den Szenarien und wird übernommen aus der Referenzprognose und dem Trendszenario der Studie, die im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie durchgeführt wurde⁷⁷. Die hier getroffenen Vorhersagen über den zukünftigen Treibstoffverbrauch implizieren bei allen Antriebsarten das Potenzial für Effizienzsteigerungen über den gesamten Prognosezeitraum hinweg⁷⁸. Nach dieser Prognose weisen Ottomotoren das größte Potenzial für weiteren technologischen Fortschritt hinsichtlich der Treibstoffeffizienz auf. Im Vergleich zu 2017 erzielen sie im Jahr 2050 33-35% niedrigere Verbrauchswerte. Dieselmotoren erreichen im selben Zeitraum eine Verbrauchsreduktion von 30%.

⁷⁷ Vgl. Prognos, EWI, GWS (2014).

⁷⁸ Siehe Anhang *Tabelle 13* für eine Übersicht der Verbrauchsentwicklungen nach Antriebsart.

Die alternativen Antriebe⁷⁹ realisieren eine Effizienzsteigerung von 20%. Treiber dieser weiteren Effizienzsteigerung sind laut den Autoren der Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie u.a. die Optimierung des Motormanagements und der Getriebeauslegung, Gewichtseinsparungen, eine verbesserte Aerodynamik, sowie GPS-gestützte Fahrassistenzsysteme. Ein gegenläufiger Effekt ist das weiter anhaltende Wachstum des Anteils schwererer Fahrzeugkategorien am Gesamtbestand.

4.2.3 Spezifische Emissionen

Die treibstoffspezifischen CO₂-Emissionen der auf Kohlenstoff basierten Treibstoffe (Benzin, Diesel, CNG und LPG) lassen sich direkt aus dem Verbrauch und einem Emissionskoeffizienten ableiten. Dieser Koeffizient beläuft sich für Benzin (Diesel) auf 2,75 (3,18) kg CO₂ pro Liter und für LPG (CNG) auf 3,44 (3,07) kg CO₂ pro kg.⁸⁰ Legt man diese Werte zugrunde, emittiert ein Benzinfahrzeug im Jahr 2017 durchschnittlich 19,17 kg CO₂ auf 100 Kilometern. Ein durchschnittlicher PKW mit Dieselantrieb 18,76 kg, ein PKW mit LPG-Antrieb 15,48 kg und ein CNG-Fahrzeug 13,91 kg. Der Mildhybrid mit Benzinantrieb reiht sich in dieser Rangfolge mit 14,38 kg CO₂ pro 100 km zwischen dem LPG- und CNG-Fahrzeug ein. Bei der Berechnung der WTW Emissionskoeffizienten alternativer Antriebsarten muss der deutsche Strommix berücksichtigt werden, da die Fahrzeuge mit alternativen Antrieben entweder direkt mit Strom betankt werden (BEV und PHEV) oder indirekt von der Stromproduktion abhängig sind, wie im Falle der FCEV. FCEV nutzen im Fahrzeug mitgeführten Wasserstoff, um Strom zu erzeugen und damit einen Elektromotor anzutreiben. Die derzeit am weitesten verbreiteten Methoden zur Wasserstoffherstellung sind die Dampfreformierung und das Power-to-Gas Verfahren. In dieser Studie wird das Power-to-Gas Verfahren durch Elektrolyse von Wasser als das für die nahe und mittlere Zukunft relevante Verfahren unterstellt. Denn das Power-to-Gas Verfahren bietet im Gegensatz zur Dampfreformierung die Möglichkeit der CO₂-Neutralität, wenn der Strom, der zur Elektrolyse notwendig ist, aus regenerativer Energie stammt. Darüber hinaus ist Power-to-Gas auch als Energiespeicher in der Diskussion, wenn es darum geht, die Strom-Überproduktion aus Solar- und Windkraft sinnvoll zu nutzen. Die Dampfreformierung wird derzeit im großen Stil hauptsächlich mit Erdgas als Rohstoff betrieben. Im Rahmen der Aufspaltung wird jedoch die gleiche Menge an CO₂ emittiert wie beim Verbrennen von Erdgas. Die Dampfreformierung kann nur dann CO₂-Neutralität gewährleisten, wenn entweder Kohlenstoffabscheidung und -speicherung zur Verfügung stehen oder Biomasse an-

⁷⁹ BEV, PHEV mit Benzinantrieb und FCEV.

⁸⁰ Bei diesen Koeffizienten handelt es sich um WTW Emissionen. Die TTW Emissionskoeffizienten betragen: 2,35 kg CO₂/l (Benzin), 2,68 kg CO₂/l (Diesel), 3,07 kg CO₂/kg (Flüssiggas), 2,44 kg CO₂/kg (Erdgas) Diese Daten stammen von der U.S. Energy Information Administration (EIA, 2016). Die WTT Emissionskoeffizienten wurden den Studien vom Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER, 2009) und von Heinze und Butnaru (2012) entnommen.

statt Erdgas als Rohstoff verwendet wird.⁸¹ Da diese beiden Technologien noch nicht im notwendigen Maßstab zur Verfügung stehen, wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass mittelfristig die Elektrolyse das ausschlaggebende Verfahren sein wird.

Die Prognose für die Energieintensität der Wasserstoffproduktion beruht auf Daten des U.S. amerikanischen Department of Energy und einer logarithmischen Trendfortschreibung. Im Jahr 2017 bedarf demnach die Produktion von einem Kilogramm Wasserstoff mit dem Power-to-Gas Verfahren 45,2 kWh elektrischen Strom. Bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 1,4 kg Wasserstoff pro 100 Kilometer ergibt sich ein Stromverbrauch von 63,28 kWh auf 100 km.⁸² Der Stromverbrauch von BEV bzw. PHEV liegt im reinelektrischen Betrieb im Durchschnitt bei ca. 18 kWh pro 100 km.⁸³ Wie bereits erwähnt, entstehen bei den Fahrzeugen mit Elektroantrieb (BEV, PHEV⁸⁴ und FCEV) die CO₂-Emissionen ausschließlich in der Phase WTT, das heißt im Rahmen der Stromproduktion. Zur Berechnung der Emissionsintensität der Stromproduktion wird das europäische Strommarktmodell EU REGEN⁸⁵ verwendet. Das EU REGEN Modell ist ein partielles Gleichgewichtsmodell, welches den europäischen Strommarkt mit seinen Produktions-, Übertragungs- und Nachfragecharakteristika abbildet. Optimiert wird in dem Modell über die Strompreise. Als eine von mehreren Nebenbedingungen muss ein Emissionsziel vorgegeben werden. In der Kalibrierung für diese Studie wurde per Annahme das Emissionsreduktionsziel des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung⁸⁶ von 80% im Vergleich zum Stand von 1990 gewählt. Laut Klimaschutzplan der Bundesregierung wird der Stromsektor im Vergleich zu anderen Industrien eine große Reduktionsverpflichtung erfüllen müssen, da er zum Beispiel relativ zum Wärmesektor bereits recht weit ist in der Umstrukturierung hin zu erneuerbaren Energiequellen. Neben diesen Rahmenbedingungen wird dem EU REGEN Modell die zusätzliche Stromnachfrage aus dem Emissionsprognosemodell übergeben, die sich aus dem Verbrauch der Elektroantriebe ergibt. Dieser positive Nachfrageschock beläuft sich im Jahr 2031 auf ca. 6,3 und im Jahr 2050 auf ca. 53,1 TWh. Zum Vergleich: Das EU REGEN Modell prognostiziert für das Jahr 2031 ohne die zusätzliche Nachfrage durch die

⁸¹ Vgl. IEA (2006).

⁸² Der relativ hohe notwendige Stromeinsatz bei der Wasserstoffgewinnung spiegelt sich in erheblichen CO₂-Emissionen wider: Dies entspricht für den Strommix im Jahr 2017 CO₂-Emissionen von 27,70 kg auf 100 km. Aufgrund der relativ geringen Stückzahlen in den ausgewählten Prognoseszenarien ist der Einfluss dieser Technologie auf die Gesamtemissionen nicht sehr bedeutend.

⁸³ Die Daten stammen von Prognos, EWI, GWS (2014) und aus der Elektroautoliste vom Verkehrsclub Deutschland e.V. (VCD, 2015).

⁸⁴ Im reinelektrischen Betrieb.

⁸⁵ Blanford et al. (2015).

⁸⁶ Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung sieht über alle Sektoren eine Emissionsreduktion von 80-95% Prozent bis 2050 im Vergleich zum Niveau von 1990 vor (vgl. Bundesregierung (2016)).

Elektrofahrzeuge eine Bruttostromerzeugung von 608 und für das Jahr 2050 eine Bruttostromerzeugung von 701 TWh.

Bereits im Jahr 2031 müsste die deutsche Gesamtstromproduktion aufgrund des Zulassungsverbots somit um 1,1% ansteigen. Bis zum Jahr 2050 wächst die zusätzliche Stromanforderung aufgrund des Verbots sogar auf 7,6% der Gesamtstrommenge an. Gleichzeitig das angestrebte Einsparungsziel im Energiesektor zu erreichen erfordert damit zusätzliche Anstrengungen. Daher ist es wichtig, diese zusätzliche Stromnachfrage zu modellieren, um die Auswirkungen abschätzen zu können. Bei Erreichen der angestrebten Emissionsintensität in der Stromerzeugung würde im EU REGEN Modell die zusätzliche Nachfrage durch das Zulassungsverbot zu einem Anstieg des Strompreises (für die Stromnachfrage insgesamt) um ca. 0,5% führen. Auf Basis der angestrebten Emissionsintensität der Stromproduktion werden dann im Emissionsprognosemodell die WTT-Emissionen der Pkw mit Elektroantrieb berechnet. Bei PHEV wird angenommen, dass sie 80% der Strecken elektrisch und nur 20% mit dem Benzinmotor zurücklegen. Diese Annahme beruht auf der durchschnittlichen täglichen Fahrleistung von PHEV. Diese liegt bei ca. 30 km und kann bereits heute mit den meisten PHEV rein elektrisch zurückgelegt werden.⁸⁷ Auf diese Weise ergibt sich für BEV ein CO₂-Ausstoß im Jahr 2017 von 7,88 kg auf 100 km und für PHEV ein Ausstoß von 10,14 kg auf 100 km.

