



* AUDI e-tron S mit freundlicher Genehmigung der AUDI AG Ingolstadt

QUO VADIS PKW?

Gedanken zur künftigen Fertigung unter Beachtung aktueller gesellschaftlicher, technischer und wirtschaftlicher Aspekte

AUTOREN:

Prof. Dr. Eberhard Ambos, Prof. Dr. Ulrich Gabbert, Prof. Dr. Thorsten Halle, Prof. Dr. Christian Heikel

1. VORBEMERKUNGEN

Der PKW-Bestand betrug Anfang des Jahres 2020 58,2 Millionen Kraftfahrzeuge in Deutschland und 5,04 Mio. PKW in Österreich (2019) [1-2]. Bei 83,2 Mio. Einwohnern in Deutschland und 8,9 Mio. Einwohnern in Österreich ergibt sich damit eine Ausstattung von ca. 0,7 PKW pro Einwohner in Deutschland und 0,6 PKW in Österreich. Da in diesen Zahlen auch Babys, Kinder und Fahruntüchtige inbegriffen sind, darf man diese Ausstattungsgrade als sehr hoch bezeichnen. Sie verdeutlichen den Wert des individuellen Transportmittels PKW für die Bevölkerung beider hochindustrialisierter Staaten. Außerdem ist die Produktion von PKW oder Bauteilen und Baugruppen davon eine bedeutende volkswirtschaftliche Größe in diesen beiden Ländern. Der Umsatz der Automobilproduktion im Jahr 2019 in Deutschland betrug 436,2 Mrd. Euro und in Österreich 43 Mrd. Euro (Im Jahr 2018 nach Statist. Bundesamt Deutschland).

Einer weiteren Erhöhung des Kraftfahrzeugbestandes

stehen eine Reihe gesellschaftlicher, technischer und wirtschaftlicher Veränderungen entgegen. An dieser Stelle sollen beispielhaft nur folgende genannt werden:

Verringerung des CO₂-Ausstoßes und weiterer schädlicher Abgase (z.B. Substitution von Antrieben mit Verbrennungstechnik durch elektrische Antriebe).

Die Bemühungen zur Verdrängung des PKW-Verkehrs aus den Städten, sowohl bezüglich des fließenden als auch des ruhenden Verkehrs (z.B. Ausbau und Optimierung des öffentlichen Personennahverkehrs, Ausweis von Fahrradwegen und beruhigten Verkehrszonen. Zitat: „Beim Umbau des Verkehrs in den Städten ist noch viel Luft nach oben. Unsere Städte sind keine Parkplätze, Städte sind Orte zum Leben“ [3]).

Dazu gehören auch organisatorische Maßnahmen zur gemeinsamen Nutzung von PKW durch eine größere Zahl von Nutzern („Car-Sharing“).

Neben diesen Prozessen zeichnen sich jedoch auch Vorgänge ab, die den vorstehend genannten Entwicklungen zuwiderlaufen:

Die „Verdichtung“ der Städte und die oft nur wenig kinderfreundlichen und naturnahen Bedingungen in den Städten führen häufig dazu, dass vor allem jüngere Menschen mit ihren Familien aus der Stadt in das ländliche Umland mit den oft hervorragenden Umweltbedingungen ziehen. Außerdem nimmt die Zahl der weiblichen Beschäftigten weiter zu. Demzufolge stellt sich das Erfordernis, dass häufig beide Elternteile, meist noch an getrennten Orten, arbeiten und sie jeder auf ein eigenes Fahrzeug angewiesen sind. Dazu kommt, dass die Mieten in den großen Städten von „normalen“ Bürgern oft nicht mehr aufgebracht werden können. In einem umfangreichen Zeitschriftenbeitrag, unter anderem zu den Folgen von Corona, wird auf die vielfältigen, sich aktuell vollziehenden Prozesse eingegangen [4].

Für viele Vertreter der älteren Generation, besonders auf dem flachen Lande, ist der PKW ein unverzichtbarer Gegenstand des täglichen Lebens zur Bewältigung ihrer Alltagsaufgaben, wie Arztbesuche, Einkauf von Lebensmitteln und Aufrechterhaltung der sozialen Kontakte.

Im gesellschaftlichen Interesse unerwünscht ist der Trend, dass bei Neuerwerb von PKW sehr häufig für „Allroadfahrzeuge (SUV)“ entschieden wird, obwohl diese in ihrem gesamten Fahrzeugleben nur auf Beton und Asphalt unterwegs sind. Diese Fahrzeuge benötigen aber bedeutend mehr Verkehrsfläche und sind, wegen ihres höheren Gewichts, fast immer stärker motorisiert. Das findet seinen Ausdruck auch in höheren Abgaswerten (CO₂, NO_x und Feinstaub).

Diese, zum Teil gegenläufigen Tendenzen kennzeichnen die Situation, vor der die Entwickler von Automobilen und deren Fertiger und Zulieferer stehen. Es gilt demnach in der nächsten Zeit den vielfältigen Einwirkungen gerecht zu werden und den Versuch einer optimalen Vorgehensweise zu wagen.

Eine größere Zahl der Überlegungen und Denksätze ist Gegenstand der nachfolgenden Ausführungen.

2. ALLGEMEINE ENTWICKLUNGSTENDENZEN

2.1 LEICHTBAU ALS ENTSCHEIDENDE VORAUSSETZUNG FÜR DIE SENKUNG DER ANTRIEBSENERGIE

Bereits in einem früheren Beitrag in dieser Zeitschrift wurde auf die Komplexität des Leichtbaus eingegangen [5]. Dieser ist Voraussetzung für die weitere Senkung des Energieverbrauchs zum Betreiben der Kraftfahrzeuge und (bei Verbrennungsantrieben) zur Verringerung des CO₂-Ausstoßes. Die Vielgestaltigkeit der Aufgabe lässt sich deutlich aus Bild 1. erkennen.

Auf den Zusammenhang zwischen Fahrzeuggewicht und CO₂ - Ausstoß wird ausführlich in [6] eingegangen. Stark vereinfacht: Je höher das Fahrzeuggewicht, desto höher der CO₂ -Ausstoß.

Eine Verbesserung der Umweltbilanz der Fahrzeuge wird durch Abgehen vom Einsatz der Verbrennungsener-

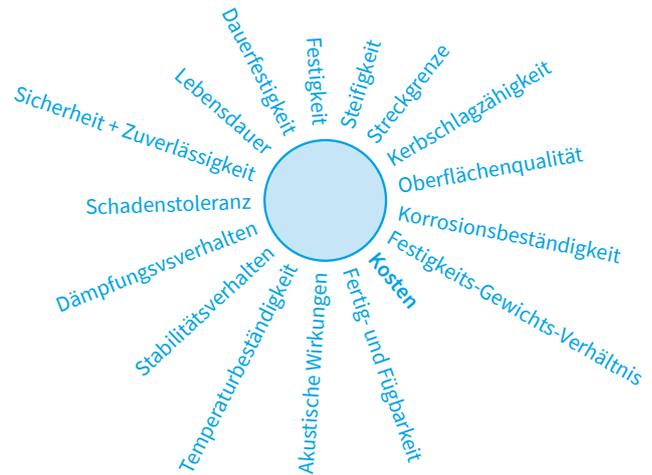


Bild 1. Wichtige Einflussfaktoren bei der Wahl und Bewertung von Leichtbauvarianten

gie zu anderen Energieformen angestrebt. Darauf wird bei der Beschreibung der Antriebsformen näher eingegangen.

2.2 ERHÖHUNG DER ZUVERLÄSSIGKEIT UND DAMIT SENKUNG VON WARTUNGS- UND REPARATURAUFWENDUNGEN SOWIE VERMEIDUNG VON AUSFÄLLEN

Der Qualitätssicherung bei der Fertigung und Montage von Fahrzeugkomponenten ist in den vergangenen Jahren große Aufmerksamkeit gewidmet worden. Die Rückrufe und Ausfälle von Fahrzeugen in den vergangenen Jahren weisen jedoch in eindrucksvoller Weise darauf hin, dass noch ein Reihe von Aufgaben bezüglich der Qualitätsverbesserung zu leisten ist. (**Bild 2.**)

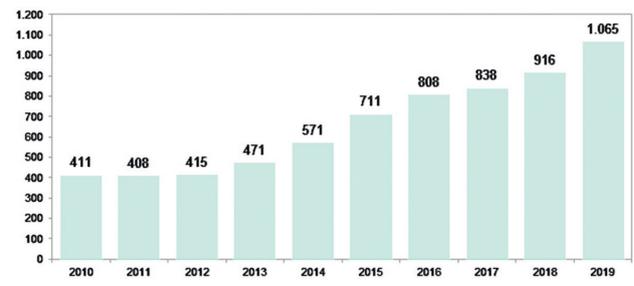


Bild 2. Anzahl der Rückrufaktionen 2010 bis 2019 [7]

Schwerpunkte als Ursachen für die Rückrufe sind meist: die mangelhafte Funktion der Elektronik und von Sicherheitseinrichtungen (Bremsen und Airbags) sowie Unzulänglichkeiten im Antrieb. Diese Ursachen haben nur bedingt unmittelbare Beziehungen zu gießtechnischen Problemen.

