



# Elektromobilität

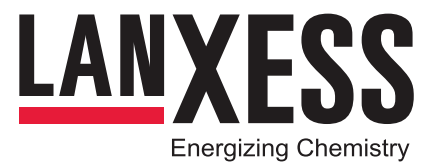
Anforderungen an Reifen, Fahrwerk,

Antrieb und Marktpotenziale

Horst Wildemann



Diese Studie wurde von



mit dem Ziel gesponsert, Innovationstrends, Konzepte  
und Marktpotenziale der Elektromobilität darzustellen.

Horst Wildemann

## **Elektromobilität**

### **Anforderungen an Reifen, Fahrwerk, Antrieb und Marktpotenziale**

Copyright by TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG, 2012

1. Auflage 2012

#### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek erzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie:

Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

**Wildemann, Horst:**

**Elektromobilität**

**Anforderungen an Reifen, Fahrwerk, Antrieb und Marktpotenziale**

1. Auflage

München: TCW Transfer-Centrum, 2012

ISBN: 978-3-941967-46-5

Verlag:

TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG, München

Alle Rechte, auch die der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form, auch nicht zum Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet werden.



## Geleitwort

Elektromobilität stellt die Automobilindustrie mit ihren Zulieferern vor neue Herausforderungen. Die Produkte der Chemieindustrie liefern schon heute einen entscheidenden Beitrag zur langfristigen Umsetzung von E-Mobility-Konzepten. Der strukturelle Wandel des Automobils zum elektrifizierten Fahrzeug wird erst mit Unterstützung der chemischen Industrie ermöglicht. Chemieunternehmen beeinflussen nicht nur die Entwicklung künftiger Elektroautos. Auch konventionelle Antriebstechnologien oder Hybridtechnologien profitieren von Produktinnovationen aus der Chemiebranche. Mit Hilfe unserer innovativen Materialien können leichtere Fahrzeuge konstruiert werden. Auch der Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen kann signifikant gesenkt werden. Dadurch unterstützen wir die Automobilhersteller und tragen zu einer Schonung der Umwelt bei.

Unsere Strategie zur Kundenorientierung und Umweltverbesserung hat uns dazu bewogen, Professor Wildemann vom Forschungsinstitut für Unternehmensführung, Logistik und Produktion der TU München mit einer Studie zu beauftragen, welche die aktuelle Situation der Elektromobilität in Bezug auf Innovationstrends, Mobilitätskonzepte sowie Marktpotenziale untersucht.

Ich bedanke mich bei Professor Wildemann und seinen Mitarbeitern für die umfassenden Ergebnisse sowie die fundierte Ausarbeitung der vorliegenden Studie.

Leverkusen, 30. März 2012

Dr. Axel C. Heitmann



**Dr. Axel C. Heitmann**  
Vorstandsvorsitzender  
der LANXESS AG, Leverkusen



## Vorwort

Die Nachfrage nach effizienteren und umweltfreundlicheren Fahrzeugen sowie striktere CO<sub>2</sub>-Emissionsgrenzwerte verstärken den Handlungsdruck auf Automobilhersteller und Zulieferer. Der Wandel zur Elektromobilität gilt als vielversprechender Lösungsansatz. Der Strukturwandel von konventionellen Antriebskonzepten über hybride Modelle zu vollständig elektrifizierten Konzepten bringt jedoch große Veränderungen mit sich. Die Veränderungen betreffen nicht nur Antriebsstrang und Energiespeicher, sondern auch Fahrwerk und Karosserie sowie Informations- und Kommunikationssysteme. Der Wandel zur E-Mobility stellt völlig neue Anforderungen an die Automobil- und Zulieferindustrie. Intelligente Ladekonzepte und flächendeckende Infrastrukturen müssen entwickelt werden. Dies kann nur in enger Zusammenarbeit mit Energieversorgern geschehen.

Die vorliegende Studie hat den Anspruch sowohl Potenziale, als auch die Barrieren der Elektromobilität darzulegen. Dabei werden verschiedenartige Technologien und Konzepte unter Berücksichtigung des aktuellen Entwicklungsstands in ihrer Wirkungsweise vorgestellt. Die Herausforderungen der Elektromobilität können nicht von einzelnen Unternehmen alleine bewältigt werden. Sie erfordern branchenübergreifende Kooperationen.

