

# Wandel im PKW-Antriebsstrang: Auswirkungen auf Produktionskonzepte

**2009**  
Stand der Technik



Konventioneller Antriebsstrang

**Ab 2010**  
Hybrid als Übergangslösung?



Serieller Hybrid  
Chevrolet Volt

[Quelle: GM]

**Ab 2015**  
Erste CO<sub>2</sub>-freie Konzepte



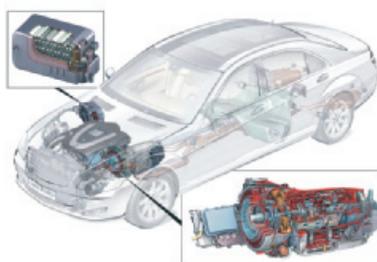
[Quelle: BMW]

Mini E



[Quelle: VW]

VW Golf 6 mit Benzinmotor



Paralleler Hybrid  
Mercedes-Benz S400 Hybrid



[Quelle: Daimler]

Brennstoffzellenfahrzeug  
Mercedes-Benz B-Klasse F-Cell

Veränderung des Pkw-Antriebsstrangs in der Zukunft.

Quellen: BMW, Daimler, GM, Adam Opel AG, VW

Das Antriebskonzept der Zukunft ist für alle Kundenkreise und Fahrzeugklassen bislang noch nicht gefunden. Die alternativen Antriebe (Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenantrieb) haben im Vergleich zu den konventionellen Antrieben mit einem Verbrennungskraftmotor noch immer mit bekannten Problemen wie der Energiespeicherung, der fehlenden Tankstelleninfrastruktur und erhöhter Produktions-

kosten zu kämpfen. Ebenso gilt es in der heutigen und noch stärker in der zukünftigen Gesellschaftsstruktur unterschiedliche Mobilitätsbedürfnisse zu befriedigen.

Aktuell sind nahezu 100 Prozent der weltweit verkauften Pkws mit einem konventionellen Verbrennungskraftmotor (VKM) ausgestattet. Hierzu zählt neben den gängigen Otto- und

Dieselfahrzeugen auch die Klasse der VKM, die mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden (zum Beispiel Erdgas, Ethanol oder Biodiesel). Der prozentuale Anteil dieser Fahrzeuge mit alternativen Kraftstoffen ist jedoch vernachlässigbar. Die Automobilhersteller und deren Zulieferer sind auf die Bearbeitung dieses konventionellen Antriebsstrangs, der eingesetzten Guss- und Aluminiumwerkstoffe und Werkstückgrößen in den heute benötigten Stückzahlen spezialisiert.

Trotz aller Euphorie für den Elektroantrieb, die Brennstoffzelle oder den Hybrid darf man nicht übersehen, dass der konventionelle Antrieb noch die nächsten Jahre der Standard im PKW sein wird. Deshalb ist die Entwicklung im Bereich des VKM noch keinesfalls abgeschlossen. Aktuell zeigt sich beim VKM ein deutlicher Trend hin zu kleinen aufgeladenen Motoren. Bei dem unter Downsizing bekannten Prinzip wird der Hubraum des VKM reduziert. Einem Leistungsverlust beugt man durch die Erhöhung des Verbren-



Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele (links oben), Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt.  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Julien Hohenstein (rechts oben) ist seit 2006 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am PTW tätig.  
Dipl.-Ing. Patrick Pfeiffer (rechts unten) ist seit 2008 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Gruppe Technologie am PTW tätig.  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Eric von Wühl (links unten) studierte an der Technischen Universität Darmstadt und der Ecole Centrale de Lyon Wirtschaftsingenieurwesen mit dem Schwerpunkt Maschinenbau.  
Technische Universität Darmstadt  
PTW – Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen  
64287 Darmstadt  
Kontakt: [www.ptw.tu-darmstadt.de](http://www.ptw.tu-darmstadt.de)



## Marktchancen...

» Der Antriebsstrang eines Pkws (englisch Powertrain) wird sich in der Zukunft drastisch verändern. Die Endlichkeit von fossilen Rohstoffen wie Erdöl und -gas sowie die Forderung nach einer Emissionsreduzierung stehen hierbei im Zielkonflikt mit den weiterhin steigenden Mobilitätsbedürfnissen der Gesellschaft. Dieser Artikel gibt einen Überblick zu den derzeit in Frage kommenden Konzeptlösungen und den geplanten Strategien der Anwender. Auswirkungen und Trends konnten hierbei sowohl auf die konzeptionelle Veränderung des Antriebsstrangs als auch insbesondere auf die zerspannende Produktion gezogen werden. <<