Dennoch gibt es eine Reihe von Prozessen, die eine überdurchschnittliche Aufmerksamkeit verdienen und nicht selten Verursacher von Reklamationen oder wirtschaftlichen Verlusten sind. Hierzu gehören auch die technologisch nicht einfachen Prozesse des Gießens von extrem dünnwandigen, geometrisch komplizierten und festigkeitsmäßig hochbeanspruchten Teilen aus Leichtmetallen. Die Einführung der Computertomografie in den Gussteilfertigungsprozess sowie die Digitalisierung

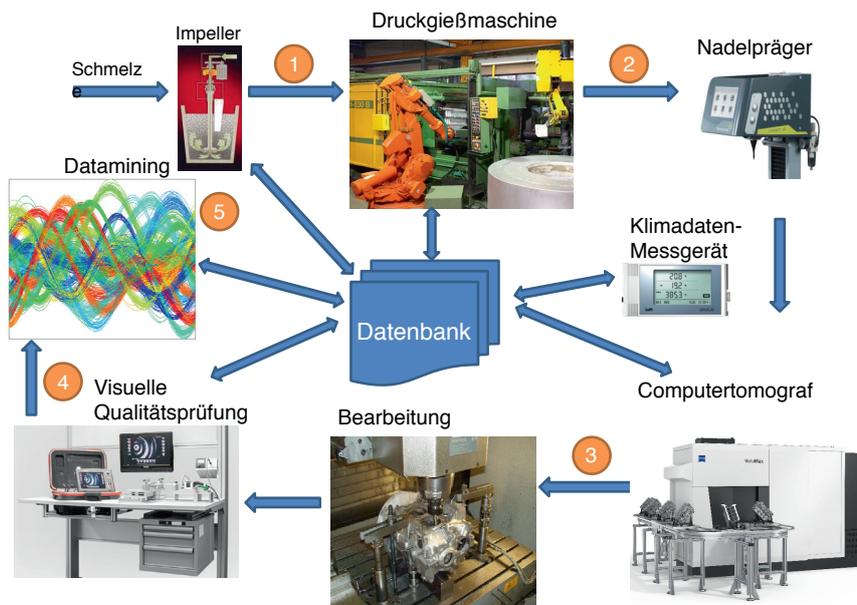


Bild 3. Versuchsanordnung zur Optimierung des Druckgießprozesses

des Fertigungsprozesses derartiger Gussteile hat jedoch bereits zu nennenswerten Qualitätsverbesserungen mit den daraus folgenden wirtschaftlichen Ergebnissen beigetragen. In den Literaturstellen [8-10] ist ausführlich über die intensiven Bemühungen zur Nutzung der Computertomografie berichtet worden. Ein maßgeblicher Beitrag zur Digitalisierung der Gussfertigung ist in dieser Zeitschrift zur Kenntnis gegeben worden [11]. In **Bild 3** ist aufgezeigt, mit welcher Versuchseinrichtung die optimale Qualität anspruchsvoller Druckgussteile für den Automobilbau ermittelt und im realen Produktionsbetrieb gewährleistet werden soll.

Auch durch optische Oberflächenprüfsysteme sind nennenswerte Qualitätsverbesserungen erreichbar, wie in [13] anhand unterschiedlicher Prüfeinrichtungen verdeutlicht wird.

2.3 VERRINGERUNG DES FERTIGUNGS- UND MONTAGEAUFWANDES

Die Verringerung des Fertigungs- und Montageaufwandes ist eine vielgestaltige Aufgabe im Automobilbau, an der auch die Zulieferindustrie einen wesentlichen Anteil hat und innovative Ergebnisse dafür in großer Zahl generiert. Namhafte Beratungsunternehmen beschäftigen sich mit der Zukunft des Automobilbaus. So finden sich folgende Aussagen über aktuelle und künftige Aufgaben [19]: „Klar ist, wer in den nächsten 5 – 10 Jahren noch konkurrenzfähig im Markt mitwirken will, muss

- ▶ neue Mobilität,
- ▶ autonomes Fahren,
- ▶ Digitalisierung und Elektrifizierung neu ausrichten und
- ▶ seine Kosten im Kerngeschäft senken (z.B. durch innovativere Qualitäts- und Instandhaltungssteuerung).“

Zu den Unternehmen, die sich in großem Maßstab mit Forschung und Entwicklung rund um das Automobil befassen, gehört der ThyssenKrupp – Konzern. Mit dem

Forschungsprojekt „InCar“ wurde das Ziel verfolgt, den Kunden der Automobilindustrie eine breite Palette rasch umsetzbarer, serienreifer Lösungen bieten zu können. Das Ergebnis waren mehr als 40 innovative Lösungen für Fahrwerk, Lenkung, Antriebsstrang und Karosserie, die laut Vorstandsvorsitzendem „...beim Gewicht Einsparpotenziale von bis zu 50 Prozent, bei den Bauteilen und Kostenvorteile bis zu 20 Prozent erreichen.“ [12].

Die gleichen Bemühungen können auch von den Gießereien benannt werden:

In [14] wird berichtet, dass es heute möglich ist, hochgenau und mit sehr hoher Produktivität Bauteile für den Automobilbau im Grünsandverfahren auf kastenlosen Formanlagen zu produzieren. Als Beispiele werden Querlenker, Bremsättel und Getriebegehäuse angeführt. Für die Produktivität werden Leistungen von 260 Teilen pro h für die Querlenker und von 800 Teilen pro h für die Bremsättel angegeben. Außerdem wird auf die hohen Festigkeitswerte der Gussteile verwiesen.

Eine der neuesten Entwicklungen der Fertigungstechnik sind **hybride** Fertigungsverfahren. Darunter versteht man beispielsweise die Herstellung geometrisch einfacher Teile durch konventionelle Verfahren in Kombination mit komplizierten Teilen, die z.T. durch robotergeführte Laserstrahlaufragschweißanlagen gefertigt werden. Diese Technologie befindet sich jedoch noch im Forschungsstadium. Es wird von den Experten erwartet, dass sich mit dieser Vorgehensweise die Fertigungszeit um 50 % und die Kosten um 20 – 30 % bei geeigneten Teilen senken lassen [15]. Mit der Multimaterialbauweise beschäftigen sich zwischenzeitlich etwa 200 Firmen im Rahmen einer VDMA – Arbeitsgemeinschaft. Viele davon setzen auf die Nutzung laserbasierter Fertigungsverfahren [16]. Es darf jedoch nicht verschwiegen werden, dass die hybriden Fertigungsverfahren nicht nur zu Vorteilen führen, sondern auch erhebliche Schwierigkeiten beim Recycling der Bauteile mit sich bringen.

Neben der Verringerung des Montageaufwandes durch verbesserte Fertigungsverfahren und günstige

Werkstoffe ist neuerdings auch durch die Fa. Tesla (USA) das Bemühen zur Einschränkung des Montageaufwandes durch geänderte konstruktive Lösung bekannt geworden. So strebt die Firma an, dass durch ein Abgehen von kleinteiligen Blechausführungen auf größere, druckgegossene Segmente der Karosserie Montageaufwand und teure Roboter eingespart werden können [20].

2.4 ZUNEHMENDE ENTLASTUNG DES MENSCHEN VON AUFGABEN ZUR FÜHRUNG DES FAHRZEUGES DURCH STETIGEN ÜBERGANG ZUM AUTONOMEN FAHREN

Die Bundesregierung Deutschlands sieht sich vor allem beim autonomen Fahren als internationaler Vorreiter. Tatsächlich soll es ab Juni 2021 in Deutschland erlaubt sein, mit autonom fahrenden Autos auf der Autobahn im stockenden Verkehr bis zu einer Geschwindigkeit von 60 km/h zu fahren. Diesen Rechtsrahmen will das Bundeswirtschaftsministerium noch ausweiten. In internationalen Gremien wird darüber längst verhandelt [17].

Eine Führungspersönlichkeit des deutschen Automobilbaus bekennt nach persönlichem Erleben, dass PKW mit dem Steuerungssystem Driving Assistent Professional die optimale Funktion des autonomen Fahrens nach Level 3 gewährleisten [18].