München, 30. März 2012

*Horst Wildemann*



**Horst Wildemann**  
Univ.-Prof. Dr. Dr. h. c. mult.

## Der Autor



Horst Wildemann  
Univ.-Prof. Dr. Dr. h. c. mult.  
Technische Universität München  
TCW Transfer-Centrum  
GmbH & Co. KG, München

## Redaktionelle Mitarbeit



Kiryo Abraham  
M.Sc., Dipl.-Betriebswirt  
TCW Transfer-Centrum  
GmbH & Co. KG, München



Axel Brunn  
Dipl.-Kfm.  
TCW Transfer-Centrum  
GmbH & Co. KG, München



Benedikt Grebner  
Dipl.-Wirt.-Ing.  
TCW Transfer-Centrum  
GmbH & Co. KG, München



Jesco Gumprecht  
M.Sc.  
TCW Transfer-Centrum  
GmbH & Co. KG, München



Dominik Jauss  
Dipl. Wirt.-Ing.  
TCW Transfer-Centrum  
GmbH & Co. KG, München



John Liebl  
Dipl.-Kfm.  
TCW Transfer-Centrum  
GmbH & Co. KG, München



Maximilian Offizier  
Dipl.-Wirt.-Ing.  
TCW Transfer-Centrum  
GmbH & Co. KG, München



Martinus Rügen  
Dipl.-Kfm.  
TCW Transfer-Centrum  
GmbH & Co. KG, München



---

## Inhaltsverzeichnis

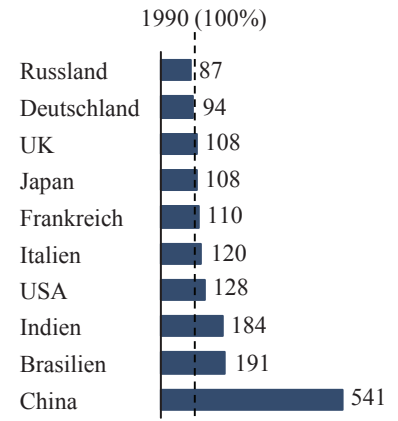
<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>0 Zusammenfassung der Ergebnisse</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Rechtliche Bestimmungen als Enabler der Elektromobilität</b> .....	<b>15</b>
2.1 Hintergrund der Regelung zur Senkung der .....	15
CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	15
2.2 Verordnungen zur Steigerung der Energieeffizienz im Straßenverkehr .....	21
<b>3 Technische Grundlagen und Innovationstrends</b> .....	<b>26</b>
3.1 Antriebsstrang .....	26
3.2 Fahrwerk .....	34
3.3 Energiespeicher .....	38
3.4 Leichtbau .....	48
3.5 Peripherie.....	52
<b>4 Neue Konzepte durch Elektromobilität</b> .....	<b>59</b>
4.1 Innovative Fahrzeugkonzepte.....	59
4.2 Innovative Infrastrukturkonzepte .....	67
4.3 Innovative Mobilitätskonzepte .....	77
4.4 Anforderung an die Reifen der Zukunft .....	83
<b>5 Marktpotenziale</b> .....	<b>85</b>
5.1 Treiber der Elektromobilität .....	85
5.2 Hürden des Markterfolgs von Elektrofahrzeugen .....	92
5.3 Diffusionsgeschwindigkeit .....	96
<b>6 Auswirkung der Markttransformation</b> .....	<b>103</b>
6.1 Automobilindustrie .....	103
6.2 Zulieferer .....	111
6.3 Reifen- und Kautschukindustrie .....	119
<b>7 Potenziale der E-Mobility für die Chemieindustrie</b> .....	<b>122</b>
<b>8 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>129</b>
<b>9 Anhang</b> .....	<b>139</b>