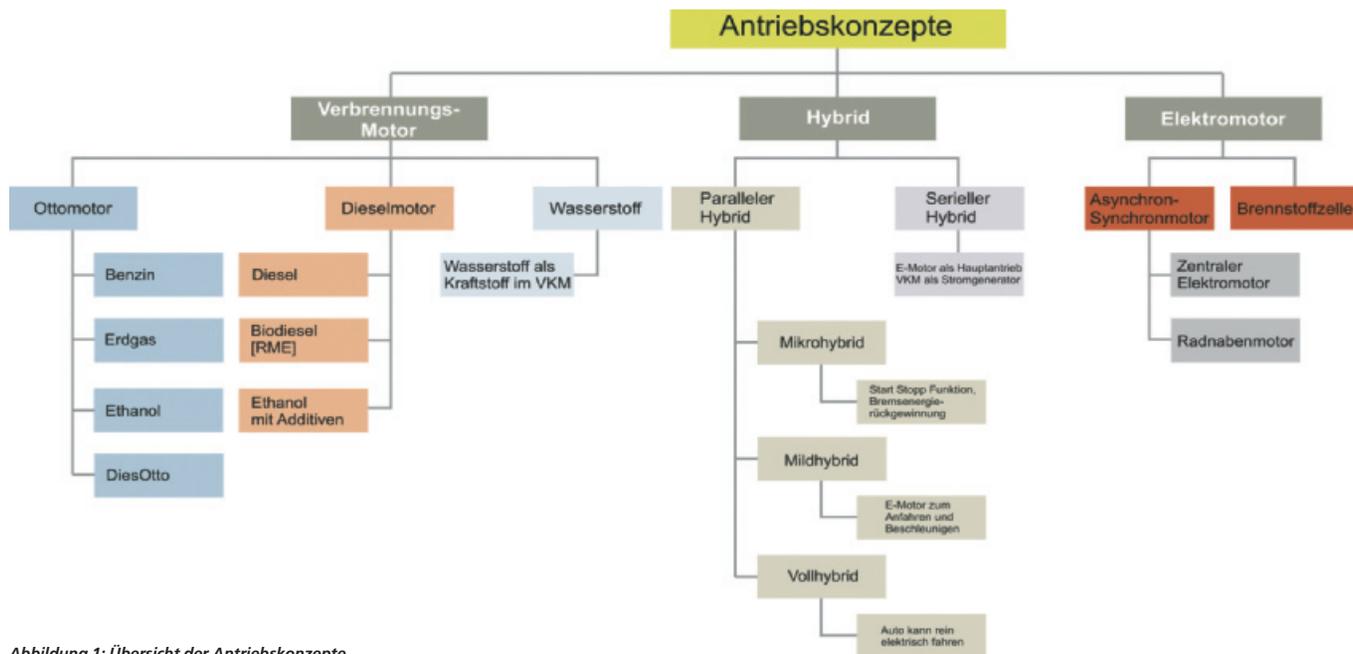


Abbildung 1: Übersicht der Antriebskonzepte.

nungsdrucks im Motor selbst oder mit Hilfe von Turboladern durch die Erhöhung des Ladedrucks vor. Die bekannten Komponenten wie Motorblock, Zylinderkopf, Nockenwelle, Kurbelwelle, Pleuel, Kupplung, Getriebe, Achs- und Gelenkwellen werden hierfür weiter optimiert und es werden kostengünstige Fertigungsmöglichkeiten für Turbolader entwickelt. In naher Zukunft jedoch wird das Gros der Automobilhersteller zumindest ab der Mittelklasse mit jeder neuen Baureihe auch ein Hybridkonzept auf den Markt bringen. Hierbei muss man bedenken, dass jede Veränderung des bestehenden Antriebskonzepts zu einer Veränderung des benötigten Komponentenspektrums und somit auch der Materialien und Werkstückgrößen führt. Die Abbildung 1 gibt einen Überblick auf die bestehenden Systeme und die bisher in Erwägung gezogenen alternativen Antriebskonzepte.

Der Hybridantrieb nimmt unter den verschiedenen Antriebskonzepten eine Zwischenstellung ein. Ein Fahrzeug dieser Art besitzt zwei Antriebe, einen VKM und einen Elektromotor.

Bei einem seriellen Hybridantrieb wird der Verbrennungsmotor ausschließlich als Stromgenerator eingesetzt, der die Batterie mit Energie versorgt. Die Batterie übernimmt die Energieversorgung für den Elektromotor. Der Vorteil dieses Konzepts ist, dass der VKM im optimalen Lastbereich betrieben werden kann, was den Kraftstoffverbrauch und den Schadstoffausstoß senkt.