4.2.4 Ergebnisse

Abbildung 15 veranschaulicht das Gesamtergebnis des Emissionsprognosemodells. Sie zeigt die WTW Emissionsverläufe von 2015 bis 2050 für das BAU Szenario, sowie für das Verbotsszenario. Definitionsgemäß weichen die Linien erst ab dem Jahr 2030 voneinander ab, also ab dem Zeitpunkt der Politikintervention, da sich ab diesem Jahr die Zusammensetzung des Fahrzeugbestands hin zu mehr Fahrzeugen mit alternativen Antrieben und damit auch die Emissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland verändern.

Auffällig ist, dass bereits das BAU-Szenario bis 2030 zu 30% Emissionseinsparungen führt im Vergleich zum Jahr 2015 und bis 2050 sogar zu Einsparungen von mehr als 53%. Haupttreiber hinter diesem Emissionsrückgang ist der technologische Fortschritt hinsichtlich der Treibstoffeffizienz (vgl. *Abschnitt 4.2.2*). Im Verbotsszenario beschleunigt sich die Emissionsreduktion ab 2030 gegenüber dem BAU-Szenario. Das Verbotsszenario würde im Jahr 2050 zu einer Emissionsreduktion von rund 80% gegenüber dem Niveau von 2015 führen. Interessanter für die Bewertung eines Neuzulassungsverbots von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ab 2030 sind jedoch die Emissionen, die durch das Neuzulassungsverbot gegenüber dem BAU-

⁸⁷ Vgl. VCD (2015).

Szenario vermieden werden können. In 2050 würden die CO₂-Emissionen durch das Zulassungsverbot auf 22 Mill. t (komplettes Verbot) bzw. 29 Mill. t (PHEV bleiben erlaubt) jährlich sinken. Dies stellt eine Reduktion von 60% im Vergleich zum BAU-Szenario dar, wonach die jährlichen Emissionen von aktuell (2017) 117 Mill. t auf 56 Mill. t in 2050 zurückgehen. Die kumulierten Einsparungen im Prognosezeitraum von 2030 bis 2050 betragen 452 Mill. t CO₂ oder ca. 32% der kumulierten Emissionen im BAU Szenario in diesem Zeitraum. Dies entspricht anders betrachtet mehr als der Hälfte der gesamten deutschen CO₂-Emissionen im Jahr 2016.⁸⁸

Abbildung 15: Entwicklung der CO₂ Emissionen im BAU- und den Verbotsszenarien für PKW

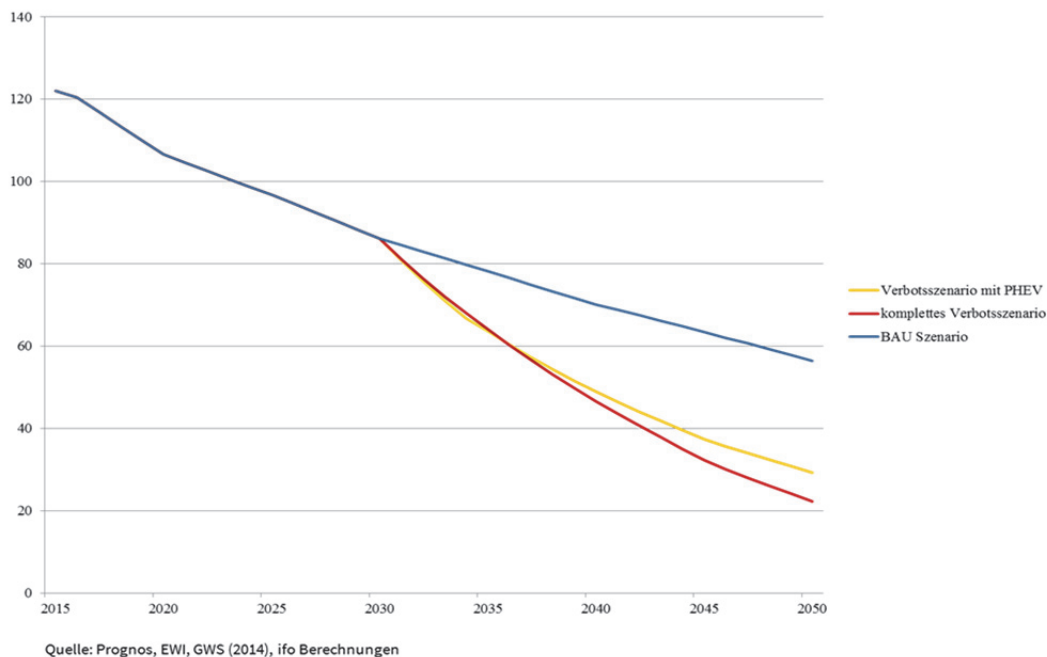


Abbildung 15 beinhaltet zusätzlich zu dem Szenario, in dem ab 2030 nur noch batterieelektrische Fahrzeuge und brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge neu zugelassen werden dürfen, auch das Szenario, in dem PHEV erlaubt bleiben. Es zeigt sich, dass in diesem Verbotsszenario bis ins Jahr 2036 sogar ein schnellerer Rückgang der Emissionen erzielt werden kann. Erst in der Folge fallen die Emissionen im kompletten Verbotsszenario schneller – aufgrund des prognostizierten zunehmenden Anteils von erneuerbaren Energien bei der Stromgewinnung – und erreichen letzten Endes ein um 7 Mill. t niedrigeres finales Niveau im Jahr 2050. Zum Vergleich: 7 Mill. t CO₂ entspre-

⁸⁸ 2016 betragen diese ca. 796 Mio. t (UBA, 2017).

chen ungefähr den jährlichen CO₂-Emissionen von 825.000 Deutschen zum heutigen Stand.⁸⁹

Selbstverständlich hängt die dargestellte Prognose von den zuvor getroffenen und dargestellten Annahmen ab. Im folgenden Abschnitt werden wir im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse für ausgewählte Annahmen darstellen, wie sich die Resultate unterscheiden, wenn man Annahmen verändert.

4.2.5 Sensitivitätsanalysen

In unserer Analyse haben wir die Ersatzrate für Altfahrzeuge so gewählt, dass der Gesamtfahrzeugbestand im Verbotsszenario gegenüber dem Referenzszenario in Zukunft (2040 und 2050) weitestgehend gleich bleibt. Dies setzt aber voraus, dass in jedem Jahr fast 8% des verbleibenden Altfahrzeugbestandes stillgelegt wird. Nimmt man stattdessen die gegenwärtige durchschnittliche Fahrzeuglebensdauer von ca. 18 Jahren⁹⁰ an, prognostiziert das Modell einen erheblichen Anstieg des Gesamtfahrzeugbestandes im Verbotsszenario und daher eine geringere Reduktion der Emissionen. *Abbildung 18* im Anhang zeigt für das komplette Verbotsszenario den jeweiligen Emissionsverlauf mit der höheren und der niedrigeren Ersatzrate. Mit der alternativen niedrigeren Ersatzrate ergeben sich im Jahr 2050 noch Emissionen von ca. 33 Mill. t statt von 22 Mill. t mit der höheren Ersatzrate. Dementsprechend sind auch die Einsparungen im Jahr 2050 mit 40% (statt 60%) deutlich geringer.

Ein weiterer Faktor, der zu berücksichtigen ist, ist die Rolle des technischen Fortschritts bei Verbrennungsmotoren zwischen 2030 und 2050. In den obenstehenden Prognosen wird im Verbotsszenario davon ausgegangen, dass der Durchschnittsverbrauch der Fahrzeuge im Restbestand sich genau so entwickelt wie im Referenzszenario. Wie im vorangegangenen Kapitel behandelt, ist aber zum einen davon auszugehen, dass ein Zulassungsverbot Auswirkungen auf Forschung und Entwicklung hätte – zum anderen kommen ab 2030 keine zusätzlichen (und damit keine effizienteren) Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor auf die Straße. Als zusätzliche Analyse haben wir daher den Durchschnittsverbrauch der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren im Verbotsszenario auf dem Stand von 2030 fixiert. Sowohl im Szenario mit einem kompletten Verbot (24,5 Mill. t im Jahr 2050) als auch unter Ausnahme von PHEV (31,5 Mill. t im Jahr 2050) fallen unter dieser Annahme die jährlichen Emissionen um mehr als 2 Mill. t im Jahr höher aus.

⁸⁹ Diesem Vergleich wurden die durchschnittlichen Kohlendioxidemissionen pro Kopf aus dem Jahr 2013 (Boden et al., 2017) zugrunde gelegt.

⁹⁰ Siehe KBA (2017).

Die letzte Sensitivitätsanalyse betrifft die Annahmen in Hinblick auf das Referenzszenario. In der zugrunde gelegten Studie für das BMWI gehen die Autoren davon aus, dass (effiziente) Dieselfahrzeuge in Zukunft eine wichtige Rolle in der Fahrzeugflotte spielen werden. Als Alternative haben wir noch ein Szenario berechnet, in dem die jährlichen Neuzulassungen für Dieselfahrzeuge um 80% niedriger sind als im Referenzszenario angenommen und stattdessen Fahrzeuge mit Benzinmotoren zugelassen werden. Die Entwicklung des Fahrzeugbestands in diesem Alternativszenario im Vergleich zum Referenzszenario ist in

Abbildung 16 im Anhang dargestellt. Tatsächlich gelangen wir zu den weitestgehend gleichen Ergebnissen, wenn wir dieses Alternativszenario benutzen, da sich die kumulierten Emissionen zwischen diesen beiden Prognosen über den gesamten Betrachtungszeitraum um weniger als 10 Mill. t CO₂ unterscheiden.