## 0 Zusammenfassung der Ergebnisse

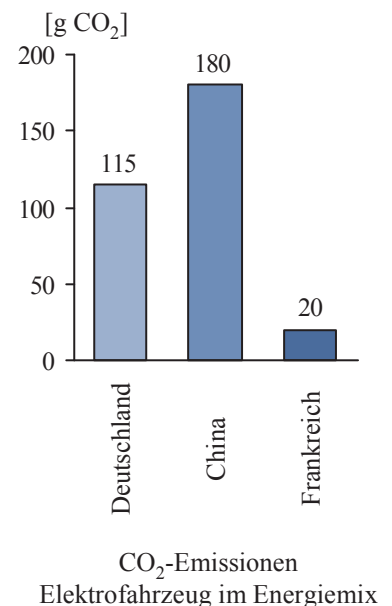
Kein anderes Mobilitätsthema ist Gegenstand so vieler politischer und öffentlicher Debatten wie die Elektromobilität. Das Konzept der E-Mobility ist ein Schlüssel zu 100 % lokal emissionsfreier Fortbewegung und zur nachhaltigen Entkoppelung von Mobilität und fossilen Brennstoffen. Die Notwendigkeit eines Umdenkens hin zu einem nachhaltigen Wirtschaftswachstum und einer langfristigen Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern wurde von allen Industrienationen erfasst und durch eine Vielzahl neuer Verordnungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und zur Steigerung der Energieeffizienz in allen Wirtschaftssektoren vorangetrieben. Die Bundesregierung hat die Potenziale der E-Mobility erkannt und damit begonnen die Weichen für den schrittweisen Übergang zu neuen E-Technologien zu stellen. Deutschland soll zum Leitmarkt für Elektromobilität avancieren und seine Führungsrolle in der F&E sowie in der Automobil- und Zulieferindustrie weiter ausbauen. Als zentrale Grundlage dient der Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität. Sein Ziel ist es, die F&E, die Marktvorbereitung sowie die Markteinführung von Elektrofahrzeugen zu beschleunigen. Auf diese Weise sollen im Jahr 2020 bereits über 1 Mio. Elektroautos auf deutschen Straßen bewegt werden. Neben dieser direkt auf die E-Mobility ausgerichteten politischen Maßnahme kommt eine Vielzahl ergänzender Verordnungen auf europäischer Ebene hinzu, die die Markterschließung der Elektromobilität zusätzlich beschleunigen werden. Zu nennen ist in diesem Kontext vor allem die EG Verordnung 443/2009, die Emissionsgrenzen für neue Personenkraftwagen festlegt. Sie zielt darauf ab, die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Neuwagenflotten auf 120 g/km zu reduzieren. Die Verordnung nennt zur Umsetzung dieser Maßnahmen sowohl Verbesserungsmaßnahmen konventioneller Antriebssysteme als auch „Innovative Technologien“, wie etwa Hybrid- oder Elektroantriebe.

**Die kontinuierlich steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrssektors haben in den Industrienationen ein politisches Umdenken hin zur Energieeffizienz hervorgerufen.**



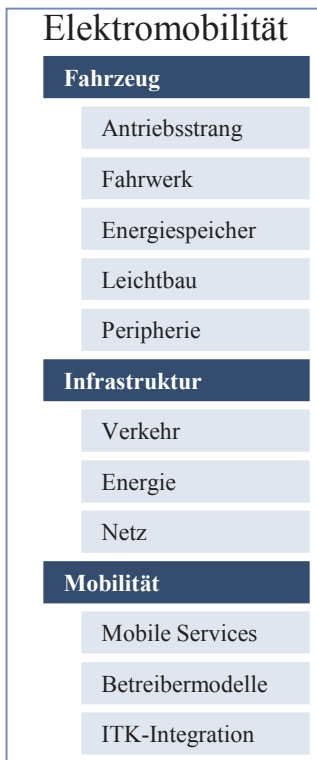
Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs zwischen 1990 und 2011

**Die Ökoeffizienz der E-Mobility steht im direkten Zusammenhang mit dem Energiemix des jeweiligen Landes.**



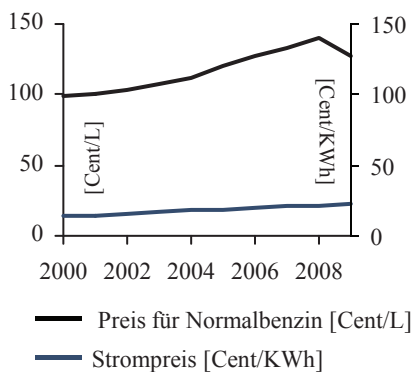
CO<sub>2</sub>-Emissionen Elektrofahrzeug im Energiemix

Um die Chancen der Elektromobilität zu nutzen sind Veränderungen am Fahrzeug, der Infrastruktur und Mobilität nötig.