Beim parallelen Hybrid fungiert der VKM als Hauptantrieb. Von Vorteil ist der Einsatz des Elektromotors beim Anfahren, im Stadtverkehr und auf Kurzstrecken sowie als Unterstützung des VKM beim Beschleunigen und beim Erreichen von Höchstgeschwindigkeiten. Zudem lässt sich durch den Elektromotor beim Bremsen mittels Bremskraft-rückgewinnung die Batterie aufladen. Der Vorteil dieses Konzepts liegt in der großen Flexibilität. Der Hauptantrieb (Elektromotor oder VKM) kann der jeweiligen Fahrsituation des Kunden angepasst werden. Je mehr ein Automobil im städtischen »Stop-

and-go-Verkehr« eingesetzt wird, desto mehr überwiegen die Vorteile eines kohlendioxid- und benzinfreien Elektromotors gegenüber dem zusätzlichen Gewicht des Hybridantriebs für den zweiten Antrieb. Im stationären Betrieb, wie beispielsweise auf der Autobahn, überwiegen die Vorteile des VKM als Hauptantrieb. Die derzeit angebotenen parallelen Hybridfahrzeuge wie der Toyota Prius besitzen eine rein elektrische Reichweite von zwei Kilometern. Diese wird und muss sich in Zukunft deutlich verbessern.

Beim reinen Elektroantrieb werden zur Fortbewegung der Räder Drehstrom- (Synchron- oder Asynchron-), Gleichstrom- oder Reluktanz-Motoren eingesetzt. Energiespeicher für die elektrische Energie ist in der Regel eine Batterie. Dessen Speicherkapazität, Kostenniveau und Lebensdauer in verschiedenen Klimazonen werden auch die entscheidenden Faktoren für die großserielle Einführung von Elektrofahrzeugen sein. Nur durch eine Verbesserung der Energiekapazität der Batterie können die Vorteile von Elektromotoren effizient genutzt wer-

den. Ein einheitliches Konzept bezüglich der Batterietechnik ist noch nicht absehbar. Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren finden hier ebenso Einsatz wie Lithium-Ionen-Batterien. Der Strombedarf eines Elektrofahrzeugs liegt bei zirka 15 bis 30 Kilowattstunden pro 100 Kilometer. Zurzeit sind im Durchschnitt zirka 64 Kilometer (Chevrolet Volt) rein elektrisch fahrbar. Dies ist ein deutlicher Nachteil gegenüber der Reichweite von Motoren, die fossile Brennstoffe benötigen.

Die Möglichkeit, sich unabhängig von fossilen Rohstoffen und dadurch von der Quelle bis zum Rad (Well to Wheel) emissionsfrei fortbewegen zu können, sprechen jedoch eindeutig für die konsequente Weiterentwicklung des Elektroantriebs. Eine Kohlendioxid-Bilanz von Null Gramm Kohlendioxid kann durch die Nutzung von regenerativ erzeugter Energie (Sonne, Wind und Wasser) erzielt werden. Bei ausschließlicher Verwendung von Kohlekraftwerken zur Stromerzeugung für den Elektroantrieb werden zirka 181 Gramm Kohlendioxid pro Kilometer ausgestoßen.

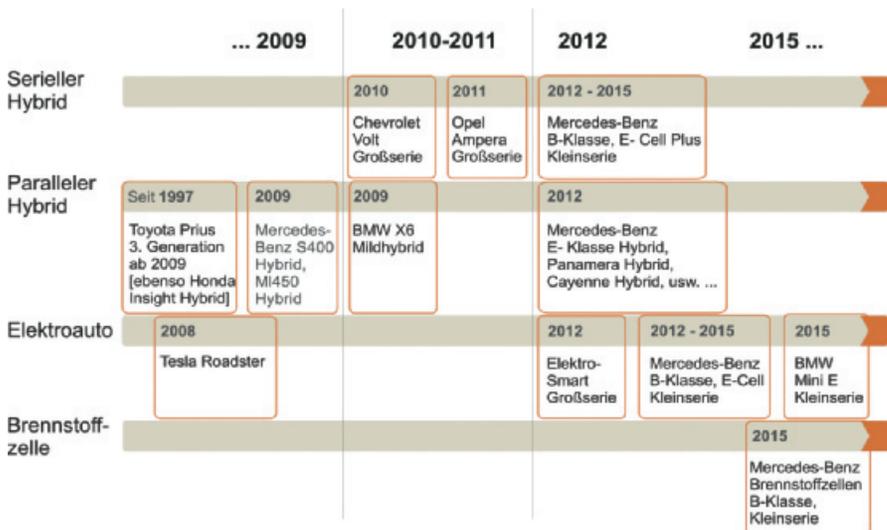


Abbildung 2: Verfügbarkeit neuer Antriebstechnologien in der Zukunft.



Abbildung 3: Zukünftige Handlungsfelder und Kernfragen der Automobilindustrie (Quelle A.T. Kearney).

Die Brennstoffzelle (englisch Fuel Cell) kann ebenso in die Gruppe der Elektroantriebe eingegliedert werden, da sie über einen Elektromotor verfügt, der als Fahrzeugantrieb dient. Als Energiespeichermedium wird flüssiger oder gasförmiger Wasserstoff verwendet. Mit diesem wird in einer Brennstoffzelle Strom erzeugt, um den Elektromotor anzutreiben. Die unterschiedlichen Strategien der Fahrzeughersteller zur Einführung der vorgestellten Konzepte am Markt sind in Abbildung 2 dargestellt.