2.5 ZUSAMMENFASSUNG

Unabhängig vom verwendeten Antriebssystem und den genannten Trends wird sich die konstruktive Gestaltung eines Fahrzeuges nicht grundlegend verändern, da hier physikalische Prinzipien sowie Sicherheits- und Zuverlässigkeitskriterien maßgebende Schranken setzen. Im Rahmen dieser Gestaltungsgrundlagen gibt es aber noch einen maßgeblichen Freiraum zu erschließen, der es ermöglicht, zu besseren, effektiveren Fahrzeugen zu gelangen. Dazu gehören die Einbeziehung neuer oder verbesserte Konstruktionsprinzipien (z.B. bionisches Design), der Einsatz neuer Materialien, die Nutzung neuer Fertigungs-, Montage- und Produktionsverfahren sowie die ganzheitliche Einbeziehung des Fahrzeuglebenszyklus. Die Reduktion der Antriebsenergie, die Verbesserung der Umweltverträglichkeit, die Erhöhung der Sicherheit, der

Zuverlässigkeit und der Lebensdauer und nicht zuletzt die Reduktion der Kosten für Herstellung und Recycling sind Ziele, die die zukünftige Fahrzeugentwicklung entscheidend prägen werden.

Auf einige der aufgeworfenen Fragen wird im vorliegenden Beitrag detaillierter eingegangen.

3. STAND UND ENTWICKLUNG DES ANTRIEBES VON PKW

3.1 AUSGANGSSITUATION DER PKW-ANTRIEBE

Obwohl der öffentliche Nahverkehr stetig verbessert wird, ist der Drang zur individuellen Mobilität ungebrochen. Die hohe eingangs genannte Dichte an PKW je Einwohner macht dies deutlich. Derzeit haben die Verbrennungsmotoren noch einen bedeutenden Anteil an den Zulassungsquoten. Trotz der z.B. in Deutschland hohen Förderung der E-Fahrzeuge (3.000 € des Herstellers, 6.000 € staatliche Unterstützung [23] und 5.000 € in Österreich [67]), verfügten Elektro-PKW laut VDA Verband der Automobilindustrie im Januar 2020 nur über einen Marktanteil von 6,6%. Durch die Höhe der Förderung wird eine komplette oder teilweise Kompensation der Mehrkosten erreicht und der Erwerb der Fahrzeuge erleichtert. Dennoch sind die Neuzulassungen der E-Fahrzeuge begrenzt. Obwohl sich der Anteil der EU-Neuzulassungen an Elektroautos im Vergleich zum Vorjahr verdreifacht hat, besitzen diese Antriebe im 2. Quartal 2020 nur einen Marktanteil von 7,2 % [68].

Bild 4. zeigt eine Vorhersage der Antriebsverteilung bis zum Jahr 2050. Diese Vorhersagen sind mit Vorsicht zu interpretieren, da politische Entscheidungen und technische Neuerungen die prognostizierten Werte stark beeinflussen können. Ein Beispiel hierfür sind die Klimaziele der Europäischen Union, die eine Verringerung der Treibhausgase von 40 % (in der aktuellen Diskussion stehen bis zu 55%) bis 2030 anstrebt [22].

Trotz der zunehmenden Zahlen der elektrisch oder hybridtechnisch angetriebenen Fahrzeuge wird eine deutliche Dominanz der Verbrennungsmotoren in den nächsten 10 bis 20 Jahren erwartet. Dies bedeutet, dass

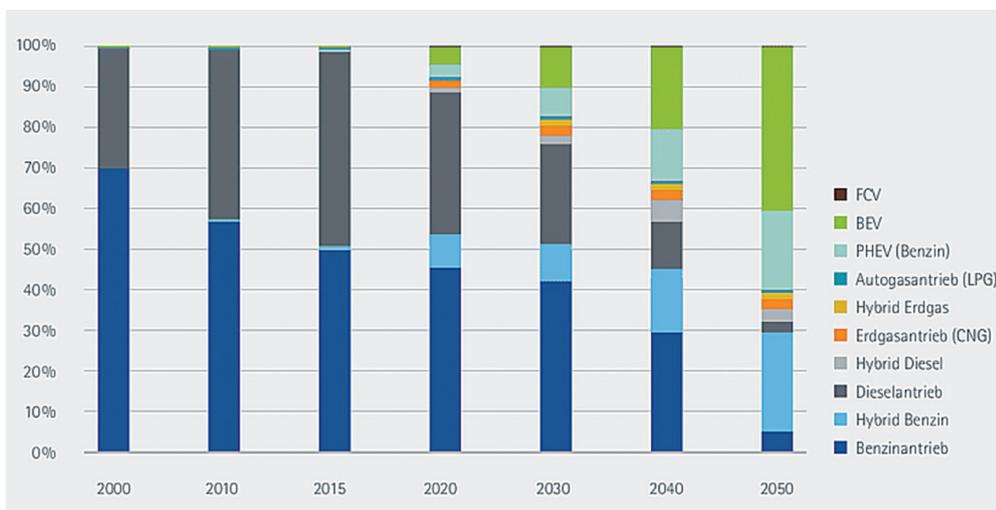


Bild 4. Pkw-Neuzulassungen nach Antrieb in Deutschland (FCV: Brennstoffzelle, BEV: Batterie-Fahrzeug, PHEV: Plug-in-Hybrid, LPG: flüssiges Autogas, CNG: Erdgas) [65]

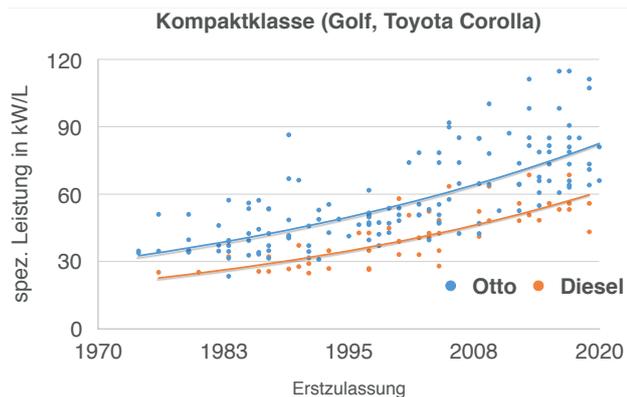


Bild 5. Anstieg der spezifischen Leistung (auf den Hubraum normierte Leistung, kW je Liter Hubraum) der Verbrennungsmotoren, Leistungsdaten nach [21]

komplexe Gussbauteile, wie Zylinderköpfe, Zylinderkurbelgehäuse, Turbinengehäuse der Turbolader usw. weiter wichtige Gussbauteile sein werden.

Diese Bauteile werden durch stetig steigende Beanspruchungen wie Leichtbaumaßnahmen und das sogenannte Downsizing der Motoren stetig wachsenden Beanspruchungen unterworfen. Bild 5. verdeutlicht den permanenten Anstieg der Leistungsdichte der Antriebe durch den Kennwert der Literleistung (Nennleistung normiert auf den Hubraum).

Steigende Beanspruchungen der Gussteile und die geometrische Komplexität zwingen die Hersteller moderner Aggregate innovative Prüftechniken einzusetzen. Ein Beispiel ist hier die 100% computertomographische Prüfung von Al-Si-Zylinderköpfen bei der Firma BMW [9].

Aber auch alternative Antriebsformen wie Batteriefahrzeuge oder Hybride benötigen komplexe, tech-

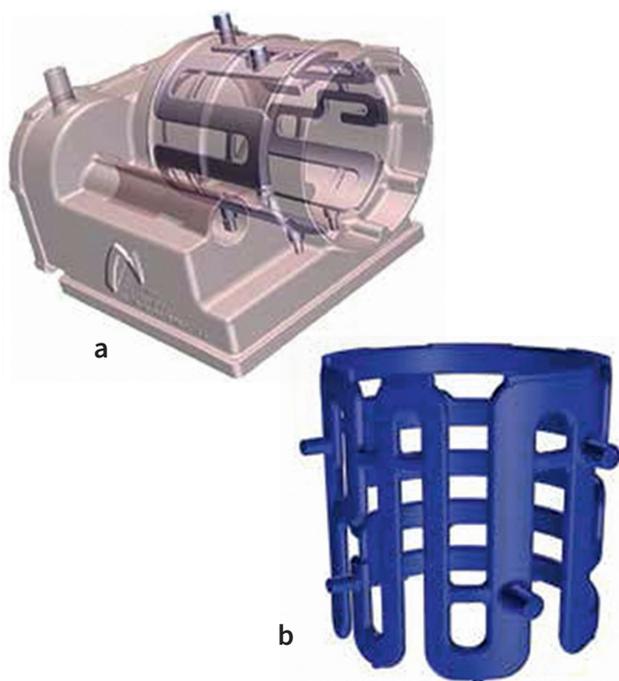


Bild 6. a) Gussteil eines E-Antrieb-Gehäuses b) Kern des eingegossenen Kühlkanals [66]

nologisch anspruchsvolle Gussteile. Insbesondere das Einbringen der Kühlkanäle in die Bauteile ist zu nennen, um die E-Motoren und die schnellladefähigen Batterien und Batteriegehäuse kühlen zu können. Bild 6. zeigt den aufwändigen Kühlkanal eines E-Antriebs für ein Fahrzeug.

3.2 AKTUELLE VERBRENNUNGSMOTOREN

Unbeliebte Begleiter der Massenmobilität sind die ausgestoßenen Abgase und der Energieverbrauch der Motoren. Die Entwicklung der Antriebe ist weltweit durch gesetzliche Vorgaben der Emissionen und Verbräuche geprägt. Schlagworte wie Feinstaub und Stickoxide haben Symbolwirkung für den Umweltschutz erlangt.