Das Konzept der E-Mobility umfasst weit mehr als eine reine Elektrifizierung des Antriebsstranges von Fahrzeugen. Das Fahrzeug wird tiefgreifende Änderungen erfahren. Durch neue Materialien und Produktionsprozesse sind Antriebsstrang, Fahrwerk und Peripherie der Fahrzeuge an elektromobile Konzepte anzupassen. Zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs haben Automobilhersteller unterschiedliche Konzepte erarbeitet. Sie reichen von Ansätzen, bei denen ein Elektromotor den Verbrennungsmotor lediglich unterstützt, über vollhybride Antriebskonzepte bis hin zu Fahrzeugen, die ausschließlich mit einem reinen Elektromotor ausgestattet sind. Auch das Fahrwerk wird durch die E-Mobility tiefgreifende Änderungen erfahren. Das Bremssystem wird sich durch die Möglichkeit der Rekuperation mit der Einführung der Elektromobilität den neuen Bedingungen anpassen. Über Induktionsbremsung ist im Zusammenhang mit der E-Mobility sogar eine Einspeisung von Teilen der Bremsenergie in das Bordnetz möglich. Die Energiedichte moderner Akkumulatoren ist immer noch um ein vielfaches geringer als die der klassischen Treibstoffe Benzin und Diesel. Aufgrund der fortschreitenden Batterieforschung, der Computertechnologie zur Steuerung einzelner Batteriezellen sowie den Entwicklungen des Ölpreises und dem zunehmenden Umweltbewusstsein, ist die Ausgangssituation der Akkumulatoren heute jedoch wesentlich besser. Neben der Batterietechnik ist ebenso die Brennstoffzelle bei der Betrachtung der Energiespeicher für die Elektromobilität zu berücksichtigen. Mit der Einführung elektromobiler Fahrzeugkonzepte wird das Fahrzeuggewicht stark zunehmen. Besonders der Energiespeicher Batterie weist aufgrund seiner niedrigeren Energiedichte im Verhältnis zu fossilen Brennstoffen deutliche Gewichtsnachteile auf. Diese senken die Reichweite der Fahrzeuge. Der Leichtbau ermöglicht eine Reduktion der Fahrwiderstände und steigert somit die Reichweite von Elektrofahrzeugen. Zudem wird Informations- und Kommunikationstechnologie zunehmend zum treibenden Faktor. In der passiven und aktiven

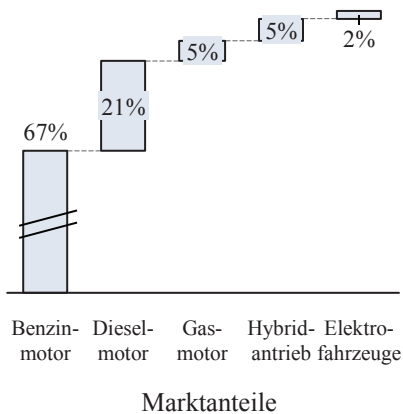
Im Verhältnis zum Strompreis steigt der Kraftstoffpreis überproportional.







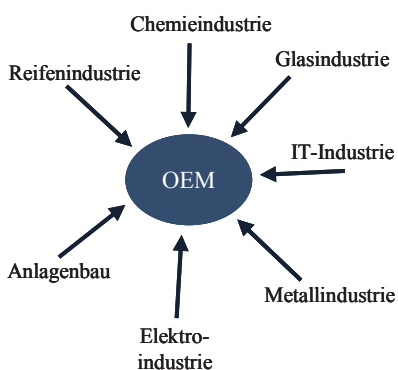
Derzeit wird der Automobilmarkt noch von Verbrennungsmotoren geprägt.



wirtschaftlicher, politischer und kundenseitiger Einflussgrößen ab. Die Komplexität der Prognose dieser Variablen ist die Ursache dafür, dass bestehende Diffusionsszenarien teils erhebliche Streuungen aufweisen. Die Einflussgrößen resultieren aus den Treibern und Hürden der Elektromobilität. Dabei sind die Total Cost of Ownership, politische Regularien, die Strategien der Automobilhersteller und die Akzeptanz der Kunden am Markt als die vier Grundkategorien oder Schlüsselvariablen zu betrachten.