Analysen zufolge steht Hybridantrieben eine glänzende Zukunft bevor. Diverse Studien sind hierzu bereits veröffentlicht worden (A.T. Kearney, FH Gelsenkirchen). Im Jahr 2015 könnten bereits drei Millionen Hybridfahrzeuge pro Jahr in Europa verkauft werden. Die Studie der FH Gelsenkirchen sieht vor, dass ab dem Jahr 2025 jedes neu zugelassene Fahrzeug über einen Hybridantrieb (seriell und parallel) verfügt. Es sollte jedoch beachtet werden, dass Expertenmeinungen zufolge dieses

Szenario nur durch die Einbeziehung von Micro-Hybridfahrzeugen (Start-Stopp-Automatik, Bremsenergieerückgewinnung) realistisch erscheint. Weiterhin lässt sich darüber streiten, ob ein Micro-Hybrid in die Klasse der Hybridfahrzeuge eingegliedert werden sollte oder ob dieser lediglich eine konsequente Weiterentwicklung eines konventionellen VKM darstellt.

Die deutschen Automobilhersteller planen ab 2009 bei fast allen neu aufgelegten Baureihen Hybridkonzepte anzubieten. Toyota stellt 2009 schon die dritte Generation des seit 1997 gebauten Toyota Prius Hybrid vor. Die Markteinführung von Hybridfahrzeugen ist jedoch größtenteils auf Fahrzeuge aufwärts der Mittelklasse beschränkt. Bei Kleinwagen und Fahrzeugen

der unteren Mittelklasse geht der Trend aufgrund der Gewichts- (zweiter Motor) und der Kostenerhöhung eher in Richtung Downsizing konventioneller VKM.

80 Prozent der nordamerikanischen und europäischen Gesellschaft haben einen täglichen Mobilitätsbedarf von etwa 55 Kilometern. Erste Fahrzeuge, die diese Reichweite rein durch elektrische Leistung erbringen, wird es ab 2011/12 in Europa in Form des Opel Ampera und der Mercedes-Benz B-Klasse E-Cell-Plus (zirka 65 Kilometer beziehungsweise 100 Kilometer elektrische Reichweite) geben. Technisch gesehen handelt sich bei beiden Fahrzeugen um serielle Hybride. Beispiele für kommende serienreife Elektrofahrzeuge sind der Elektro-Smart und der Mini E, bei denen die Markteinführung ab 2012 beziehungsweise 2015 geplant ist.

### Auswirkungen und Trends neuer PKW-Antriebskonzepte auf die Fertigung

Die neuen Antriebskonzepte werden die zukünftige Produktionsstruktur nachhaltig beeinflussen. Hierbei sieht sich die Automobilindustrie unterschiedlichen Kernfragen in den verschiedenen Handlungsfeldern ausgesetzt (Abbildung 3).

Am konkreten Beispiel der Antriebskonzepte äußern sich die Strukturänderungen wie folgt. Zum einen kommen Bauteile neu hinzu (Turbolader, komplexeres Getriebe für Hybridlösungen, Elektromotorenteile beim Elektroantrieb), andererseits entfallen am Beispiel des Elektroantriebes eine Vielzahl an Bauteilen (VKM und Anbauteile, Abgassystem, Zündsystem, und so weiter). Drittens werden neue Fertigungstechnologien wie zum Beispiel das Einziehen der Wicklungen auf den Stator des Elektromotors Einzug in die Automobilindustrie erhalten. Die Abbildungen 4 bis 6 zeigen schematisch den Aufbau des jeweiligen Antriebsstrangs für den