Neben dem Ausstoß von Schadstoffen wird, wie eingangs erwähnt, der Ausstoß von Klimagasen entsprechend reglementiert. Moderne Verbrennungsmotoren, auch in Hybridfahrzeugen, müssen demnach ein Minimum an Schadstoffen ausstoßen sowie mit neuen Kraftstoffen betrieben werden, um die CO₂ Emissionen zu verringern bzw. ganz zu unterbinden.

Um die Verbräuche der Motoren allgemein, d.h. durch bessere Wirkungsgrade zu verringern, werden die Verbrennungsräume zunehmend „kleinvolumiger“, wobei die Leistungsdichte der Motoren steigt. Die Tendenz zur steigenden Beanspruchung der direkt mit der Verbrennung in Kontakt stehenden Gussteile ist offensichtlich.

Neben dem Downsizing der Motoren wird intensiv an weiteren Optimierungen der Diesel- und Ottomotoren gearbeitet. Aufgrund der Vielfältigkeit der Entwicklungen sollen nur einige der Schwerpunkte aufgezählt werden. Zu nennen sind beispielhaft:

- ▶ die Reibungsreduzierung durch neue tribologische Systeme, z.B. durch das thermische Spritzen der Laufflächen der Al-Motorenblöcke,
- ▶ die verbesserte Aufbereitung des Brenngemisches, insbesondere durch hohe Einspritzdrücke und höhere Kräfte z.B. in den Gussteilen der Einspritzpumpen,
- ▶ die Großserieneinführung variabler Ventiltriebe mit der wachsenden Komplexität der Zylinderköpfe und Nockenwellentriebe,
- ▶ die Zylinderabschaltung,
- ▶ die Einspritzung von Wasser zur Kühlung der Verbrennung,
- ▶ die weitere Optimierung der Abgasrückführung sowie
- ▶ Maßnahmen zur schnelleren Aufheizung der Abgasnachbehandlung besonders beim Kaltstart der Motoren.

Zum Erreichen der vorgeschriebenen Abgaswerte wird intensiv an Verbrennungsmotoren mit alternativen Brennstoffen gearbeitet. Benzine mit 10% bis 100% Ethanolanteil (E10, E100) oder Diesel mit 7% bis 100% Biodieselanteil (B7, B100), sowie Bio-CNG-Gas sind Stand der Technik. Nach dem Ende der Forschungsarbeiten an H₂-Verbrennungsmotoren vor gut 20 Jahren, gibt es aktuelle Forschungen, Entwicklungen und Pilotumbauten bestehender Nutzfahrzeuge auf den H₂-Gasbetrieb [24-

26]. Zusätzlich werden sogenannten E-Fuels, flüssige synthetische Kraftstoffe erforscht und hergestellt, welche aus der Weiterverarbeitung von H₂ generiert werden [27], [28].

3.3 ALTERNATIVE ANTRIEBE

Einer der Vorteile des Verbrennungsmotors ist die einfache Mitführbarkeit und Nachfüllbarkeit von hohen Energiemengen. Dem steht der Nachteil des Verbrennungsmotors gegenüber, dass der thermodynamische Wirkungsgrad in der Teil-Last gering ist und bei der Verbrennung ungewünschte Emissionen freigesetzt werden. Das Streben nach emissionsfreier Mobilität ist nicht nur eine technische Herausforderung, sondern eine zutiefst emotionale und soziale Aufgabenstellung. Es wird erwartet, dass sich die in Bild 4. dargestellte Verteilung der Antriebsarten evolutionär in Richtung Batterie- und Hybridfahrzeuge entwickelt.

Um die Defizite des Verbrennungsmotors zu kompensieren, werden Hybridantriebe einen hohen Stellenwert erreichen. Die Entsprechung „hybrid“ bedeutet, dass zwei Antriebe, Verbrenner und E-Maschine, optimiert zusammenarbeiten. Hybride erreichen, bei geladener Batterie, emissionsfrei, allein durch den E-Motor zurückgelegte Fahrstrecken. Diese Fahrstrecken sind in der Regel auf kleiner 50 km ausgelegt. Wird ein Nachladen während der Fahrt notwendig, geschieht dies bestpunktnah durch den Verbrennungsmotor. Dies bedeutet, dass der Verbrennungsmotor, bezogen auf die Fahrstrecke, eine geringere Einschaltzeit, aber bei höheren Drücken und Temperaturschwankungen erfährt. Eine, dem Downsizing superpositionierte Erhöhung, der Lasten auf die Bauteile ist das Resultat.

Das beschränkende Element des Hybridfahrzeugs ist die Batterie. Diese Speicher sind kostenintensiv, wobei die veröffentlichten Preise starken Schwankungen unterliegen. Die Speicherfähigkeit der Batterien ist begrenzt, da deren Volumen und Masse im Vergleich zu den gebräuchlichen Kraftstofftanks groß sind. Aus Kosten-, Gewichts- und Volumengründen sind die Batterien der Hybride gezielt auf alltägliche Kurzstrecken, z.B. Fahrten zur Arbeit oder zum Einkaufen, ausgelegt.

Reine E-PKW kommen komplett ohne Verbrennungsmotor aus. Der Nachteil dieser Fahrzeuge sind die kosten- und bauraumintensiven Batterien und die dennoch eingeschränkte Reichweite im Vergleich zu den „Verbrennern“. Auch wenn zukünftige Forschungsergebnisse und die Massenfertigung der Batterien diese effektiver und die Kosten geringer werden lassen, sind die Nachteile gegenüber den Energiedichten flüssiger Treibstoffe nur teilweise ausgleichbar.

Für den Kurzstreckenbetrieb in den Städten haben demnach die Batteriefahrzeuge gute Voraussetzungen. Fahrzeuge mit dem Wunsch nach höheren Reichweiten können durch den Einsatz von Hybridantrieben und den



Bild 7. Übersichtsdarstellung Brennstoffzellenfahrzeug Toyota „Mirai“, nach [29] mit freundlicher Genehmigung von Toyota

Einsatz von vermehrt biologischen (E100, B100) oder synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels) dargestellt werden.

Die Herstellung von synthetischen, klimaneutralen Kraftstoffen erfolgt auf der Weiterverarbeitung von H₂-Gas zu flüssigen Brennstoffen, wobei unerwünschte Verluste anfallen. Bezogen auf den Wirkungsgrad wäre eine direkte Wandlung des H₂ im Wasserstoff-Verbrennungsmotor oder aber auch in der Brennstoffzelle ideal. Welche Technologie im Jahr 2050 überwiegen wird, ist aufgrund der zahlreichen technischen und gesellschaftlichen Einflüsse nicht absehbar. Die bereits heute auf dem Markt verfügbaren Modelle, wie der serienmäßig durch eine Brennstoffzelle angetriebene Hyundai Nexo oder der Toyota Mirai, zeigen erste Erfolge der Brennstoffzellentechnologie. Bild 7. verdeutlicht den Triebstrang eines Brennstoffzellenfahrzeugs im Überblick. Die kalte Verbrennung des H₂ in der Brennstoffzelle hat jedoch Konkurrenz, wie erste Anwendungen von H₂-Verbrennungsmotoren zeigen [24], [26], [69], [70].

4. STAND UND ENTWICKLUNG DER KAROSSERIE VON PKW

Ein Schwerpunkt des Leichtbaus im Automobilbau ist die Weiterentwicklung der Karosserie.

Es ist unbestritten, dass die Karosserieentwicklung vor neuen Herausforderungen und einem zunehmendem Innovationsdruck steht [30-32], deren wesentliche Ziele in einer deutlichen Reduktion des Gewichts (Stichworte Energieverbrauch und Umweltverträglichkeit) und in einer optimalen Integration alternativer Antriebskonzepte (Stichworte: Verbrennungs-, Gas-, Wasserstoff-, Elektro- und Hybridantriebe) bestehen. Das erfordert zukünftig neue Karosseriearchitekturen und neue Entwicklungs- und Konstruktionsprinzipien, die den zukünftigen Mobilitätskonzepten gerecht werden. Derartige Forderungen lassen sich leicht formulieren, wie solche neuen Konzepte aber zukünftig aussehen werden, ist hingegen heute noch nicht klar.

Nachfolgend wird über einige aktuelle Entwick-

lungstrends berichtet, ohne dass ein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird. Die Mobilität entwickelt sich, wie übrigens die meisten ingenieurtechnischen Anwendungen, nach evolutionären Mustern. Es wird immer wieder neue innovative Entwicklungen und Produktverbesserungen geben, die vorhandene Lösungen vom Markt verdrängen. Das einzige „Auto der Zukunft“ mit der einzig möglichen Karosserie wird es daher nicht geben [30].