4.3 Emissionen leichter Nutzfahrzeuge

Die Modellierung der CO₂-Emissionen leichter Nfz gestaltet sich um einiges schwieriger als im Falle der Pkw, da die Datengrundlage bei weitem nicht so gut ist. Daher stellen die Abschätzungen, die hier für leichte Nfz gemacht werden, nur eine grobe Richtung dar, in die es gehen könnte. Grundsätzlich sind die leichten Nfz ein Sonderfall und dies nicht nur im Vergleich mit den Pkw, sondern auch im Vergleich mit den übrigen Lkw-Klassen. Im Vergleich zu den Pkw ist die Relevanz von Fahrzeuge mit alternativen Antrieben (BEV, FCEV) bei den leichten Nfz im Moment noch deutlich geringer. Bei Pkw liegt der aktuelle Anteil alternativer Antriebe am Gesamtfahrzeugbestand bei 0,3% und bei leichten Nfz bei 0,07%.⁹¹ Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal liegt in den Wachstumsaussichten der beiden Segmente. Während bei Pkw mit mehr oder weniger konstanten Neuzulassungszahlen gerechnet wird (vgl. *Abbildung 13*) ist bei leichten Nfz davon auszugehen, dass die Neuzulassungen von derzeit ca. 220.000 pro Jahr auf ca. 260.000 pro Jahr im Jahr 2040 ansteigen. Dies steht auch im Kontrast zu der Entwicklung der übrigen Lkw-Klassen deren Wachstum ebenfalls eher rückläufig ausfallen wird.⁹² Das prognostizierte Wachstum im Segment der leichten Nfz fußt auf mehreren Annahmen. Zunächst wird angenommen, dass die Nachfrage nach der sogenannten „letzten Meile“, das heißt der Weg vom letzten Distributionslager zum Endkunden, ansteigen wird. Gründe hierfür sind steigende Nachfrage nach Lieferdiensten hinsichtlich Konsumgütern (z.B. Lebensmittel, Pflanzen, Elektronik) evtl. verbunden mit Same Day Delivery, steigende Nachfrage nach häuslichen Dienstleistungen (z.B. Pflege) so-

⁹¹ Zahlen für das Jahr 2015.

⁹² Vgl. Shell (2016)

wie die Möglichkeit von kleinteiligeren Fraktionierungen von Bestellungen.⁹³ Diese Gründe führen vor allem auf den Straßen in urbanen Räumen zu einem Anstieg der leichten Nfz. In ländlicheren Räumen entsteht ein Anstieg vor allem dadurch, dass leichte Nfz vermehrt auch leichte Lkw (3,5-7,5 t) ersetzen.

Zur Berechnung eines Richtwertes hinsichtlich potentieller CO₂-Einsparungen durch ein Neuzulassungsverbot für leichte Nfz wird eine Szenarioanalyse von Shell⁹⁴ herangezogen. Als Referenzszenario wird das sogenannte Trendszenario verwendet, welches ähnlich wie das Referenzszenario im Pkw-Modell aktuelle technologische, gesellschaftliche und politische Trends fortschreibt. Da, wie bereits erwähnt wurde, die Datenverfügbarkeit für leichte Nfz auf Antriebsartebene hinsichtlich Fahrleistungen, Verbrauch und der Entwicklung des Fahrzeugbestands nicht so detailliert zur Verfügung steht, wie dies für Pkw der Fall ist, sollten die folgenden Prognosen nur als Richtwert betrachtet werden. Die methodische Herangehensweise für die Berechnung der Emissionspfade des Referenz- und Verbotsszenarios ist identisch mit der des Pkw-Emissionsmodells.

Die Einsparung durch das Zulassungsverbot fällt relativ gesehen deutlich größer aus als bei den Pkw, absolut gesehen jedoch viel geringer. 2050 beträgt die relative Emissionsreduktion durch die Politikmaßnahme rund 88% gegenüber dem BAU Szenario. Absolut gesehen fällt die Reduktion bei den leichten Nfz in 2050 jedoch deutlich geringer aus als bei den Pkw (8,4 Mill. t CO₂ (leichte Nfz) gegenüber 34,1 Mill. t CO₂ (Pkw)). Dies, wie auch der enorme Unterschied hinsichtlich der absoluten Höhe der Emissionen, liegt natürlich an der unterschiedlichen Größe der beiden Segmente. Im Jahr 2015 betrug der Bestand an leichten Nfz 755 102 Fahrzeuge und der Bestand von Pkw 44,51 Mill. Fahrzeuge. Die entsprechenden WTW Emissionen beliefen sich in den Jahren auf 4,1 Mill. und 122,0 Mill. t CO₂. Kumuliert über den gesamten Prognosezeitraum führt das Neuzulassungsverbot von leichten Nfz mit Verbrennungsmotoren jedoch zu einer Gesamtreduktion von 114 Mill. t CO₂, was im Verhältnis zu den BAU-Emissionen in diesem Zeitraum einen Anteil von 63% darstellt. Im Segment der Pkw beläuft sich der Anteil der kumulierten CO₂-Reduktionen an den kumulierten BAU-Emissionen in den Jahren 2030 bis 2050 mit 452 Mill. t auf 32%. Die hohe Reduktion von CO₂-Emissionen durch ein Neuzulassungsverbot bei leichten Nfz und die durch ein Neuzulassungsverbot induzierte Entwicklung der Neuzulassungen macht deutlich, dass eine solche Politikmaßnahme ein massiver Eingriff wäre. Dies gilt in ähnlicher Form auch für das Segment der Pkw.

⁹³ Vgl. Fraunhofer (2016)

⁹⁴ Shell (2016)

4.4 Zulassungsverbot und Klimaziele

Das Erreichen der Klimaziele würde durch ein Neuzulassungsverbot für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor befördert. Zumindest für das Segment der Pkw würde damit das Klimaziel der Bundesregierung erreicht werden, wenn man das Ziel 80% Reduktion gegenüber dem Niveau von 1990 zugrunde legt.⁹⁵ Die WTW Emissionen von Pkw lagen im Jahr 1990 bei 130 Mill. t CO₂. Nach der Prognose dieser Studie würden die Emissionen im Jahr 2050 im kompletten Verbotsszenario bei 22,2 Mill. t liegen, was 17,1% des 1990er-Niveaus entspricht. Für das Segment der leichten Nfz ist das 80% Reduktionsziel nicht einmal durch ein Neuzulassungsverbot erreichbar, was hauptsächlich daran liegt, dass dieses Segment 1990 bei weitem noch nicht die Bedeutung hatte, die es heute hat und in Zukunft haben wird.

4.5 Lokal wirkende Emissionen

Gegenstand dieser Untersuchung sind in erster Linie die Auswirkungen eines Zulassungsverbots von Verbrennungsmotoren auf die Schadstoffemissionen des motorisierten Individualverkehrs, wobei die Kohlendioxid-Emissionen wegen ihrer Bedeutung für die Klimapolitik im Mittelpunkt des Interesses stehen. Daneben wird ein derartiges Verbot aber auch Auswirkungen auf die Entwicklung der vor allem lokal wirksamen Emissionen wie Feinstaub sowie Emissionen von Stickstoffoxiden, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffen und Schwefeldioxid haben, die hier nur in ihrer Tendenz diskutiert werden sollen.

Generell sind bei einer Substitution von Kraftwagen mit Verbrennungsmotoren durch Elektrofahrzeuge im Betrieb Rückgänge bei den lokal wirkenden Emissionen in ähnlichen Relationen wie bei den CO₂-Emissionen zu erwarten, da die Elektrofahrzeuge im direkten Betrieb völlig emissionsfrei fahren und in Bezug auf die indirekten Emissionen derselbe Strommix für den Kraftwerkspark zugrunde gelegt werden kann wie bei den Szenarien für die CO₂-Emissionen. Die Vorteile der Elektrofahrzeuge in der Nutzungsphase resultieren hier aus der hohen Energieeffizienz des Antriebsstrangs und insbesondere durch den zukünftig steigenden Anteil erneuerbarer Energien in der Strombereitstellung.

Nachteile für Elektrofahrzeuge ergeben sich vor allem bei der Fahrzeugherstellung durch den höheren Energie- und Materialeinsatz im Allgemeinen und den Einsatz bestimmter Materialien in der Batterie im Besonderen. In der Gesamtbetrachtung über den gesamten Lebensweg können Elektrofahrzeuge daher bei einzelnen Kategorien Nachteile gegenüber konventionellen Pkw bzw. leichten Nfz aufweisen. Hierzu gehö-

⁹⁵ Bundesregierung (2016).

ren ressourcenseitig der kumulierte Rohstoffaufwand und Wasserbedarf und umweltseitig die Versauerung und gesundheitliche Belastungen (Feinstaubemissionen, Humantoxizität). Nach einer Studie, die das ifeu -Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH - für das Umweltbundesamt erstellt hat, ist der Nachteil der Elektrofahrzeuge beim Versauerungspotenzial mit 6% relativ gering, wogegen die Feinstaubemissionen über den gesamten Lebensweg etwa 60% höher sind als beim Otto-Pkw.⁹⁶ Mit steigender Energiedichte der Batterien könnten die Nachteile bei der Versauerung sogar in einen Vorteil verwandelt werden. Im Szenario 2030 des ifeu-Instituts liegen die Feinstaubemissionen beim batteriebetriebenen Elektrofahrzeug nur noch um 32 % höher als beim Otto-Pkw. Was die Entstehung von Sommersmog betrifft, so bringen Elektrofahrzeuge ein erhebliches Entlastungspotenzial mit sich.⁹⁷ Nicht zuletzt ist darauf hinzuweisen, dass vor allem die städtischen Ballungsgebiete beim Einsatz von Elektrofahrzeugen erheblich durch die Verminderung der Schadstoffbelastung profitieren können.