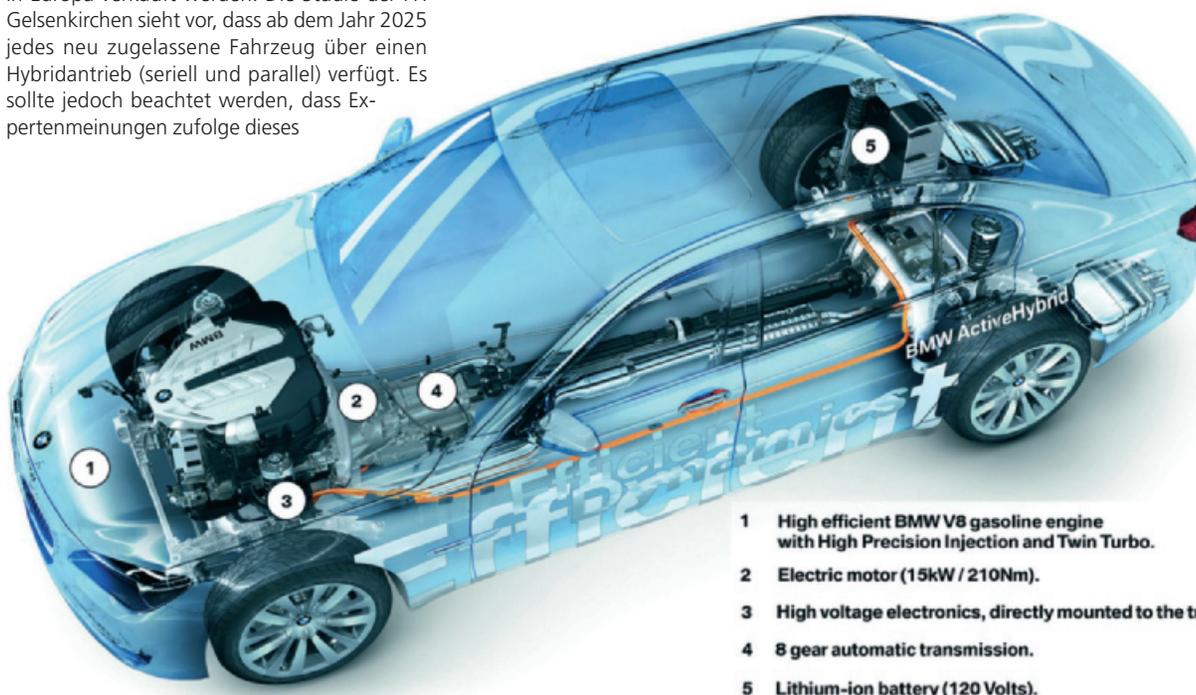


Abbildung 4: Komponenten des Antriebsstrangs eines Hybridfahrzeugs.

Quelle: BMW.

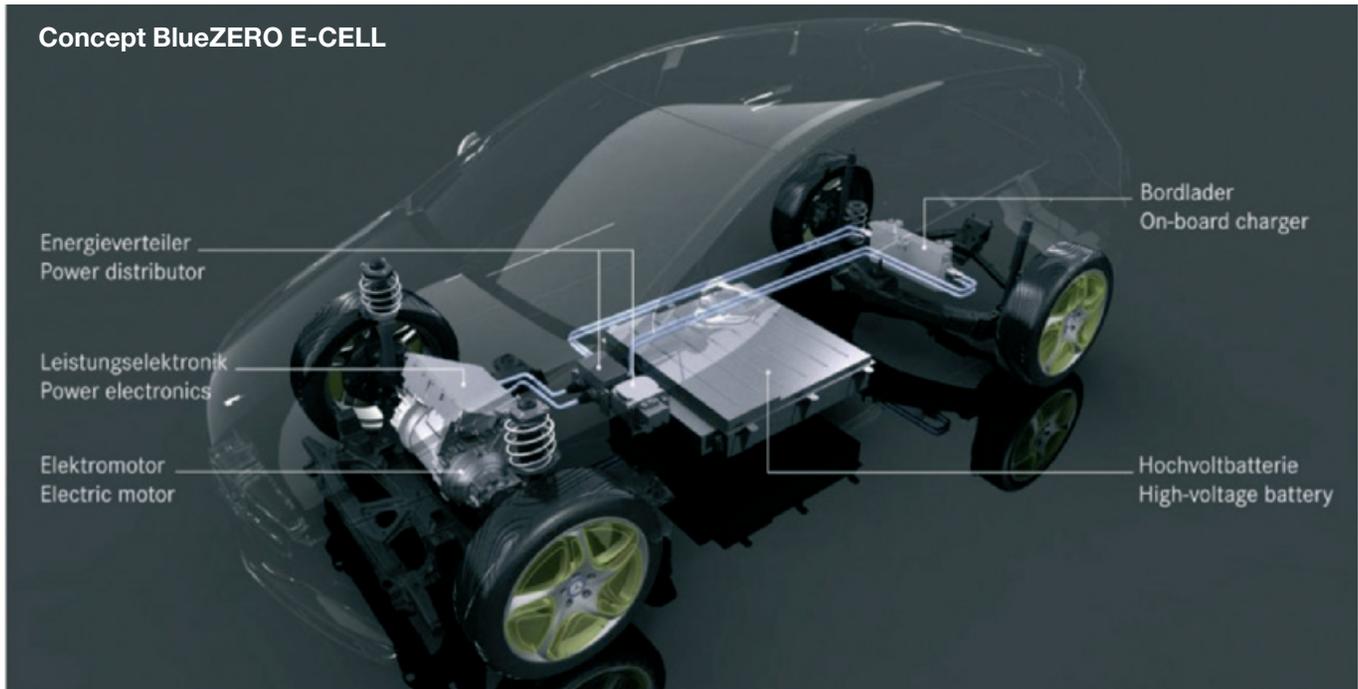


Abbildung 5: Komponenten des Antriebsstrangs eines Elektrofahrzeugs.

Quelle: Daimler.