4.1 EIGENSCHAFTEN UND AUFBAU VON PKW-KAROSSERIEN

Ein klassischer PKW besteht aus den Komponenten Fahrwerk, Antrieb und Karosserie. In den Anfangsjahren der Fahrzeugentwicklung bildete das Fahrwerk das tragende Gerüst, das den Antrieb, die Nutzlast und auch die den Fahrer schützende Außenhaut (Karosserie) aufnahm. Die Karosserie war zunächst kein lasttragendes Element des Fahrzeuges. Das änderte sich seit den 1950er Jahren zunehmend bis zu der heutigen Konstruktionsform, bei der Fahrwerk und Karosserie eine integrale Einheit bilden. Diese nimmt die auf das Fahrzeug wirkenden statischen und dynamischen Lasten auf. Insofern spricht man heute von selbsttragenden Karosserien, wodurch sich ein deutlich geringeres Fahrzeuggewicht, eine höhere Steifigkeit, eine bessere Crash-Sicherheit sowie eine verbesserte Raumnutzung ergeben. Für Jahrzehnte bestanden die PKW - Karosserien aus Stahl. Stahl war kostengünstig zu erhalten, besitzt sehr gute Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften und ist leicht form- und schweißbar. Allerdings lassen sich mit Stahl allein die heute erforderlichen Leichtbaukarosserien nicht realisieren. Der Einsatz neuer Materialien und die Verfügbarkeit verbesserter Fertigungs- und Fügeverfahren hat schließlich zu einer Mischbauweise geführt, bei der unterschiedliche Materialien an den für sie optimalen Positionen zum Einsatz kommen und so zu einer erheblichen Gewichtsreduktion geführt haben. Natürlich enthalten neue Fahrzeuge auch noch Stahlkomponenten, insbesondere aus hochfestem Stahl [33]; hinzu kommen aber optimal eingesetzte Leichtbauwerkstoffe, wie Aluminium- und Magnesiumlegierungen, unterschiedliche Kunststoffe und glas-, kohle- und auch naturfaserverstärkte Kunststoffe (Flachs, Baumwolle, Leinen) [31]. Die in Bild 8. abgebildete Karosserie des neuen Audi A8 besteht beispielsweise aus Aluminium, Stahl, Magnesium und kohlefaserverstärktem Kunststoff [34].

4.2 NEUE WERKSTOFFE FÜR DIE KAROSSERIE

Die Materialauswahl bestimmt maßgebend die physikalischen und technischen Eigenschaften der Karosserie und hat unmittelbar Einfluss auf die Kosten des Bauteiles. Nicht nur das Gewicht, sondern auch die Fahrdynamik, die Sicherheit und der Komfort, das Crashverhalten und

Der neue Audi A8

Audi Space Frame in Multimaterialbauweise
The new Audi A8

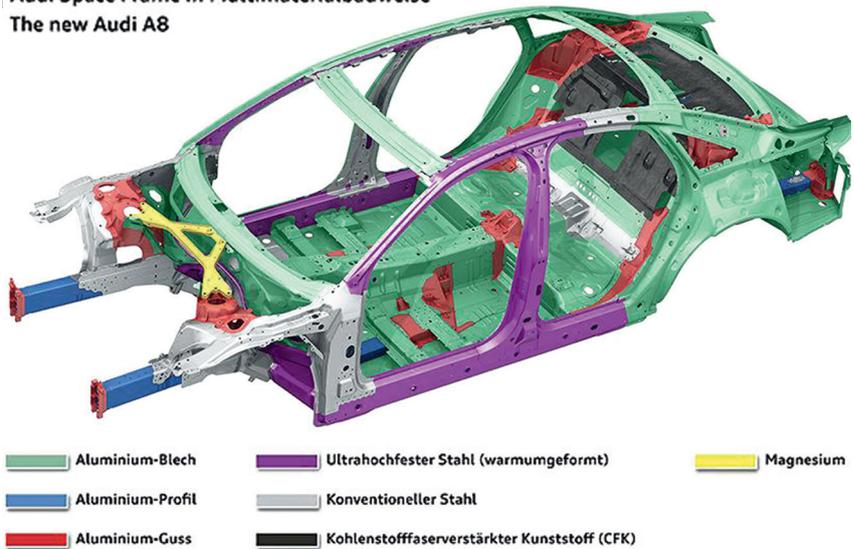


Bild 8. Modulbauweise am neuen Audi A8 [34]

der Kraftstoffverbrauch hängen von den verwendeten Werkstoffen ab.

Kohlefasern gehören zweifellos zu den besten Leichtbaumaterialien, die allerdings wegen ihrer hohen Materialkosten (zirka fünf- bis sechsmal teurer als Stahl), dem Fertigungs- und Verarbeitungsaufwand und den Problemen beim Recycling bisher nur für Premiumfahrzeuge oder für extrem hochbeanspruchte Komponenten (z.B. im Rennsport) zum Einsatz kommen [31]. Eine Ausnahme bildet die sehr leichte Karosserie des Elektroautos BMW-i3. Bei Elektrofahrzeugen spielt der Leichtbau eine entscheidende Rolle, sodass man dort zukünftig für Strukturbauteile verstärkt kohlefaserverstärkte Kunststoffe einsetzen wird, um das hohe Batteriegewicht auszugleichen.

Magnesium ist der leichteste metallische Konstruktionswerkstoff und mit einer Dichte von $1,74 \text{ g/cm}^3$ etwa ein Drittel leichter als Aluminium und damit besonders attraktiv für den Fahrzeugleichtbau. Außerdem ist Magnesium nahezu unbegrenzt verfügbar und seine sehr gute Recyclebarkeit gewährleistet einen nachhaltigen Werkstoffeinsatz. Magnesiumlegierungen, vorzugsweise Mg-Al-Zn, werden gegenwärtig von mehreren Fahrzeugproduzenten für Druckgussbauteile verwendet. Allerdings begrenzen die Kriechneigung, die Korrosionsempfindlichkeit und die geringe Temperaturbeständigkeit den Einsatzbereich [35]. Beim Umgang mit der Magnesium-Schmelze sind besondere Schutzmaßnahmen erforderlich, um eine Oxidation zu verhindern. Die Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen von Magnesium im Fahrzeugbereich werden ausführlich in [36] und [37] analysiert und Anwendungsmöglichkeiten dargestellt.

Aluminium ist heute im Karosseriebau der bevorzugte Leichtbauwerkstoff vor allem wegen der geringen Kosten, der guten Verarbeitbarkeit, den guten Festigkeit- und Steifigkeitseigenschaften und der geringen Korrosions-

neigung [38-39]. Aluminium bietet eine hervorragende Kosten-Nutzenbalance, und es kann prognostiziert werden, dass sein Anteil am Fahrzeug und speziell an der Karosserie weiter zunehmen wird [31 und 35]. Durch die Zusammenarbeit von Werkstoffforschern, Aluminiumproduzenten und Bauteilproduzenten (Umformung, Extrusion, Druckguss) mit den Fahrzeugherstellern wird zukünftig weiteres Potential für den Einsatz von Aluminium erschlossen werden. Dazu gehört die Entwicklung neuer Aluminiumlegierungen, die sich durch verbesserte mechanische Eigenschaften (Festigkeit, Lebensdauer, Verformbarkeit) auszeichnen und großflächige Karosseriestrukturen mit geringeren Wandstärken erlauben. Der Anteil an Druckgussbauteilen wird auch im Karosseriebau weiter zunehmen [40-41]. Eine treibende Kraft werden die Leichtbauanforderungen von E-Fahrzeugen sein. Auch die Entwicklung und der Einsatz neuer und verbesserter Verbindungstechniken (Schweißen, Kleben, Löten) werden zu neuen Leichtbaulösungen beitragen. So ist zu erwarten, dass zukünftig Aluminium auch für die Außenhaut der Karosserie zum Einsatz kommen wird [42].

Kunststoffe sind sehr leichte Materialien und können zur Gewichtsreduktion beitragen, wenn sie als nicht lasttragende Bauteile, wie Verkleidungen, eingesetzt werden. Der werbewirksame, aber wohl nicht ganz ernstgemeinte Titel des Beitrags „Das Auto der Zukunft besteht aus Kunststoff“ [43] zeigt einige interessante Anwendungen des Werkstoff Polycarbonat, z.B. für die Rundumverkleidung von Fahrzeugen. Hingegen lassen sich mit Kunststoffbauteilen in Sandwichbauweise mit einem extrem leichten zellularen Kern (z.B. Schaumstoff) auch sehr leichte, lasttragende Strukturbauteile herstellen [30], [44].