4.6 Flächen- und Ressourcenverbrauch

Neben den Auswirkungen des Verbots auf die Luftschadstoffe werden sich auch Veränderungen des Flächenbedarfs und des Ressourcenverbrauchs einstellen, welche im Rahmen dieser Untersuchung jedoch nur qualitativ thematisiert werden können. Beim Flächenbedarf ist an die Beanspruchung von Straßenraum sowie von Park- und Stellplätzen und an die erforderlichen Flächen für Ladestationen zu denken. Die Flächenbeanspruchung im fließenden und stehenden Verkehr hängt davon ab, ob Pkw und leichte Nfz mit Verbrennungsmotoren im Verhältnis 1:1 durch Elektrofahrzeuge substituiert werden oder ob die Verbreitung der Elektromobilität durch weitere personenverkehrsbezogene Innovationen wie Carsharing ergänzt wird. Im ersten Fall wird sich am Flächenbedarf kaum etwas ändern, selbst wenn sich eine Verlagerung zu kleineren Fahrzeugklassen einstellen sollte, da kaum anzunehmen ist, dass die Größe von Park- und Stellplätzen diesen angepasst würde. Lediglich für den fließenden Verkehr könnte sich eine gewisse Entlastung ergeben. Durch eine verstärkte Verbreitung von Carsharing und anderen Modellen des Autoteilens könnten dagegen erhebliche entlastende Effekte auf den Flächenbedarf erreicht werden: Nach einer Untersuchung des Markt- und Sozialforschungsinstitut infas im Auftrag des Bundesverbandes CarSharing e. V. (bcs) vom Herbst 2015 ersetzt ein Carsharing-Fahrzeug in den Innenstädten bis zu 20

⁹⁶ Während die Feinstaubemissionen bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren in erster Linie aus dem Betrieb und zu einem geringeren Teil aus der Kraftstoffbereitstellung resultieren, entstehen sie bei den Elektrofahrzeugen zum weitaus größten Teil bei der Fahrzeugherstellung und daneben auch bei der Stromerzeugung, vgl. Helms et al. (2016).

⁹⁷ Vgl. hier und zu folgendem Helms et al. (2016).

private Pkw.⁹⁸ Die innerstädtische Parkraumsituation könnte sich also erheblich verbessern, wenn eine derart starke Substitution eintreten würde.

Was den Bedarf an Ladestationen betrifft, so beläuft sich der Gesamtbedarf, um das Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 zu erreichen, nach Berechnungen, die das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen des Projektes LADEN2020 durchgeführt haben, auf circa 35.000 öffentliche und halböffentliche Ladepunkte. Nach unserem Verbotsszenario ohne PHEV läge der Bestand an BEV und PHEV im Jahr 2040 bei 23,9 Mill. und im Jahr 2050 bei rund 33,0 Mill. Fahrzeugen und im Verbotsszenario mit PHEV 2040 bei 24,2 Mill. und 2050 bei 34,7 Mill. Fahrzeugen. Das würde, wenn man die Quote von Ladepunkten zu Fahrzeugen von LADEN2020 beibehält, einen Bedarf zwischen 1,15 Mill. und 1,21 Mill. Ladepunkten mit sich bringen. Eine Ladestation z.B. der Firma GÖtthard FASTcharge AG benötigt für zwei Ladeplätze mindestens 28 m² Fläche (2 Parkplätze + Schnellader).⁹⁹ Diese Werte zugrunde gelegt, ergäbe sich in der Summe nach unseren Szenarien ein Flächenbedarf zwischen 16 km² und 17 km².¹⁰⁰ Es könnten allerdings auch verstärkt mobile Ladestationen zum Einsatz kommen. Eine mobile Station z. B. der Firma GP JOULE Connect GmbH & Co. KG für sechs PKW benötigt 10 m² ohne Autos bzw. 50 m² mit sechs Autos.¹⁰¹ Unter der Annahme, dass die Hälfte der Elektrofahrzeuge mobil aufgeladen wird, würde für sie der Flächenbedarf grob gerechnet um die Hälfte sinken und der Flächenbedarf für die gesamte Flotte an Elektrofahrzeugen würde damit zwischen rund 9 km² und rund 13 km² betragen.

Natürlich würde der Flächenbedarf für Elektrofahrzeuge nicht per Saldo zum bisherigen Flächenbedarf für Pkw hinzukommen, da der Flächenbedarf für Pkw mit Verbrennungsmotoren entsprechend sinken würde. Wenn man jedoch davon ausgeht, dass die Stellplätze an den Ladestationen exklusiv für Elektrofahrzeuge reserviert werden, die Elektrofahrzeuge aber auch auf herkömmlichen Stell- und Parkplätzen abgestellt werden können, ist dennoch ein zusätzlicher Flächenbedarf zu erwarten. Nur wenn letzteres verboten würde, könnte der zusätzliche Flächenbedarf per Saldo gegen Null tendieren. Wenn die Stellplätze an den Ladestationen dagegen nur während des Ladevorgangs genutzt werden dürften, wären tatsächlich erhebliche zusätzliche Flächen erforderlich. In der Praxis ist zu erwarten, dass bei einer so großen Anzahl von Ladestationen hierfür Zwischenlösungen gefunden würden. Aber auch dann könnte der Flächenbedarf in der Summe noch steigen.

⁹⁸ Siehe <https://carsharing.de/alles-ueber-carsharing/carsharing-fact-sheets/bcs-studie-mehr-platz-zum-leben-carsharing-staedte>.

⁹⁹ Siehe <http://www.gofastcharge.com/de>.

¹⁰⁰ 16 km² entsprechen der Fläche von 2 240 Fußballfeldern, 17 km² der von 2 380 Fußballfeldern.

¹⁰¹ Siehe <https://www.gp-joule.de/connect/produkte/ladeinfrastruktur/mobile-ladestation>.

Nun zum Ressourcenverbrauch. Nach der ifeu-Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes liegen sowohl aus Ressourcen- als auch aus Umweltschutzsicht die Vorteile von Elektrofahrzeugen vor allem in der Nutzungsphase, während deren Herstellung mehrheitlich mit Nachteilen verbunden ist.¹⁰² Dies wurde anhand einer Ökobilanz ermittelt, die stellvertretend für die Vielfalt der am Markt vertretenen Fahrzeugmodelle für einen Pkw der Kompaktklasse mit verschiedenen elektrischen Antriebskonzepten erstellt wurde. Als ressourcenseitige Nachteile sind der kumulierte Rohstoffaufwand und Wasserbedarf zu nennen. Der größte Beitrag resultiert hierbei aus der Fahrzeugherstellung (insbesondere dem Stahleinsatz), die jedoch beim Elektrofahrzeug mit einem deutlich höheren Materialeinsatz verbunden ist. Wasserentnahme und kumulierter Rohstoffaufwand liegen wegen der Batterie etwa doppelt so hoch wie beim konventionellen Pkw. Mit steigender Energiedichte der Batterien und damit auch mit geringerem Materialeinsatz können die genannten Nachteile zukünftig jedoch deutlich reduziert werden. Im Szenario 2030 des ifeu-Instituts sinkt der Nachteil des batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs bei der Wasserentnahme von 118% auf 68%. Besonders deutlich fällt die erwartete Verbesserung beim kumulierten Rohstoffaufwand aus, bei dem der Nachteil von 91% auf 13% zurückgeht.

Abgesehen davon werden heute in Elektrofahrzeugen zahlreiche Rohstoffe eingesetzt, die in wirtschaftspolitischer Hinsicht, d. h. für den Wirtschaftsstandort Deutschland, als kritisch oder bedingt kritisch einzustufen sind. Dies betrifft vor allem die Batterien, die zum heutigen Stand nicht oder nur unzureichend recycelt werden. Unter den als „kritisch“ eingestuften Materialien in Elektrofahrzeugen, die nicht in konventionellen Fahrzeugen eingesetzt werden, sind vor allem Kobalt und Seltene Erden zu nennen. Als „bedingt kritisch“ werden heute u.a. die Kathodenmaterialien Nickel und Lithium eingestuft. Hier könnte zukünftig ein relevanter Anteil an der globalen Förderung durch die Elektromobilität beansprucht werden (bei Kobalt z.B. 38 % bei 10 Mill. produzierten Fahrzeugen jährlich), so dass dann auch diese Materialien als kritisch eingestuft werden könnten. Die Kritikalität dieser heute noch gar nicht oder nur unzureichend wiedergewonnenen Rohstoffe (weil auch bei als kritisch eingestuften Rohstoffen das Primärmaterial heute billiger als das Sekundärmaterial ist), kann zukünftig durch verstärktes Recycling gemildert werden. Die durch die Elektromobilität entstehenden Engpässe auf der Ressourcenseite dürften dennoch nicht vollständig zu beseitigen sein.

¹⁰² Vgl. hier und zu folgendem Helms et al. (2016).

4.7 Fazit

Der Fokus des Kapitels 4 liegt auf den Auswirkungen eines Neuzulassungsverbots von Kfz mit Verbrennungsmotoren auf die Reduktion der Schadstoffemissionen und hier wiederum insbesondere der Kohlendioxidemissionen. Bereits im „Business-as-usual“ (BAU)-Szenario wird aufgrund des technologischen Fortschritts bei der Treibstoffeffizienz bis 2030 eine CO₂-Reduktion von 30% im Vergleich zum Jahr 2015 erreicht und bis 2050 sogar eine Reduktion von mehr als 53% auf 56 Mill. t. Im Verbotsszenario beschleunigt sich die Emissionsreduktion ab 2030 aufgrund des höheren Anteils von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen am Gesamtfahrzeugbestand. Hier sinken die CO₂-Emissionen aufgrund des kompletten Zulassungsverbots von Verbrennungsmotoren bis 2050 auf 22 Mill. t. Dies führt im Jahr 2050 zu einer Emissionsreduktion von rund 80% gegenüber dem Niveau von 2015, womit für das Segment der Pkw das Reduktionsziel der Bundesregierung erreicht würde. Im Vergleich zum BAU-Szenario liegen die CO₂-Emissionen im Jahr 2050 um rund 60% niedriger. Wenn Plug-In-Hybridfahrzeuge weiterhin erlaubt bleiben, liegen die CO₂-Emissionen in 2050 noch bei 29 Mill. t. Hinsichtlich der Entwicklung der vor allem lokal wirksamen Emissionen wie Feinstaub oder Stickstoffoxiden sind bei einer Substitution von Kraftwagen mit Verbrennungsmotoren durch Elektrofahrzeuge im Betrieb Rückgänge in ähnlicher Größenordnung wie bei den CO₂-Emissionen zu erwarten.

Die Vorteile von Elektrofahrzeugen liegen vor allem in der Nutzungsphase, während die Fahrzeugherstellung mehrheitlich mit Nachteilen verbunden ist, die sich vor allem durch einen höheren Energie- und Materialeinsatz in der Produktion und durch den Einsatz bestimmter Materialien in der Batterie ergeben. Zudem werden in Elektrofahrzeugen zahlreiche Rohstoffe eingesetzt, die in wirtschaftspolitischer Hinsicht, d. h. für den Wirtschaftsstandort Deutschland, als kritisch oder bedingt kritisch einzustufen sind, wie vor allem Kobalt und Seltene Erden. Die durch die Elektromobilität entstehenden Engpässe auf der Ressourcenseite dürften auch durch ein verstärktes Recycling nicht vollständig zu beseitigen sein.