Die Entwicklung hin zu vollständig elektrifizierten Fahrzeugen erfolgt sukzessive und wird weitreichende Veränderungen in der Automobilindustrie zur Folge haben. Diese Entwicklung zieht auch neue Anforderungen an die gesamte Supply Chain nach sich. Die traditionelle Wertschöpfungskette wird sich zu einem Wertschöpfungsnetzwerk weiterentwickeln. Neue Funktionen und Akteure aus ehemals separaten Branchen werden aufeinander treffen. Mittlerweile fertigt die Automobilzulieferindustrie den größten Anteil der verbauten Komponenten und Module für die Hersteller. Zulieferer treiben somit die Elektrifizierung des Antriebsstrangs wesentlich voran. Vor allem die Chemieindustrie wird zukünftig eine wichtige Rolle bei der Bewältigung dieser Herausforderungen spielen und trägt damit maßgeblich zur Diffusion elektromobiler Konzepte bei. Dies gilt vor allem für Elektro- und Hybridfahrzeuge, aber auch für konventionelle Antriebstechnologien. Mit den Innovationen der Chemieindustrie sind heute schon Treibstofftanks aus Polyamid, Fensterscheiben aus Polycarbonat, Lithium-Ionen-Akkus als Energiequelle, biobasierte Kunststoffe als Dicht- und Dämmstoffe oder Felgen aus hochfesten Kunststoffen denkbar, die eine energieeffiziente und nachhaltige Mobilität ermöglichen. Darüber hinaus hat die Chemieindustrie durch die Entwicklung von Kautschukmischungen für leistungsfähige rollwiderstandsarme Reifen einen wesentlichen Beitrag dazu geleistet, Mobilität energieeffizienter zu gestalten.

Die Elektromobilität schafft neue Absatzpotenziale für viele Industrien.



# 1 Einleitung

Ein immer größer werdendes Bedürfnis nach individueller Mobilität und eine immer weiter anwachsende Mittelschicht in den aufstrebenden Wirtschaftsnationen Asiens stehen einer zunehmenden Limitation der fossilen Ressourcenversorgung und einem wachsenden Umweltbewusstsein in der Bevölkerung gegenüber. Diese Rahmenbedingungen bilden für die individuelle Mobilität ein politisches und wirtschaftliches Spannungsfeld, das heute eine kritische Grenze erreicht hat. Spätestens seit dem Eintreten der Ölkrise in den siebziger Jahren wurden Politik und Bevölkerung der traditionellen Industrienationen die Grenzen des Wachstums deutlich vor Auge geführt. Vier externe Treiber bedingen die zunehmende Ausweitung des politischen, ökologischen und ökonomischen Spannungsfelds:

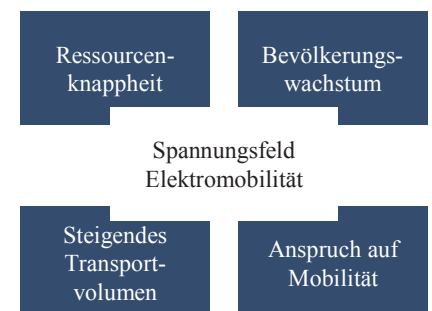
1. Die zunehmende Verknappung fossiler Brennstoffe,
2. eine wachsende Gesamtbevölkerung,
3. ein kontinuierlich zunehmendes Gesamtpersonen- und Gütertransportvolumen durch steigenden Konsum und
4. eine wachsende Mittelschicht in den ohnehin bevölkerungsreichen BRIC-Staaten.

Diese Rahmenbedingungen haben zu einem Umdenken geführt, das eine grundlegende Neuausrichtung des europäischen Gesetzesrahmens zur Nachhaltigkeit und Energieeffizienz zur Folge hatte. Die europäische Gemeinschaft hat sich im Rahmen des Kyoto-Protokolls zu umfassenden Maßnahmen verpflichtet, die einen wesentlichen Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen beitragen sollen. Diese Verpflichtung bedeutet, dass die EU-Mitgliedstaaten die Treibhausgasemissionen in allen Wirtschaftszweigen deutlich reduzieren. Die verbindlichen Zielsetzungen der jeweiligen Mitgliedsländer sind im sogenannten Burden Sharing Agreement definiert. Da der Verkehrssektor einen erheblichen Anteil an den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen trägt, steht er im Fokus der beschlossenen Maßnahmen.