4.3 MISCHBAUWEISE VERSUS KOMPAKTBAUWEISE

Moderne Karosserien bestehen heute überwiegend aus einer Mischbauweise/Modulbauweise, die zur deutlichen Gewichtsreduzierung von Karosserien geführt hat. Hierzu ist in der jüngeren Vergangenheit umfangreich berichtet worden [5]. Das Bild 8. zeigt, wie bei der Karosserie des neuen AUDI A8 die unterschiedlichen lokalen Anforderungen an das Bauteil durch einen Materialmix und die Kombination unterschiedlicher Fertigungsverfahren so gelöst wurde, dass die jeweiligen Anforderungen optimal erfüllt werden. Ein solches Multi-Material-Design wurde erfolgreich bereits vor mehr als 10 Jahren im EU-Projekt Super Light Car (SLC) umgesetzt, getestet und bewertet [45]. Die naheliegende Idee eines Multi-Material-Designs besteht darin, jedes verfügbare Leichtbaumaterial so in einer Konstruktion einzusetzen, dass für jede Funktion das am besten geeignete Material genutzt wird. Als ein zusätzliches, ausschlaggebendes Ziel muss die Entwicklung aber auch zu einem kosteneffektiven Design führen. Aus einem solchen Multi-Material-Mix resultiert eine Viel-

zahl unterschiedlicher Materialschnittstellen, die prozesssicher und wirtschaftlich realisiert werden müssen [32]. Das erfordert geeignete und zuverlässige Fügeverfahren und die dazugehörigen Montagetechniken, die üblicherweise von Robotern übernommen werden. Bei unterschiedlichen Metallen ist durch Potentialtrennung eine Kontaktkorrosion zu verhindern. Weiterhin ist den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Materialien Rechnung zu tragen. Nicht zu vergessen sind die in vielen Bereichen erforderlichen Abdichtungen gegen Feuchtigkeit [46].

In [5] wurde darauf hingewiesen, dass zukünftig eine Integration von mehreren Komponenten zu einem großen Aluminiumdruckgussteil zu maßgeblichen wirtschaftlichen Vorteilen führen würde. Die Autoren stellen allerdings fest, dass die bisherigen Produktionserfahrungen im Druckgussbereich und die fehlende Ausstattung der Gießereien mit den erforderlichen großen Druckgießmaschinen dieser Entwicklung noch im Wege stehen. Nun hat Tesla angekündigt, zukünftig die Karosserie des Tesla Models Y zunächst nur aus vier, später aus nur einem Stück im Aluminiumdruckguss zu produzieren [47]. Im Bild 9. ist die Heckstruktur des Tesla Model Y dargestellt, die demnächst als eine Komponente im Druckguss hergestellt werden soll [49].

Tesla hat sich dazu eine große Druckgießmaschine patentieren lassen [48] und im Frühjahr 2020 bereits zwei dieser weltgrößten Anlagen vom italienischen Hersteller IDRA, der diese Anlagen etwas irreführend als Giga-Pressen bezeichnet, angeschafft. In Berlin-Grünheide sollen sogar 8 dieser Giga-Pressen aufgestellt und auch der vordere Teil des Rahmens für das Model Y in einem Stück produziert werden, wie Tesla im September 2020 berichtet hat [50]. Tesla verspricht sich von diesem Fertigungsschritt eine Einsparung im Karosseriebau von 30% sowie eine Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit. Darüber hinaus wurde von Tesla eine Gewichtsreduktion der Karosserie und dadurch eine Erhöhung der Reichweite der E-Fahrzeuge angekündigt. Eine höhere Verwindungssteifigkeit soll für eine gesteigerte Sicherheit bei einem Unfall sorgen. Es ist unstrittig, dass die Kompaktbauweise die Teilevielfalt drastisch einschränkt, dadurch den Montageaufwand erheblich reduziert, in der Fertigung Platz für Montageroboter einspart und die Logistik der Bereitstel-

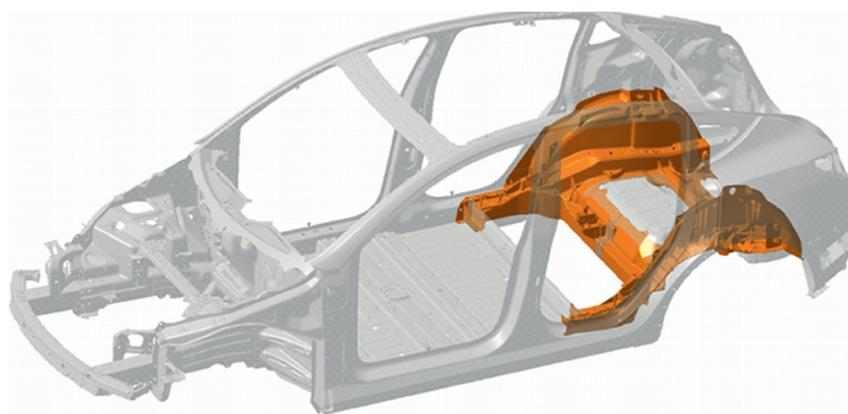


Bild 9. Heckstruktur (orange) des Tesla Model Y als ein Al-Druckgussteil [49]

lung von Einzelteilen vereinfacht. Die deutlichen Einsparungen bei der Montage sind sicher der größte Vorteil der Kompaktbauweise. Dem stehen aber auch offensichtliche Nachteile gegenüber, beispielsweise bei der Reparatur von Unfallschäden. Ein Problem bei der Fertigung der extrem großen Aluminiumdruckgussteile besteht darin, den Ausschuss zu begrenzen und Qualität der Bauteile sicher zu erreichen [51]. In diesem Zusammenhang sei auf das für Druckgussteile unvermeidliche Problem der Poren hingewiesen, die zu einer Verringerung der Bauteilfestigkeit und der Lebensdauer führen [52]. Bei sehr großen Bauteilen kommt es mit Sicherheit auch zu erhöhten Wandtemperaturen der Druckgießform, sodass es beim Auftragen eines Trennmittels infolge des Leidenfrost-Phänomens zur unerwünschten Verdampfung kommen kann [53]. In einem lesenswerten Interview relativiert H. Timm, langjähriger Leiter des Audi-Leichtbauzentrums, die Aussagen von Tesla zur Kompaktbauweise und vergleicht sie mit der für den Audi A8 entwickelten speziellen Mischbauweise (Audi Space Frame) [54]. Er stellt hinsichtlich der Aussage von Elon Musk, 70 Stanzteile durch vier Aluminium-Druckgussteile zu ersetzen, fest, dass damit nicht die gesamte Karosserie, sondern etwa nur ein Drittel der Teile einer modernen Karosserie angesprochen werden. Er erwähnt, dass auch Audi bereits ein Drittel des Karosseriegewichts in Aluminium-Druckguss realisiert hat. Timm schätzt das Ziel von Tesla aber als ambitioniert und durchaus realistisch ein und stellt fest, dass die Bezeichnung „Karosserie aus einem Stück“ mit Sicherheit genügend Raum zum Einsatz anderer Materialien oder Halbzeuge lässt. Das stellt für Timm primär eine „Marketingaktion“ dar.

Welche Technologie sich im Wettbewerb um die „beste“ Karosserie durchsetzt oder ob es wechselseitige Annäherungen geben wird, ist noch offen. Auf jeden Fall werden die Arbeiten von Tesla wichtige Impulse und einen Entwicklungsschub für die Druckgießtechnologie und alle damit im Zusammenhang stehenden fachlichen und wirtschaftlichen Fragen auslösen.

4.4 SIMULATIONSMETHODEN

Für die Entwicklung neuer Fahrzeuge und deren Bauelemente werden heute durchgängig computergestützte CAx-Methoden genutzt, die es auf der Grundlage virtueller Modelle ermöglichen, die zukünftigen realen Produkteigenschaften wirklichkeitsnah nachzubilden, zu analysieren und zu optimieren. Eine ausführliche Analyse des Standes der Entwicklung findet sich in [5], [55-57]. Im Zusammenhang mit der Elektrifizierung stellt sich die Frage nach der Unterbringung und der Integration der schweren, kompakten Batterie in der Karosserie. Dadurch ändert sich das Strukturverhalten eines Fahrzeugs bezüglich Festigkeit, Steifigkeit, Fahrdynamik, Akustik und Sicherheit (Crash) drastisch und stellt neue Anforderungen an die Simulation und die Optimierung der Karosserie.

Die Mischbauweise und der Einsatz neuer und weiterentwickelter Materialien und Materialverbunde im Karosserieleichtbau erfordern den Materialmix und die Verbindungsverfahren im Berechnungsprozess zuverlässig zu beherrschen und sicher in der Simulation

anzuwenden. Hier erfüllen die heute FEM-basierten Simulationsmethoden noch nicht alle Erwartungen. Bei der von Tesla verfolgten Kompaktbauweise der Karosserie stellt sich die spannende Frage, ob es gelingt, die avisierte bionische Karosserieform so zu gestalten, dass sie im Aluminiumdruckguss produziert werden kann. Eine Kombination aus Topologie- und Formoptimierung unter Beachtung einer Vielzahl von Nebenbedingungen und mehreren gegenläufigen Zielfunktionen (Pareto-Optimalität) mit den vorhandenen Simulationswerkzeugen auf der Basis der FEM zu lösen, stellt eine große Herausforderung dar [5].