Ein zusätzlicher Flächenbedarf könnte durch die erforderlichen Stellplätze mit Ladestationen entstehen, wenn diese exklusiv für Elektrofahrzeuge reserviert werden und die Elektrofahrzeuge gleichzeitig auch auf herkömmlichen Stell- und Parkplätzen abgestellt werden dürfen. Auch wenn hier Zwischenlösungen gefunden werden sollten, könnte der Flächenbedarf in der Summe noch steigen.

Anhang

Tabelle 3: Produktarten eines Pkw bzw. leichten Nfz

Industriebranche (WZ-2008) / Produktart (GP-2009)	WZ-/GP-Code	Industriebranche (WZ-2008) / Produktart (GP-2009)	WZ-/GP-Code	Industriebranche (WZ-2008) / Produktart (GP-2009)	WZ-/GP-Code
Kokerei und Mineralölverarbeitung		19		Industriebranche (WZ-2008) / Produktart (GP-2009)	WZ-/GP-Code
Motorenbenzin (einschließlich Flugbenzin)	1920 21 000	Mehrphasen-Wechselstrom-Motoren, Leistung > 37-75 kW	2711 24 070	Zündkerzen	2931 21 300
Dieselfkraftstoff für Straßen- und Schienenfahrzeuge	1920 26 005	Andere Mehrphasen-Wechselstrom-Motoren, Leistung > 75-375 kW, ≤ 1000 V	2711 25 401	Magnetzündler, Lichtmagnet- und Schwingungsmagnetzündler	2931 21 500
Gummi- und Kunststoffwarenindustrie	22	Akkumulatorenladegeräte	2711 30 330	Zündverteiler, Zündspulen	2931 21 700
Luftreifen aus Kautschuk, neu, für Personenkraftwagen	2211 11 000	Teile für Elektromotoren, elektrische Generatoren	2720 11 000	Anlasser und Licht-Anlasser	2931 22 300
Luftreifen aus Kautschuk, neu, Tragfähigkeit/kennzahl ≤ 121	2211 13 550	Elektrische Primärelemente und Primärbatterien	2720 12 000	Andere Lichtmaschinen	2931 22 500
Kraftreifen (Treibrifen)	2219 40 300	Teile für Primärelemente und -batterien	2720 13 000	Andere Apparate für Verbrennungsmotoren	2931 22 700
Gummi-Metalleile für Kraftfahrzeuge	2219 73 450	Bleakkumulatoren zum Starten von Kolbenverbrennungsmotoren	2720 21 000	Diebstahlarmanlagen für Kraftfahrzeuge	2931 23 300
Formartikel für Kraftfahrzeuge	2219 73 470	Nickel(-Cadmium-Metallhydrid-Eisen)-, Lithium(-Ionen-Polymer)-Akkus	2720 23 000	Hörsignalgeräte für Kraftfahrzeuge oder Fahräder	2931 23 500
Beschläge für Karosserien und dergleichen aus Kunststoffen	2229 26 109	Teile für elektrische Akkumulatoren (einschl. Separatoren)	2720 24 000	Scheibenwischer, Scheibenwischer und Ähnliches	2931 23 700
Technische Teile aus faserverstärktem Kunststoff für Straßenfahrzeuge	2229 91 603	Innenverspiegelte Scheinwerflampen	2740 11 000	Teile für elektrische Zündapparate und Zündvorrichtungen	2931 30 300
Technische Teile aus anderen Kunststoffen für Straßenfahrzeuge	2229 91 607	Wolframleuchtglühlampen für Kraftäder-, fahrzeuge	2740 12 500	Teile für elektrische Beleuchtungsgeräte und Signalgeräte	2931 30 800
Glas und -waren, Keramik, Steine und Erden	23	Maschinenbau	28	Size für Kraftfahrzeuge	2932 10 000
Einschichten-Sicherheitsglas, vorgespannt, für Fahrzeuge	2312 12 100	Zylinderhülse, Zylinder, Zylindermäntel und Ähnliches	2811 41 001	Sicherheitsgurte	2932 20 300
Rückspiegel für Fahrzeuge, aus Glas	2312 13 500	Stangen, Kolben, Ringe für Kolbenverbrennungsmotoren, Fremdzündung	2811 41 004	Airbags, mit System zum Aufblasen, Teile dafür	2932 20 500
Metallerzeugung und -bearbeitung	24	Vergaser, Einspritzungssysteme	2811 41 007	Andere Karosserieteile, Zubehör für Kraftwagen	2932 20 900
Teile aus Gusseisen mit Kugelgraphit für Straßenfahrzeuge	2451 12 100	Stangen, Kolben, Ringe für Kolbenverbrennungsmotoren, Selbstzündung	2811 42 001	Stoßstangen und Teile für Kraftfahrzeuge	2932 30 100
Teile aus nicht verformbarem Gusseisen für Straßenfahrzeuge	2451 13 100	Einspritzungssysteme für Kraftfahrzeuge, für Kolbenverbrennungsmotoren	2813 11 050	Bremsbeläge, montiert	2932 30 201
Teile aus Stahlguss, für Straßenfahrzeuge	2452 10 100	Ausgabepumpen für Kraftstoffe oder Schmiermittel	2813 11 650	Schalgetriebe für Kraftfahrzeuge	2932 30 330
Teile aus Leichtmetallguss für Straßenfahrzeuge	2453 10 100	Kraftstoff-, Öl-, Kühlmittelpumpen für Kolbenverbrennungsmotoren	2822 13 300	Achsbrieten mit Ausgleichsgerichte für Kraftfahrzeuge	2932 30 361
Teile aus Bunt-Schwermetallguss für Straßenfahrzeuge	2454 10 100	Ortslose Hebeblöhen für Kraftfahrzeugwerkstätten	2825 12 400	Tagelassen und Teile dafür, für Kraftfahrzeuge	2932 30 365
Herstellung von Metallerzeugnissen	25	Klimageräte für Kombi von Personen in Kraftfahrzeugen	2825 14 400	Räder sowie Teile dafür, für Kraftfahrzeuge	2932 30 400
Kaltfließpressele aus Stahl für Straßenfahrzeuge	2550 11 510	Apparate zum Filtern von Gasen, durch katalytische Verfahren	2829 23 001	Aufhängensysteme und Teile davon, für Kraftfahrzeuge	2932 30 500
Geschmiedeteile aus Stahl für Straßenfahrzeuge	2550 12 100	Metallplastische Dichtungen für Kraftfahrzeuge	29	Kühler für Kraftfahrzeuge	2932 30 610
Blechformteile aus Stahl für Straßenfahrzeuge	2550 13 100	Automobilindustrie	2910 11 000	Auspufföpfe, Schalldämpfer, Auspuffrohre für Kfz	2932 30 630
Pulvermetallurgische Erzeugnisse für Straßenfahrzeuge	2550 20 201	Hubkolbenverbrennungsmotoren ≤ 1000 cm ³	2910 12 001	Schaltkupplungen und Teile für Kraftfahrzeuge	2932 30 650
Drehteile aus Metall für Straßenfahrzeuge	2562 10 350	Hubkolbenmotoren mit Fremdzündung > 1000 cm ³	2910 12 005	Lenkrieder, Lenksäulen, Lenkgetriebe für Kraftfahrzeuge	2932 30 670
Schlösser für Kraftfahrzeuge aus unedlen Metallen	2572 11 500	Kolbenverbrennungsmotoren mit Selbstzündung für Kfz	2910 13 000	Bremstoffbehälter für Kraftfahrzeuge	2932 30 902
Scharniere für Kraftfahrzeuge aus unedlen Metallen	2572 14 105	Pkw mit Hubkolbenmotor ≤ 1500 cm ³	2910 21 000	Stabilisatoren für Kraftfahrzeuge	2932 30 904
Andere Beschläge und ähnliche Waren für Kraftfahrzeuge	2572 14 300	Pkw mit Hubkolbenmotor > 1500-2500 cm ³	2910 22 301	Andere Aufhängungen für Kraftfahrzeuge	2932 30 905
Kraftfahrzeuge-Kemzichen aus unedlen Metallen	2599 29 871	Pkw mit Hubkolbenmotor > 2500 cm ³	2910 22 302	Übertragungssteile für Kraftfahrzeuge	2932 30 906
Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse	26	Pkw mit Hubraum ≤ 1500 cm ³	2910 23 100	Autoherzen, für Kraftfahrzeuge	2932 30 908
Rundfunkempfangsgeräte für Kfz, auch kombiniert	2640 12 700	Pkw mit Hubraum > 1500-2000 cm ³	2910 23 303	Andere Teile anderweitig nicht genannt für Kraftfahrzeuge	2932 30 909
Andere Rundfunkempfangsgeräte für Kraftfahrzeuge	2640 12 900	Pkw mit Hubraum > 2000-2500 cm ³	2910 23 305	Montage von kompletten Baussätzen für Kraftwagen	2932 91 001
Geschwindigkeitssensoren für Landfahrzeuge	2651 64 510	Pkw mit Hubraum > 2500 cm ³	2910 23 400	Montage von Baugruppen für Kraftwagen	2932 92 001
Profilände für Kraftfahrzeuge	2651 66 203	Personenkraftwagen mit Elektro- oder anderem Motor	2910 24 000	Montage von Teilen und Zubehör für Kraftfahrzeuge	2932 92 002
Andere optische Instrumente, Apparate, Geräte zum Messen/Prüfen für Kfz	2651 66 303	Lkw mit Kolbenverbrennungsmotor, ≤ 5 t	2920 10 100	Veredelung von Erzeugnissen dieser Gilerabteilung	2999 99 000
Herstellung von elektrischen Ausrüstungen	27	Karosserien für Personenkraftwagen und Wohnmobilen	2920 10 300		
Mehrphasen-Wechselstrom-Motoren, Leistung > 7,5-37 kW	2711 24 050	Zündkabelsätze für Kraftfahrzeuge	2931 10 003		

Quelle: Statistisches Bundesamt (Produktionserhebung im Verarbeitenden Gewerbe), Zusammenstellung des Ifo-Instituts.