Hybrid- und den Elektroantrieb sowie den der Brennstoffzelle.

Es ist festzustellen, dass die Anzahl der Bauteile die durch zerspanende Verfahren wie Dreh-, Fräs-, Bohr- oder Schleifprozesse bearbeitet werden, in Abhängigkeit der Konzeptlösungen deutlich variieren. Dies beeinflusst die benötigte Produktionskapazität extrem. Die Abbildung 7 verdeutlicht diesen Zusammenhang am Beispiel der benötigten Zerspanungshauptzeiten bei der Produktion von alternativen Antriebskonzepten vergleichend zum Hauptzeitbedarf bei der Fertigung von konventionellen Antrieben.

Im Falle des Hybridantriebs kommen aufgrund des zweiten Motors einige Komponenten (Elektromotor, Batterie und Leistungselektronik) hinzu oder verändern sich (komplexeres Getriebe), wodurch sich der Zerspanungsanteil am Fahrzeug insgesamt um zirka zehn Prozent erhöht. Die Abbildung 8 stellt die Bauteile eines Elektromotors anhand einer Explosionsdarstellung dar. Dreh-, Fräs- und Bohrprozesse sind insbesondere am komplex aufgebauten Gehäuse durchzuführen. Vergleichend zum konventionellen Antriebsstrang könnte beim Hybridfahrzeug mit zirka 26 Prozent die drehende Bearbeitung am stärksten zunehmen. Die Zerspanungszeiten können sich jedoch durch den verstärkten Einsatz von Downsizing-Motoren wieder auf das Niveau des konventionellen VKM-Antriebs reduzieren.

Beim reinen Elektroauto hingegen verringert sich die Zerspanungsleistung für den Fahrzeug-Antriebsstrang drastisch. Die Verwendung eines zentralen Elektromotors im KFZ bedingt lediglich den Einsatz eines einstufigen Getriebes, der Leistungselektronik und der Batterie. Alle weiteren Komponenten des konventionellen Pkw-Antriebsstrangs entfallen. Zerspanungsarbeiten fallen lediglich am Elektromotor und Getriebe an. Dies führt laut einer Studie am PTW zu einer Reduktion der Zerspanungshauptzei-

ten um über 72 Prozent. Besonders stark fällt der Anteil der Fertigungsverfahren Fräsen, Bohren und Schleifen ab. Die Drehbearbeitung reduziert sich im Vergleich zum konventionellen Pkw mit Verbrennungsmotor um zirka 50 Prozent. Auch beim Brennstoffzellenfahrzeug ist die Auswirkung ähnlich gravierend für die Zerspanung. Es ergibt sich eine Reduktion der Zerspanungshauptzeiten insgesamt um zirka 60 Prozent. Die Anteile der verschiedenen Prozesse verringern sich größtenteils deutlich um über 50 Prozent.

### Die Zukunft der Zerspanung, der Werkstoffe und des Einsatzes von Werkzeugmaschinen

Der Hybridantrieb wird in den nächsten 15 Jahren an Marktanteilen zunehmen. Die gewonnenen Erkenntnisse durch die Großserienfertigung und Benutzung von Batterien und Elektromotoren in Hybridfahrzeugen werden die technologische Entwicklung von Elektrofahrzeugen vorantreiben. In naher Zukunft ist

demnach ein leichter Anstieg der zerspanenden Bearbeitung am Antriebsstrang denkbar. Die Marktdurchdringung von Hybridfahrzeugen ist jedoch größtenteils auf Fahrzeuge aufwärts der Mittelklasse beschränkt. Bei Kleinwagen und Fahrzeugen der unteren Mittelklasse geht der Trend – wie schon erwähnt – eher in Richtung Downsizing konventioneller VKM. Die großserielle Einführung reiner Elektroautos bedingt dagegen eine starke Reduktion der zerspanenden Produktion des Pkw-Antriebsstrangs. Die Zerspanungshauptzeiten werden im Vergleich zum heutigen VKM um bis zu 70 Prozent verringert. Bevor keine wesentlichen Verbesserungen in den Bereichen der Batterietechnik (Leistungsdichte, Herstellkosten, Lebensdauer, Größe, Gewicht und Standardisierung) und der bisher nicht vorhandenen Infrastruktur zur Energiebereitstellung eintreten, wird sich die Marktdurchdringung von reinen Elektrofahrzeugen weiter hinziehen. Das elektrische System mit einer anliegenden Hochvoltspannung von 500 V birgt daneben zusätzliche Sicherheitsbedenken. Der Zugang zu den be-