**Rohstoffbezogene Engpässe und das hohe Leistungspotenzial elektronischer Antriebssysteme bilden die primären Treiber für den Technologiesprung zur E-Mobility.**

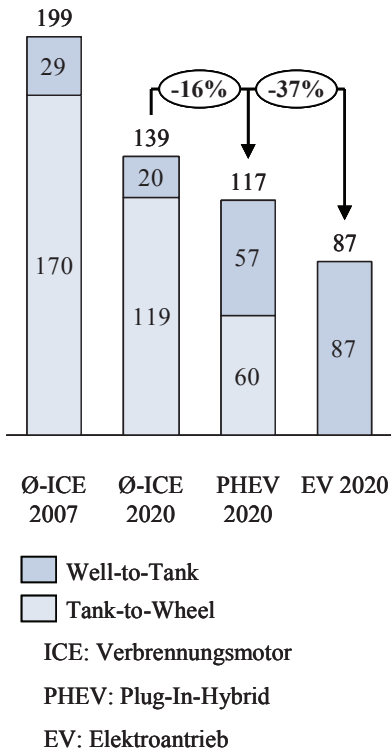


**Vier Treiber bestimmen das Spannungsfeld der Elektromobilität.**



Die komplett klimaneutrale Energiekette kann erst mittel- bis langfristig erreicht werden.

CO<sub>2</sub>-Emissionen Verbrennungsmotor, Plug-In-Hybrid und Elektroantrieb 2007/2020 in Deutschland



Die beschleunigte Verknappung fossiler Brennstoffe führt zu weitreichenden Folgen für Politik, Gesellschaft und Unternehmen:

- Ein politischer Umdenkprozess mit einem klaren Fokus auf die Entkoppelung von Wirtschaft und fossilen Brennstoffen und CO<sub>2</sub>-Emissionen wurde initiiert.
- Die innovationsstarken Automobilhersteller und -zulieferer haben große Fortschritte in den Bereichen Mechanik, Elektrotechnik, Werkstoffe und Aerodynamik erzielt und diese Innovationen in neue Mobilitätskonzepte überführt.
- Ein Umdenkprozess in der Bevölkerung wurde in Gang gesetzt, der eine Transformation der Mobilitätskonzepte in Richtung Nachhaltigkeit und Energieeffizienz bedingt.

Die Elektromobilität oder E-Mobility umschreibt ein Konzept, das derzeit im Fokus zahlreicher politischer und öffentlicher Diskussionen im Kontext nachhaltiger Mobilität steht. Die unbestreitbaren Vorteile der klimaneutralen Energiekette von Elektroautos stehen derzeit einem konträren Meinungsbild und Zweifeln gegenüber. Die hohe Innovationsleistung der Automobil- und Zulieferindustrie ermöglicht ein schnelles Durchschreiten der Lernkurve und eine anhaltende Verbesserung aller leistungsrelevanten Aspekte des elektrischen Antriebsstrangs. Mit Fahrzeugen wie dem Tesla Roadster und dem Opel Ampera sind bereits alltagstaugliche Elektrofahrzeuge auf dem Markt erhältlich. Das Konzept der E-Mobility geht jedoch weit über die reine Elektrifizierung des Antriebsstrangs hinaus. Neue Geschäftsmodelle und Nutzungskonzepte werden in den kommenden Jahrzehnten eine genau so wichtige Rolle spielen, wie zentrale Aspekte des Infrastrukturausbaus, die Weiterentwicklung gesetzlicher Rahmenbedingungen und die Substitutionsbeziehungen zwischen konventionellen und elektrischen Antriebskonzepten. Die Chemieindustrie steht als zentraler Innovations- und Technologielieferant der Automobilindustrie in der Verantwortung, die sich eröffnenden Potenziale der E-Mobility zu heben.

Das Fundament der Elektromobilität basiert auf vier wesentlichen Kriterien.