Tabelle 4: Wertschöpfungsquoten der für Pkw und leichte Nfz relevanten WZ-4-Steller (2014)

Industrieklasse (WZ-2008)	WZ-Code	Wertschöpfungsquote ^{a)} in %
Kokerei und Mineralölverarbeitung	19	26,2
Mineralölverarbeitung	1920	26,2 ^{b)}
Gummi- und Kunststoffwarenindustrie	22	29,9
Herstellung und Runderneuerung von Bereifungen	2211	28,1
Herstellung von sonstigen Gummiwaren	2219	32,8
Herstellung von sonstigen Kunststoffwaren	2229	32,7
Glas und -waren, Keramik, Steine und Erden	23	32,3
Veredlung und Bearbeitung von Flachglas	2312	30,5
Metallerzeugung und -bearbeitung	24	19,1
Eisgießereien	2451	34,1
Stahlgießereien	2452	37,0
Leichtmetallgießereien	2453	34,8
Buntmetallgießereien	2454	21,8
Herstellung von Metallerzeugnissen	25	37,2
H.v. Schmiede-, Press-, Zieh-, Stanzteilen und Ähnliches	2550	33,2
Mechanik anderweitig nicht genannt	2562	42,9
H.v. Schlössern u. Beschlägen aus unedlen Metallen	2572	37,5
H.v. sonstigen Metallwaren anderweitig nicht genannt	2599	36,7
Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse	26	35,8
H.v. Geräten der Unterhaltungselektronik	2640	25,6
H.v. Mess-, Kontroll-, Navigationsinstrumenten und Vorrichtungen	2651	42,1
Herstellung von elektrischen Ausrüstungen	27	34,0
H.v. Elektromotoren, Generatoren, Transformatoren	2711	28,0
Herstellung von Batterien und Akkumulatoren	2720	14,2
Herstellung von elektrischen Lampen und Leuchten	2740	32,5
Maschinenbau	28	32,9
H.v. Verbrennungsmotoren und Turbinen	2811	25,7
H.v. Pumpen und Kompressoren anderweitig nicht genannt	2813	32,8
Herstellung von Hebezeugen und Fördermitteln	2822	33,2
H.v. kälte- und lufttechnischen Erzeugnissen	2825	32,4
H.v. sonstigen nicht WZ-spezifischen Maschinen	2829	36,9
Automobilindustrie	29	21,6
Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenmotoren	2910	20,2
Herstellung von Karosserien, Aufbauten und Anhängern	2920	22,0
H.v. elektrischen und elektronischen Ausrüstungen für Kraftwagen	2931	24,1
H.v. sonstigen Teilen und sonstigem Zubehör für Kraftwagen	2932	28,1
Veredlung von Erzeugnissen dieser Güterabteilung	2999	21,6 ^{b)}

Unternehmen mit 20 und mehr Beschäftigten. - a) Anteil der Bruttowerschöpfung am Bruttoproduktionswert. -

b) Aufgrund fehlender Angaben wurde die Wertschöpfungsquote des übergeordneten WZ-2-Stellers unterstellt.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Kostenstrukturerhebung im Verarbeitenden Gewerbe), ifo Institut.

Tabelle 5: Beschäftigungsquoten der für Pkw und leichte Nfz relevanten WZ-4-Steller (2015)

Industrieklasse (WZ-2008)	WZ-Code	Beschäftigungsquoten	
		Beschäftigte je 1 Mill. € Produktionswert	Beschäftigte je 1 Mill. € Bruttowertschöpfung
Kokerei und Mineralölverarbeitung	19	0,7	2,9
Mineralölverarbeitung	1920	0,7	2,8
Gummi- und Kunststoffwarenindustrie	22	5,8	19,5
Herstellung und Runderneuerung von Bereifungen	2211	5,5	19,7
Herstellung von sonstigen Gummiwaren	2219	6,5	19,7
Herstellung von sonstigen Kunststoffwaren	2229	7,6	23,3
Glas und -waren, Keramik, Steine und Erden	23	5,9	18,3
Veredlung und Bearbeitung von Flachglas	2312	7,8	25,4
Metallerzeugung und -bearbeitung	24	3,1	16,2
Eisgießereien	2451	5,9	17,2
Stahlgießereien	2452	7,6	20,5
Leichtmetallgießereien	2453	5,5	15,8
Buntmetallgießereien	2454	9,2	42,4
Herstellung von Metallerzeugnissen	25	6,7	18,0
H.v. Schmiede-, Press-, Zieh-, Stanzteilen und Ähnliches	2550	5,8	17,5
Mechanik anderweitig nicht genannt	2562	8,2	19,1
H.v. Schlössern u. Beschlagen aus unedlen Metallen	2572	6,1	16,4
H.v. sonstigen Metallwaren anderweitig nicht genannt	2599	5,8	15,7
Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse	26	5,3	14,7
H.v. Geräten der Unterhaltungselektronik	2640	4,8	18,8
H.v. Mess-, Kontroll-, Navigationsinstrumenten und Vorrichtungen	2651	5,6	13,3
Herstellung von elektrischen Ausrüstungen	27	5,8	17,1
H.v. Elektromotoren, Generatoren, Transformatoren	2711	5,9	21,1
Herstellung von Batterien und Akkumulatoren	2720	3,9	27,8
Herstellung von elektrischen Lampen und Leuchten	2740	5,3	16,2
Maschinenbau	28	5,3	16,0
H.v. Verbrennungsmotoren und Turbinen	2811	4,8	18,5
H.v. Pumpen und Kompressoren anderweitig nicht genannt	2813	4,9	14,9
Herstellung von Hebezeugen und Fördermitteln	2822	5,0	15,1
H.v. kälte- und lufttechnischen Erzeugnissen	2825	5,0	15,4
H.v. sonstigen nicht WZ-spezifischen Maschinen	2829	6,2	16,8
Automobilindustrie	29	2,9	13,5
Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenmotoren	2910	2,5	12,4
Herstellung von Karosserien, Aufbauten und Anhängern	2920	4,2	19,1
H.v. elektrischen und elektronischen Ausrüstungen für Kraftwagen	2931	5,2	21,7
H.v. sonstigen Teilen und sonstigem Zubehör für Kraftwagen	2932	3,6	12,7
Veredlung von Erzeugnissen dieser Güterabteilung	2999	2,9 ^{a)}	13,5 ^{a)}

Betriebe mit 20 und mehr Beschäftigten. - a) Aufgrund fehlender Angaben wurde die Beschäftigungsquote des übergeordneten WZ-2-Stellers unterstellt.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Produktionserhebung, Jahresbericht und Kostenstrukturerhebung im Verarbeitenden Gewerbe), ifo Institut.

Tabelle 6: Exportquoten der für Pkw und leichte Nfz relevanten WZ-4-Steller (2015)

Industrieklasse (WZ-2008)	WZ-Code	Exportquote ^{a)} in %
Kokerei und Mineralölverarbeitung	19	9,6
Mineralölverarbeitung	1920	9,6 ^{b)}
Gummi- und Kunststoffwarenindustrie	22	37,7
Herstellung und Runderneuerung von Bereifungen	2211	35,5
Herstellung von sonstigen Gummiwaren	2219	43,8
Herstellung von sonstigen Kunststoffwaren	2229	33,2
Glas und -waren, Keramik, Steine und Erden	23	25,6
Veredlung und Bearbeitung von Flachglas	2312	32,6
Metallerzeugung und -bearbeitung	24	41,4
Eisengießereien	2451	38,1
Stahlgießereien	2452	38,6
Leichtmetallgießereien	2453	23,5
Buntmetallgießereien	2454	36,2
Herstellung von Metallserzeugnissen	25	30,8
H.v. Schmiede-, Press-, Zieh-, Stanzteilen und Ähnliches	2550	32,3
Mechanik anderweitig nicht genannt	2562	18,1
H.v. Schlössern u. Beschlägen aus unedlen Metallen	2572	42,0
H.v. sonstigen Metallwaren anderweitig nicht genannt	2599	29,3
Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse	26	59,4
H.v. Geräten der Unterhaltungselektronik	2640	38,5
H.v. Mess-, Kontroll-, Navigationsinstrumenten und Vorrichtungen	2651	57,3
Herstellung von elektrischen Ausrüstungen	27	50,4
H.v. Elektromotoren, Generatoren, Transformatoren	2711	52,7
Herstellung von Batterien und Akkumulatoren	2720	45,0
Herstellung von elektrischen Lampen und Leuchten	2740	46,0
Maschinenbau	28	59,9
H.v. Verbrennungsmotoren und Turbinen	2811	65,3
H.v. Pumpen und Kompressoren anderweitig nicht genannt	2813	60,5
Herstellung von Hebezeugen und Fördermitteln	2822	55,0
H.v. kälte- und lufttechnischen Erzeugnissen	2825	48,4
H.v. sonstigen nicht WZ-spezifischen Maschinen	2829	62,5
Automobilindustrie	29	64,8
Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenmotoren	2910	71,9
Herstellung von Karosserien, Aufbauten und Anhängern	2920	48,0
H.v. elektrischen und elektronischen Ausrüstungen für Kraftwagen	2931	37,7
H.v. sonstigen Teilen und sonstigem Zubehör für Kraftwagen	2932	38,2
Veredlung von Erzeugnissen dieser Güterabteilung	2999	64,8 ^{b)}
Betriebe mit 20 und mehr Beschäftigten. - a) Anteil Auslandsumsatz am Gesamtumsatz. - b) Aufgrund fehlender Angaben wurde die Exportquote des übergeordneten WZ-2-Stellers unterstellt.		
Quelle: Statistisches Bundesamt (Jahresbericht im Verarbeitenden Gewerbe), ifo Institut.		