Die Simulation beherrscht heute die gesamte Fahrzeugentwicklung und ist multidimensional. Die physikalischen Teildisziplinen, wie Mechanik (Statik, Festigkeit, Dynamik), Elektrik (E-Maschine), Strömung, Akustik, Temperatur und Wärmeleitung, Elektronik, Steuerung und Softwareintegration durchdringen sich gegenseitig und beeinflussen wechselseitig den gesamten Entwicklungsprozess. Dabei gibt es offene Fragen vor allem im Hinblick auf genormte Schnittstellen und geeignete Datenaustauschformate, die die Voraussetzungen für einen durchgängigen Simulationsprozess darstellen, durch den es erst ermöglicht wird, die große Systemkomplexität eines Fahrzeuges zu beherrschen.

5. STAND UND ENTWICKLUNG DES FAHRWERKS VON PKW

5.1 DEFINITION DES BEGRIFFS „FAHRWERK“

Als Fahrwerk bezeichnet man die Gesamtheit aller Teile eines Landfahrzeugs, die eine Verbindung des Fahrgestells über die Räder zur Fahrbahn herstellen (nach [58]).

Neben Antrieb und Fahrzeugaufbau ist das Fahrwerk ein Hauptbestandteil des Automobils. Es besteht aus Rädern, Radträgern, Radlagern, Bremse, Radaufhängung, Fahrschemel, Federung inklusive Stabilisator, Dämpfung und Lenkung [59].

Aus der Sicht der Veröffentlichung in einer Gießereifachzeitschrift interessieren vorwiegend diejenigen Teile des Fahrwerks, die durch Urformen fertigbar sind.

In den letzten Jahren hat sich eine vielfältige Entwicklung wesentlicher Bauteile von Fahrwerken vollzogen: Insbesondere ging es dabei um einen Wettbewerb verschiedener Fertigungsverfahren und Werkstoffe (**Bild 10.**). Als Beispiele seien genannt:

- ▶ Für Vorderachsen: Druckgussteile aus Al, Al-Schweißteile, Stahl-Schweißteile, Al-Schmiedeteile, Al-Gussteile aus verlorenen Formen oder Kokillenguss, GJS-Gussteile, GS-Teile, Stahlschmiedeteile, mehrschalige Stahlblechteile (verschweißst) und einschalige Stahlblechteile sowie
- ▶ Für Hinterachsen: Stahlrohr, Stahlschweißteile, Stahlschmiedeteile, Stahl-Profile, Al-Schmiedeteile, Stahl-Tiefziehteile, Al-Strangpressprofile, Al-Gussteile, GJS-Teile, Stahl-Stanzteile, Al-Druckgussteile, Al-Schmiedeteile.

Die verschiedenen Varianten der Bauteile für das Fahrwerk werden hinsichtlich der Kosten, des Gewichts und

Audi A6 Limousine

Fünflenker-Hinterachse
Five link rear suspension
05/18

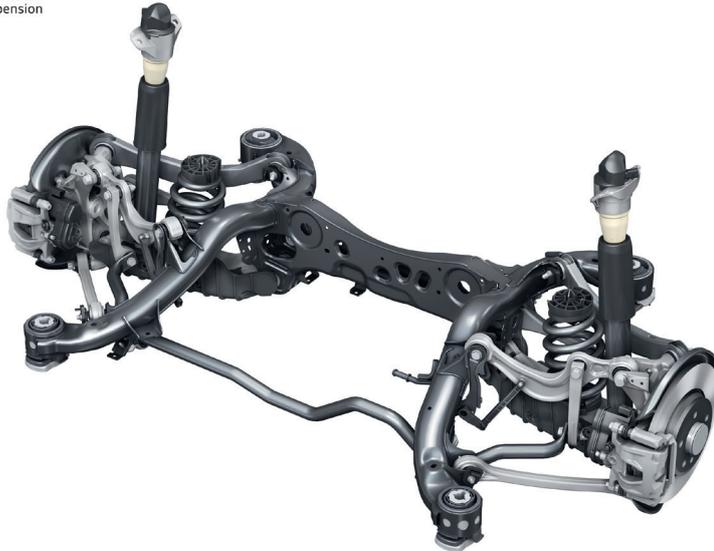


Bild 10. Fünflenker-Hinterachse der AUDI A 6 Limousine zeigt die Verwendung verschiedenster Materialien und Teile, nach unterschiedlichen Verfahren gefertigt

der Umweltwelteinflüsse gegeneinander bewertet und ausgewählt [60]. Durch die Weiterentwicklung der Fahrwerkselemente und durch ein immer besseres und tieferes Verständnis der Fahrzeug- und Zuliefererindustrie für das komplexe Zusammenwirken dieser Komponenten konnten gerade in den letzten zwei Jahrzehnten große Fortschritte in der Qualität und den Eigenschaften von Fahrwerken erzielt werden. Dazu trugen aber auch immer leistungsfähigere Entwicklungswerkzeuge, Materialien und Herstellverfahren bei. Die Autoren in [61] sprechen von einem mittlerweile „hohen erreichten Niveau mechanischer Intelligenz“ in der Fahrwerksentwicklung.

5.2 ZUR ENTWICKLUNG DES FAHRWERKS

Nach [62] ist Leichtbau ist fürs Chassis eine echte Chance: „Natürlich müssen auch wir als Fahrwerkentwickler einen Beitrag zu Zero Emission leisten.“ Immer mehr Leichtbaumaterialien rückten in den Fokus. „Wir sehen das Thema Werkstoffsubstitution vor uns, es kommen neue Materialien statt dem Klassiker Stahl auf uns zu: Thermoplaste,

Duroplaste, endlosfaserverstärkte Kunststoffe, GFK, CFK, aber auch Aluminium und unterschiedliche höchstfeste Stähle. Um das Ganze noch ein bisschen komplexer zu machen, kombiniert man diese Werkstoffe zu Hybriden – als Sandwich-Bauweise etwa.“[25]

Ein eindrucksvolles Beispiel der Variantengenerierung und -bewertung ist in [63] für einen Federbeindom dargestellt, der aus insgesamt 11 Einzelteilen besteht. **Bild 11.** gibt dieses Beispiel in sehr anschaulicher und didaktisch vorbildlicher Weise wieder. Jedoch wird auch hier das Grundproblem derartig hybrider Konstruktionslösungen erkennbar: Das Recycling der genutzten Teile wird nicht einfacher.

Zur Entwicklung der Fahrwerke von PKW gibt es zahlreiche Veröffentlichungen [61, 62, 64]. Der Grundtenor dieser Veröffentlichungen ist, dass die Fahrwerksentwicklung den Spagat zwischen erprobten, hervorragend funktionierenden Techniken auf der einen Seite und den Herausforderungen durch neue Antriebs- und Fahrzeugkonzepte auf der anderen Seite zu bewerkstelligen hat. Besonders in [64] wird auf die vielfältigen Aspekte hingewiesen, denen die Fahrwerksentwickler zu folgen haben und die sie beachten müssen (Sicherheit, Dynamik, Komfort).

Eine technische Revolution auf dem Fahrwerkssektor ist durch den Einsatz leistungsfähiger, vernetzter Fahrwerkregelssysteme abzusehen. Dabei spielt das Thema der zeitlichen und räumlichen Vorausschau für Fahrspurführung und Fahrbahnunebenheiten eine große Rolle. Das hohe mechanische Ausgangsniveau bleibt dennoch die unverzichtbare Basis der Fahrwerksabstimmung, auch wenn unter den neuen technischen Randbedingungen der Kompromisszwang für die konventionellen, passiven Teile des Fahrwerks gegenüber heute reduziert sein wird [64].

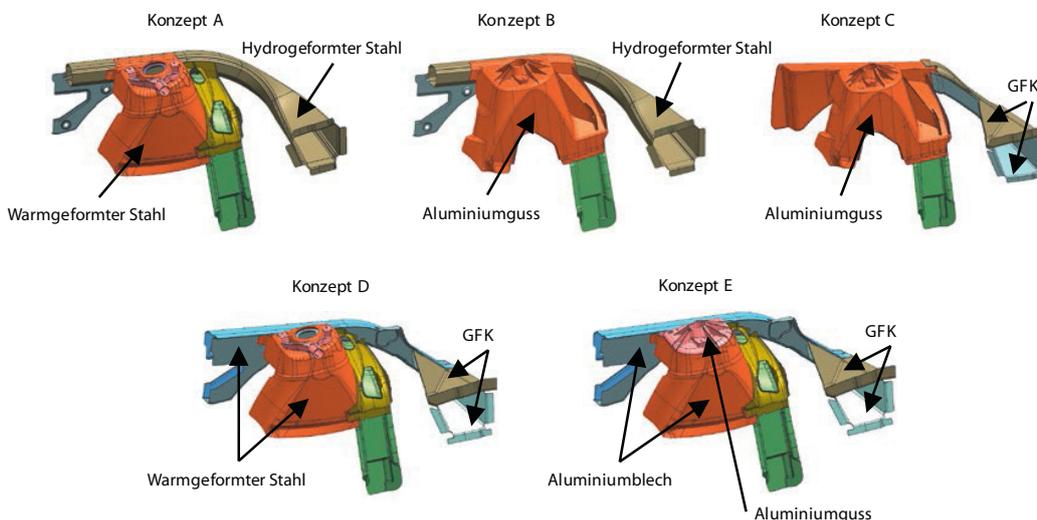


Bild 11. Auskonstruierte CAD-Konzepte als Ergebnis der Konzeptentwicklung für einen Federbeindom (© Opel) [63] mit freundlicher Genehmigung von Opel-Vauxhall