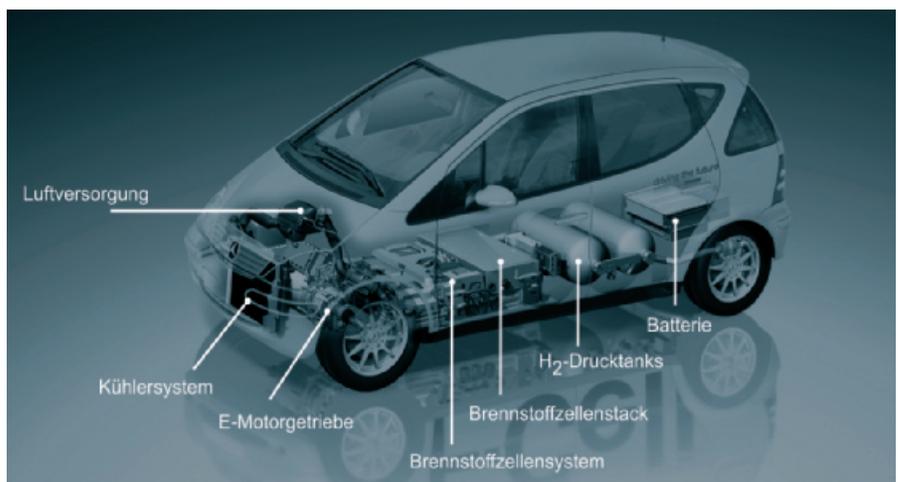


Abbildung 6: Komponenten des Antriebsstrangs einer Brennstoffzelle.

Quelle: Daimler.

Zerspanungs-Hauptzeiten Hybrid, Elektroauto und Brennstoffzelle im Vergleich mit dem Verbrennungsmotor [in Prozent]

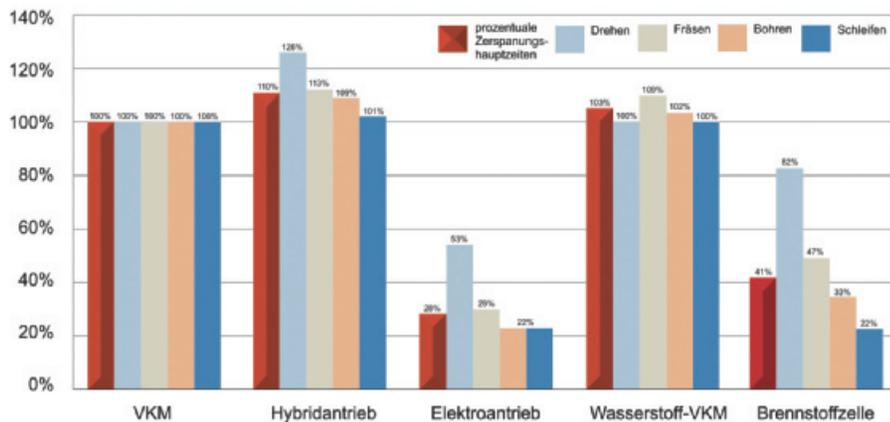


Abbildung 7: Auswirkungen auf die Zerspanungshauptzeiten bei alternativen Antrieben.

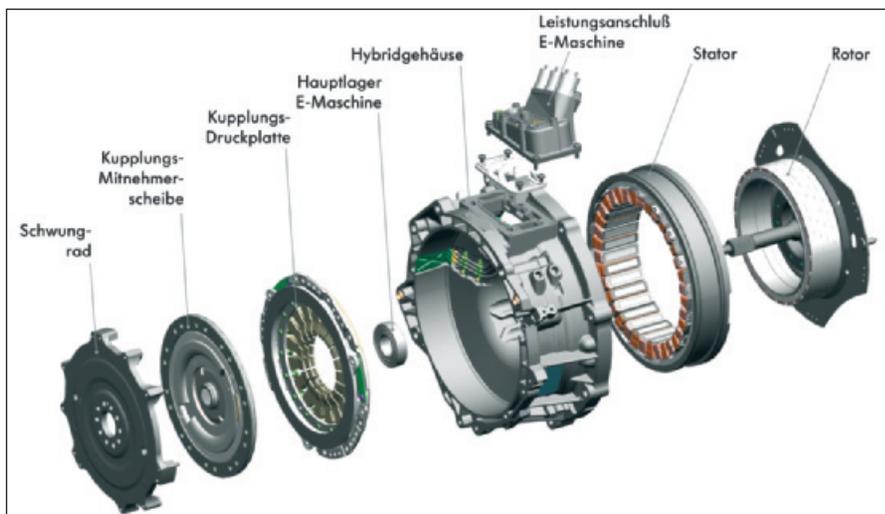


Abbildung 8: Komponenten eines Elektromotors.