Tabelle 7: IPC Codes für die Kategorie Verbrennungsmotoren

IPC (Teil-)Sektion	IPC Code
Brennkraftmaschinen mit innerer Verbrennung mit Verdrängerwirkung; Brennkraftmaschinen allgemein	F02B
Steuern oder Regeln von Brennkraftmaschinen	F02D
Zylinder, Kolben oder Gehäuse für Brennkraftmaschinen; Dichtungsanordnungen in Brennkraftmaschinen	F02F
Zuführen von Brennstoff-Luft-Gemischen oder deren Bestandteilen bei Brennkraftmaschinen allgemein	F02M
Anlassen von Brennkraftmaschinen	F02N
Zündung von Brennkraftmaschinen mit innerer Verbrennung, ausgenommen Kompressionszündung; Prüfen des Zündzeitpunkts bei Brennkraftmaschinen mit Kompressionszündung	F02P
Klassifikation übernommen aus Aghion et al. (2016)	

Tabelle 8: IPC Codes für die Kategorie Verbrauchsreduktion bei Verbrennungsmotoren

IPC (Teil-)Sektion	IPC Code
Brennstoffeinspritzvorrichtungen (diverse Teilsektionen)	F02M39-71
Leerlaufvorrichtungen für Vergaser (diverse Teilsektionen)	F02M3/02-05
Vorrichtungen zum Zuführen von Zusatzluft zum Brennstoff-Luft-Gemisch	F02M23
Vorrichtungen für Brennkraftmaschinen für die Zuführung von brennstofffremden Wirkstoffen oder kleinen Mengen von Zweitbrennstoff zur Verbrennungsluft, zum Hauptbrennstoff oder zum Brennstoff-Luft-Gemisch	F02M25
Elektrische Steuerung oder Regelung der Zufuhr eines brennbaren Gemisches oder seiner Bestandteile	F02D41
Arbeitsverfahren für Brennkraftmaschinen, bei denen nichtbrennbare Stoffe oder Antiklopfmittel zur Verbrennungsluft, zum Brennstoff oder Brennstoff-Luft-Gemisch zugegeben werden, mit anderem Sauerstoff als Luftsauerstoff	F02B47/06

Klassifikation übernommen aus Aghion et al. (2016)

Tabelle 9: IPC Codes für die Kategorie Elektrofahrzeuge

IPC (Teil-)Sektion	IPC Code
Elektrischer Antrieb mit auf dem Fahrzeug bereitgestellter Energie	B60L11
Elektrische Vorrichtungen an elektrisch angetriebenen Fahrzeugen für Sicherheitszwecke; Überwachung von verschiedenen Betriebszuständen, z.B. Geschwindigkeit, Verzögerung, Stromverbrauch	B60L3
Verfahren, Schaltungsanordnungen oder Vorrichtungen zum Steuern oder Regeln des Antriebs von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen, z. B. ihrer Antriebsmotordrehzahl, um eine gewünschte Betriebsgröße zu erreichen; Ausbildung der Steuervorrichtung an elektrisch angetriebenen Fahrzeugen für die Fernbetätigung von einem ortsfesten Platz, von wechselnden Teilen des Fahrzeugs aus oder von wechselnden Fahrzeugen desselben Zugverbandes aus	B60L15
Anordnung oder Einbau von elektrischen Antriebseinheiten	B60K1
Gemeinsame Steuerung oder Regelung von Fahrzeug-Unteraggregaten verschiedenen Typs oder verschiedener Funktion (diverse Teilsektionen)	B60W10/08, 24, 26

Klassifikation übernommen aus Aghion et al. (2016)

Tabelle 10: IPC Codes für die Kategorie Hybridfahrzeuge

IPC (Teil-)Sektion	IPC Code
Anordnung oder Einbau mehrerer unterschiedlicher Antriebsmaschinen zum wechselweisen oder gemeinsamen Antrieb, z.B. Hybrid-Antriebssysteme mit Elektromotoren und Brennkraftmaschinen mit innerer Verbrennung	B60K6
Steuerungs- oder Regelungssysteme besonders ausgebildet für Hybridfahrzeuge	B60W20
Elektrodynamische Bremssysteme für Fahrzeuge allgemein; Dynamoelektrische Bremsung mit Stromrückgewinnung	B60L7/10
Elektrodynamische Bremssysteme für Fahrzeuge allgemein; Bremsung durch Zuführung zurückgewonnener Energie zur Primärmaschine von Fahrzeugen mit maschinengetriebenen Generatoren	B60L7/20

Klassifikation übernommen aus Aghion et al. (2016)

Tabelle 11: IPC Codes für die Kategorie Brennstoffzellenfahrzeuge

IPC (Teil-)Sektion	IPC Code
Gemeinsame Steuerung oder Regelung von Fahrzeug-Unteraggregaten verschiedenen Typs oder verschiedener Funktion einschließlich Steuerung oder Regelung von Brennstoffzellen	B60W 10/28
Elektrischer Antrieb mit auf dem Fahrzeug bereitgestellter Energie unter Verwendung von Energie, die von Primärelementen, Sekundärelementen oder Brennstoffelementen geliefert wird	B60L11/18
Brennstoffelemente; Herstellung derselben	H01M8

Klassifikation übernommen aus Aghion et al. (2016)

Tabelle 12: IPC Codes für die Kategorie Batterien und Akkumulatoren

IPC (Teil-)Sektion	IPC Code
Anordnung oder Einbau mehrerer unterschiedlicher Antriebsmaschinen zum wechselweisen oder gemeinsamen Antrieb, z.B. Hybrid-Antriebssysteme mit Elektromotoren und Brennkraftmaschinen mit innerer Verbrennung, gekennzeichnet durch elektrische Energiespeicher, z.B. Batterien oder Kondensatoren	B60K6/28
Gemeinsame Steuerung oder Regelung von Fahrzeug-Unteraggregaten verschiedenen Typs oder verschiedener Funktion, für elektrische Energie, z.B. Batterien oder Kondensatoren	B60W10/26
Sekundärelemente; Herstellung derselben, Methoden für die Ladung oder Entladung	H01M10/44
Sekundärelemente; Herstellung derselben, Akkumulatoren, die mit den Ladegeräten baulich vereinigt sind	H01M10/46
Elektrolytische Kondensatoren, Gleichrichter, Detektoren, Schaltvorrichtungen, lichtempfindliche oder temperaturempfindliche Bauelemente; Verfahren zu ihrer Herstellung, doppellagige Kondensatoren	H01G9/155
Schaltungsanordnungen für Wechselstromhauptnetze oder Wechselstromverteilungsnetze, Anordnungen zum Lastausgleich in einem Netz durch Energiespeicherung	H02J3/28
Schaltungsanordnungen zum Laden oder Depolarisieren von Batterien oder zum Speisen von Stromverbrauchern durch Batterien	H02J7/00
Systeme zum Speichern elektrischer Energie	H02J15/00

Klassifikation übernommen aus: "IPC Green Inventory - Storage of Electrical Energy", <http://www.wipo.int/classifications/ipc/en/est/>

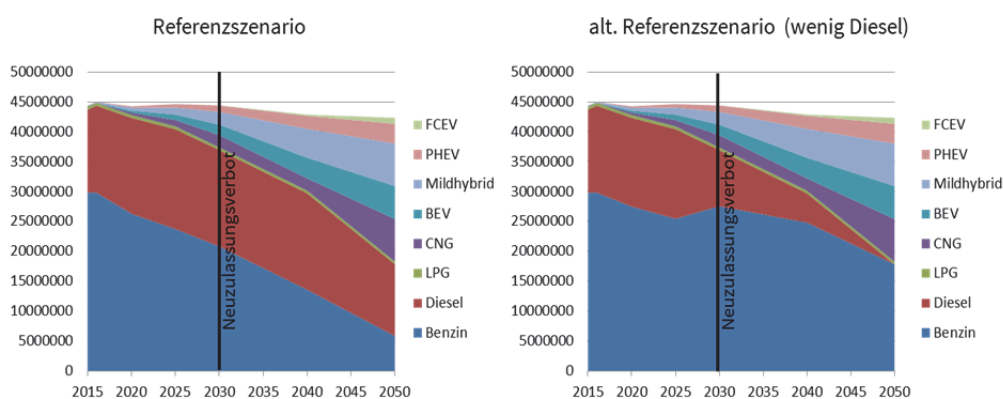
Tabelle 13: Treibstoffverbrauch

Antrieb	2017	2030	2040	2050
Benzin (l/100km)	7.0	5.4	4.8	4.6
Diesel (l/100km)	5.9	4.7	4.3	4.1
LPG (kg/100km)	4.5	3.4	3.1	3.0
CNG (kg/100km)	4.5	3.5	3.2	3.0
BEV (kWh/100km)	17.7	15.0	14.2	14.0
Mildhybrid (l/100km)	5.2	4.0	3.6	3.5
PHEV (kWh/100km)	17.3	14.7	13.9	13.7
FCEV (kg H2/100km)	1.4	1.2	1.2	1.1