Quelle: VW.

nötigten Rohstoffen für die neuen elektrischen Antriebskomponenten ist ebenso ungeklärt. Es bleibt festzuhalten, dass der Pkw-Antriebsstrang bei elektrischen Antriebskonzepten wesentlich weniger mechanisch beanspruchte Komponenten und weniger rotatorische Bau-

teile aufweist. Die Größe der zu bearbeitenden Werkstücke beim Elektroauto ist deutlich geringer als bei einem Pkw mit VKM. Daneben wird es eine Zunahme an Aluminium- und anderen Leichtbauwerkstoffen geben. Die verringerte Bauteilgröße und ihr Gewicht führen zu einem

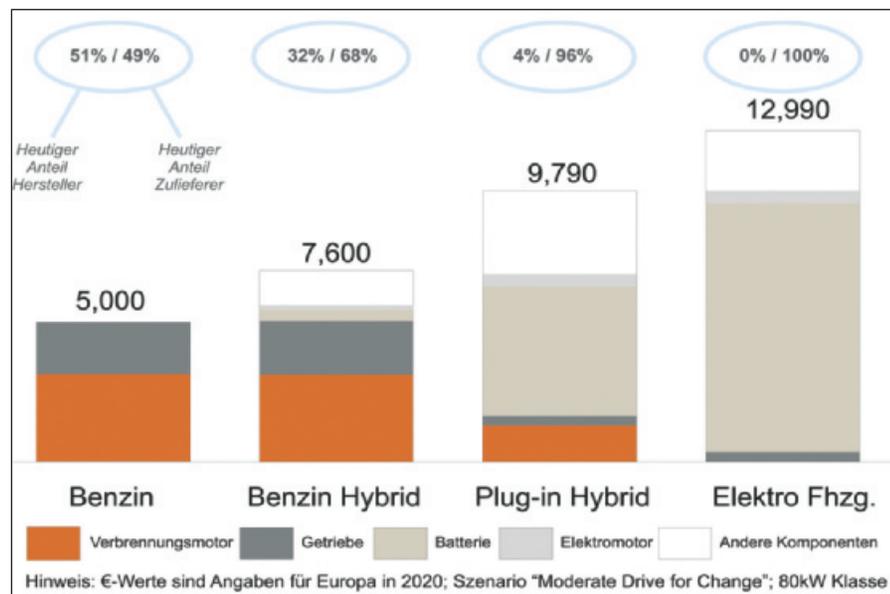


Abbildung 9: Denkbare zukünftige Wertschöpfung im Antriebsstrang.

Quelle: A.T. Kearney.

Wegfall von horizontalen Bearbeitungszentren. Der Einsatz von Werkzeugmaschinen wird zukünftig mehr Flexibilität erfordern, da sich der Prozess je nach Antriebskonzept grundlegend ändern kann. Ein einheitliches Konzept zur Befriedigung der verschiedenen Mobilitätsbedürfnisse unserer Gesellschaft ist nicht absehbar. Vielmehr tendieren die Automobilhersteller dazu, verschiedene Konzepte für unterschiedliche Bedürfnisse zu etablieren.

Eine Veränderung ist auch im Bereich der Kompetenzfelder von Hersteller und Zulieferer absehbar. Der Elektromotor und das Batteriemangement, bisher in Zuliefererhand, könnten zukünftig in das Kompetenzfeld der Hersteller fallen. Die Batterietechnik sollte dagegen im Verantwortungsbereich der Zulieferer bleiben. Ein mögliches Szenario, welches die heutige Wertschöpfung im Antriebsstrang von Herstellern und Zulieferern mit der Wertschöpfungsaufteilung der Zukunft vergleicht, wurde bereits von der A.T. Kearney erstellt (Abbildung 9). Zwangsläufig ist jedoch lediglich die langsam fortschreitende Elektrifizierung des Automobils.

**i** NFO

**10. Powertrain Machining Conference am 11. und 12. November 2009 in Fellbach**

Das Thema Mobilität wird auch in Zukunft bestimmend für unser Leben und unseren Alltag sein. Gerade an die Automobilindustrie werden deshalb beständig neue Forderungen gestellt. Der Wunsch nach erhöhter Mobilität wird zunehmend verknüpft mit teilweise gegensätzlichen Anforderungen wie beispielsweise steigenden Fahrkomfort und -geschwindigkeit bei gleichzeitiger Umweltverträglichkeit sowie steigende Fahrzeugqualität bei zeitgleicher Kostenreduzierung. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor zur Realisierung dieser Anforderungen ist die Optimierung des Antriebsstrangs (Powertrain).

Für den Powertrain-Bereich bietet das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele auf der 10. Powertrain Machining Conference in der Schwabenlandhalle in Fellbach praxisnahe Lösungen und Konzepte an. Unter dem diesjährigen Leitmotiv »Survival strategy in times of crisis, cost reduction and technology progress« werden Innovationen im Bereich der Zerspanung von Powertrain-Komponenten, der Entwicklung von Schneidwerkzeugen und deren Beschichtungen sowie flexible Werkzeugmaschinenkonzepte vorgestellt. Abgerundet wird die Konferenz mit einer Besichtigung der Daimler AG. Programm und weitere Informationen zur Konferenz unter [www.machining-workshop.de](http://www.machining-workshop.de).