Quelle: Prognos, EWI, GWS (2014), ifo Berechnungen

Abbildung 16: Entwicklung des Fahrzeugbestandes im Referenzszenario

Millionen Fahrzeuge zum 1. Januar



Quelle: Prognos, EWI, GWS (2014), ifo Berechnungen

Abbildung 17: Entwicklung des Fahrzeugbestands in den Verbotsszenarien

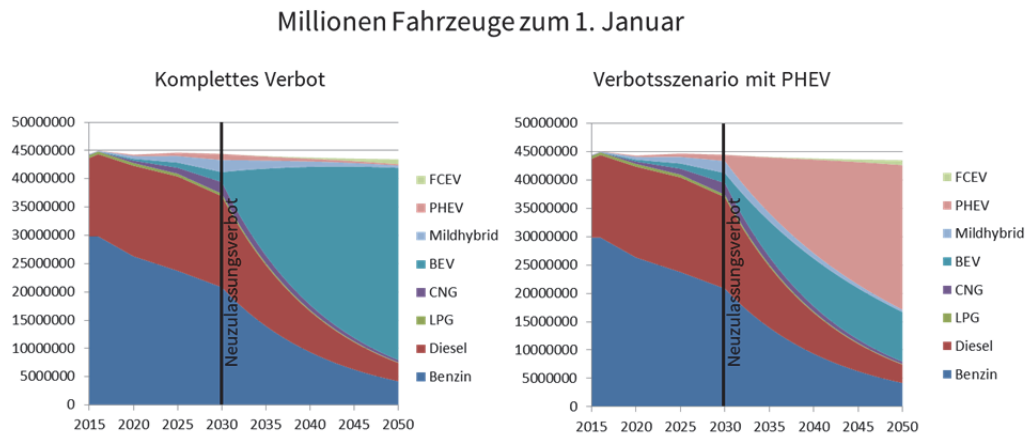
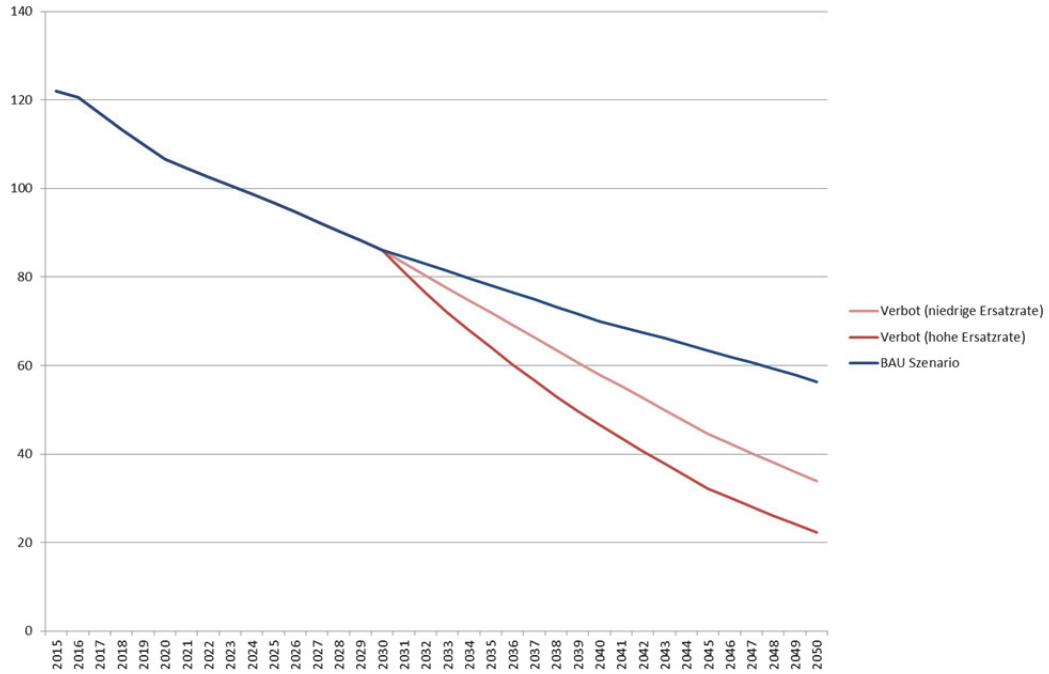


Abbildung 18: Entwicklung der Pkw-CO₂-Emissionen bei verschiedenen Ersatzraten und einem kompletten Zulassungsverbot von Pkw mit Verbrennungsmotoren



Literaturverzeichnis

- Acemoglu, D., Akcigit, U., Hanley, D., und Kerr, W. (2016): Transition to clean technology. *Journal of Political Economy*, 124(1), S. 52-104.
- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., und Hemous, D. (2012): The environment and directed technical change. *The American Economic Review*, 102(1), S. 131-166.
- Aghion, P., Dechezleprêtre, A., Hemous, D., Martin, R., und Van Reenen, J. (2016): Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: Evidence from the auto industry. *Journal of Political Economy*, 124(1), S. 1-51.
- Blanford, Geoffrey, Karen Pittel und Christoph Weissbart (2015), „EU REGEN Model“, Europäisches Elektrizitätsmarktmodell, entwickelt in einem gemeinsam Projekt von ifo und EPRI, www.ifo.de/de/w/QdWi5fTv
- Boden, T.A., G. Marland, and R.J. Andres (2017), „Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions“, Carbon Dioxide Information Analysis Center, DOI 10.3334/CDIAC/00001_V2010
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). (13. Februar 2017). Bekanntmachung Förderrichtlinie Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (12. Juni 2014). Pressemitteilung. Gabriel: Keine Hermesdeckungen mehr für Nuklearanlagen im Ausland.
- Bundesregierung (2016), „Klimaschutzplan 2050“, Von http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf abgerufen am 10.04.2017
- Cordon, W. M. (1970). A Note on Economies of Scale, the Size of the Domestic Market and the Pattern of Trade. *Studies in International Economics*.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. und Karlsruher Institut für Technologie (2016): „LADEN2020 – Konzept zum Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur in Deutschland von heute bis 2020“, Schlussbericht, 15. Dezember 2016.
- EIA (2016), „Carbon Dioxide Emissions Coefficients by Fuel“, U.S. Energy Information Administration, von: https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.cfm abgerufen am 30.03.2017
- European Alternative Fuels Observatory (EAFO). (6. März 2017). Total number of PEV charging positions.

- Falck, O. und Wiederhold, S. (2013): Nachfrageorientierte Innovationspolitik. Studien zum deutschen Innovationssystem Nr. 12-2013.
- FIS (2016), „Well-to-Wheel Betrachtung der Antriebstechnologien“, Forschungs-Informationssystem, Von <http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/332825/> abgerufen am 04.04.2017
- Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ). (29. November 2016). Autohersteller planen gemeinsam Schnellladenetz für E-Autos Von FAZ.net: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/elektroautos-autohersteller-planen-ausbau-von-schnellladenetz-14550448.html> abgerufen
- Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ). (5. Dezember 2016). Weniger Teile, weniger Arbeit, weniger Jobs? Von FAZ.net: <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/auto-verkehr/elektroautos-fordern-hersteller-und-zulieferer-heraus-14547766.html> abgerufen
- Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ). (28. Januar 2017). Bosch denkt über eine Batteriefabrik nach.
- Fraunhofer (2016), „ZF-Zukunftsstudie 2016 – Die letzte Meile“, Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik
- Hall, B.H. (2005): Exploring the Patent Explosion, The Journal of Technology Transfer, Springer, 30(2), S. 35-48.
- Handelsblatt. (7. Februar 2017). Billig-Batterien aus China.
- Handelsblatt. (24. Februar 2017). Transportersparte bekommt Milliardenpritze. Von <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/daimler-transportersparte-bekommt-milliardenspritze/19439588.html> abgerufen
- Hans Böckler Stiftung. (2012). Elektromobilität und Beschäftigung - Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung (ELAB).
- Heinze, Thomas und Butnaru, Claudiu (2012), „Well-to-Wheel- (WTW-) Analysen von Gasfahrzeugen“, Studie für den Deutschen Verband Flüssiggas, Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes
- Helms, Hinrich; Julius Jöhrens; Claudia Kämper; Jürgen Giegrich; Axel Liebich; Regine Vogt; Udo Lambrecht (2016), „Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen“, Umweltbundesamt Texte 27/2016, Dessau-Roßlau, April 2016
- IEA (2006), „Hydrogen Production and Storage – R&D Priorities and Gaps“, International Energy Agency

- IER (2009), „Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität“, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (Endbericht), <http://dx.doi.org/10.18419/opus-1864>
- ifo Institut. (April 2016). Herstellung von Kraftwagenteilen und -zubehör. (B. d. (BVR), Hrsg.) Branchen special.
- Institut für Automobilwirtschaft (IFA). (2012). Auswirkungen der Elektromobilität auf das Servicegeschäft vertragsgebundener Autohäuser.
- Institut für Mittelstandsforschung Bonn. (1. Januar 2016). KMU-Definition. Von <http://www.ifm-bonn.org/definitionen/kmu-definition-des-ifm-bonn/> abgerufen
- KBA (2017), „Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter“ (FZ 15), Kraftfahrtbundesamt (Statistik).
- Krugman, P. (1980). Scale Economies, Product Differentiation, and the Pattern of Trade. *The American Economic Review*, 70(5), S. 950-959.
- Lieberman, M. (1987): The Learning Curve, Diffusion, and Competitive Strategy. *Strategic Management Journal*, 8, S. 441-452.
- Manager Magazin. (5. April 2016). Ranking der umsatzstärksten Autozulieferer 2015. Von [manager magazin online: http://www.manager-magazin.de/fotostrecke/ranking-die-10-weltgroessten-autozulieferer-2015-in-bildern-fotostrecke-136071.html](http://www.manager-magazin.de/fotostrecke/ranking-die-10-weltgroessten-autozulieferer-2015-in-bildern-fotostrecke-136071.html) abgerufen
- Prognos, EWI, GWS (2014), „Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose“, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (Endbericht)
- Shell (2016), „Shell Nutzfahrzeug-Studie – Diesel oder alternative Antriebe – womit fahren LKW und Bus morgen?“
- Statistisches Bundesamt. (7. April 2016). Jahresbericht für Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe. EVAS-Nr. 42271.
- Statistisches Bundesamt. (3. Juni 2016). Kostenstrukturerhebung im Bereich Verarbeitendes Gewerbe, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden. EVAS-Nr. 42251.
- Statistisches Bundesamt. (20. Januar 2017). Index der Erzeugerpreise für gewerbliche Produkte. EVAS-Nr. 61241.
- Statistisches Bundesamt. (16. Januar 2017). Vierteljährliche Produktionserhebung im Verarbeitenden Gewerbe. EVAS-Nr. 42131.

Literaturverzeichnis

Süddeutsche Zeitung (SZ). (27. Februar 2017). China will E-Auto-Gesetz entschärfen. Von <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/elektroautos-china-will-e-auto-gesetz-entschaerfen-1.3396971> abgerufen

Süddeutsche Zeitung (SZ). (10. Februar 2017). Postboten fahren jetzt Elektroauto. Von <http://www.sueddeutsche.de/auto/elektromobilitaet-postboten-fahren-jetzt-elektroauto-1.3371168> abgerufen

UBA (2017), „Emissionssituation Stand März 2017“, Umweltbundesamt, Von <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimabilanz-2016-verkehr-kuehle-witterung-lassen> abgerufen am 12.04.2017

VCD (2015), „Die VCD Elektroauto-Liste“, Verkehrsclub Deutschland e.V.

Wirtschaftswoche (WiWo). (18. September 2011). Siemens steigt aus Atomkraft aus. Von <http://www.wiwo.de/unternehmen/strategiewechsel-siemens-steigt-aus-atomkraft-aus/5217688.html> abgerufen