6. ZUSAMMENFASSUNG

Wegen der hohen gesellschaftlichen Relevanz der PKW ist die weitere Entwicklung für breite Schichten der Bevölkerung von herausragendem Interesse. Die Interessen gehen dabei von absolutem Verzicht bis zu unverzichtbarem Wert für einen Teil der Nutzer. In Übereinstimmung mit der gesamtgesellschaftlichen Entwicklung zeigen sich zahlreiche Tendenzen der künftigen Gestaltung und Ausführung der Fahrzeuge. Deutlich erkennbar und mit hoher Wahrscheinlichkeit der Realisierung können folgende Entwicklungsrichtungen angenommen werden: Verringerung der Nutzung der Verbrennungstechnik für den Antrieb und zunehmende Substitution durch elektrische Antriebe, damit verbunden ist die entscheidende Verminderung der Umweltbelastung durch Abgase (wenn es gelingt, Elektroenergie auf anderem Weg als durch Verbrennungskraftwerke zu erzeugen).

Auch andere Wege für progressive Antriebe erscheinen aussichtsreich (z.B. durch die Brennstoffzelle). Die weitere Forschung wird Aufschluss über die zweckmäßigste Antriebform liefern.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird die Automatisierung des Fahrens weiter an Bedeutung gewinnen, auch wenn ehemals sehr forsche Vorstellungen über die Geschwindigkeit dieses Prozesses wegen der Sicherheitsaspekte wohl einen größeren Zeitraum annehmen werden als ehemals gedacht.

Eindeutig erkennbar ist, dass die PKW noch für einen langen Zeitraum den individuellen Verkehr entscheidend bestimmen werden. Sie werden auch in Zukunft eine der wesentlichen Verbraucher von Gussteilen sein.

LITERATUR:

- 1 Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2020
Kraftfahrtbundesamt Flensburg
Pressemitteilung 6/ 2020 vom 02.03.2020
- 2 Bundesanstalt für Statistik Österreich Wien
Kfz-Bestand 2019
Letzte Änderung 18.08.2020
- 3 Dedy, H.
Hauptgeschäftsführer Deutscher Städtetag
Internetauftritt 04.09.2020
- 4 Autorenkollektiv
Trautes Heim, Job allein
DER SPIEGEL Nr. 37, 05.09.2020
- 5 Ambos, E. und Gabbert, U.
Leichtbau im Automobilbau- eine komplexe Aufgabe für Konstrukteure, Technologen und Werkstoffspezialisten
GIESSEREI-RUNDSCHAU, Wien (2018), H. 3, S 18 - 26
- 6 Puls, T.
CO₂-Regulierung für Pkw, Fragen und Antworten zu den europäischen Grenzwerten für Fahrzeughersteller
Institut der deutschen Wirtschaft, 2013.
- 7 Anonym
Mitteilung Kraftfahrt-Bundesamt Flensburg,
Marktübersicht Rückrufe
07.09.2020

- 8 Rösch, R., Hansen, F., Jeltsch, F Körtge-Sudmann, S.
Two Year's Experience with Helix Atline Computer Tomography (CT) and VG Inline at Volkswagen Foundry Hanover
Anniversary Forum of Volume Graphics Japan, 27. Oktober 2015, Nagoya, Japan
- 9 Schlotterbeck, M., Fritsch, C., Sievers, T. und Christian Wojek, C.
Inline-Computertomographie zur automatisierten Bauteilbewertung im Takt der Fertigung
tm – Technisches Messen 2020; 87(2): 122-129
- 10 Heikel, C. und Ambos, E.
High-Speed Computer Tomography: Pressure Die Casting
Encyclopedia of Aluminium and Its Alloys, First Edition, S. 1173 – 1185
- 11 Ambos, E., Nawrocki, J. und Rohland, B.
Die Digitalisierung der Gussfertigung – Gegenwärtiger Stand, aktuelle Aufgaben und Zukunftserwartungen
GIESSEREI-RUNDSCHAU 67 (2020) 02, S. 17 – 23
- 12 FA 04
Im Automobilbau zählt jedes Gramm
Innovative Lösungen mit Rohren und rohrähnlichen Profilen verringern Kosten und Gewicht
Internet-Anzeige für die Düsseldorfer Messe „Tube“ vom 07.-11.12.2020
- 13 Gayko, H.
Bessere Qualität durch optische Oberflächenprüfsysteme
GIESSEREI 107 (2020) 03, S. 53 – 55
- 14 Larsen, P.
Wirtschaftliche und flexible Fertigung von Aluminiumgussteilen im Grünsandverfahren
GIESSEREI 107(2020) 5-6, S. 73 – 77
- 15 Schuster, S.
Industrielle Umsetzung hybrider Fertigungsverfahren
GIESSEREI 107 (2020) 7 – 8, S. 74 – 75
- 16 Fecht, N.
Zündende Ideen
AUTOMOBIL PRODUKTION (2020), 01, S. 46 – 47
- 17 Internetauftritt der Bundesregierung
08.09.2020
- 18 Nedeljakovic, M.
Wir brauchen einen kühlen Kopf und eine ruhige Hand
AUTOMOBIL PRODUKTION (2020), 01, S. 26 – 29
- 19 Rüger, M. und Janssen, R.
Der Transformationsdruck ist angekommen
AUTOMOBIL PRODUKTION (2020), 01, S. 32 – 33
- 20 Piterek, R.
GIGA – Strukturguss für Modell Y
GIESSEREI 107 (2020), 7 – 8, S. 30 – 31
- 21 Anonym
www.ADAC.de, abgerufen am 02.09.2020
- 22 Anonym
EU-Kommission will Klimaziel für 2030 verschärfen
Zeit-Online. Zeitverlag Gerd Bucerius GmbH & Co. KG.
Hamburg 07.09. 2020
- 23 Anonym
Förderung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen
BAFA Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.
Merkblatt. 25. Juni 2020

- 24 Pauer, T.; Weller, H.; Schünemann, E.; Eichseder, H.; et al.
H₂ ICE für zukünftige PKWs und leichte Nutzfahrzeuge
41. Internationales Wiener Motorensymposium.
Fortschritt-Berichte VDI Nr. 813, 2020
- 25 Friedrich, T.
Grüner Wasserstoff für 1,50 €/kg
VDI Nachrichten. VDI Verlag Düsseldorf 10.06.2020
- 26 Koch, D.; Ebert, T.; Sousa, A.
Transformation vom Diesel zum H₂-Hoch-AGR-
Magerkonzept
MTZ. Motortechnische Zeitschrift. Springer Vieweg. Mai
2020, S. 30 – 38
- 27 Seidenspinner, P.; Gorall, T.; Wilharm, G.
Synthetische Kraftstoffe gegen Klimawandel und für die
Reinhaltung der Umwelt
41. Internationale Wiener Motorensymposium. Fortschritt-
Berichte VDI Nr. 813, 2020
- 28 Urbansky, F.
Potenziale synthetischer Kraftstoffe
MTZ. Motortechnische Zeitschrift. Springer Vieweg. Januar
2020, S. 8. – 13
- 29 Anonym
Brennstoffzellenauto – Das Auto der Zukunft, Toyota Mirai,
Internetauftritt vom 6.10.2020
<https://www.toyota.de/automobile/brennstoffzellenautos>
- 30 Kaiser, O.S., Eickenbusch, H., Grimm, V., Zweck, A.:
Zukunft des Autos, VDI Technologiezentrum GmbH,
Zukünftige Technologien Nr. 75, Düsseldorf, im Januar
2008 ISSN 1436-5928, 68 Seiten.
- 31 Atkinson, K.:
The Biggest Design Trends for the Automotive Industry
2020, May 2020,
see: <https://matmatch.com/blog/the-biggest-design-trends-for-the-automotive-industry-2020/>
- 32 Beuthner, A.:
Innovationsdruck, Automobil Produktion, 03_2019, Seiten
58-59.
- 33 Schulz, T., Müller, T.:
Stahlsortenvielfalt im Automobilsektor, Konstruktion, Nr.
9, 2020, IW2-IW5.
- 34 Anonym:
Blick aufs Blech: So wird der neue Audi A8, Internetauftritt
vom 17.05.2017,
<https://pressfrom.info/de/nachrichten/auto/-34673-blick-aufs-blech-so-wird-der-neue-audi-a8.html>
- 35 Oktav, A.:
New trends and recent developments in automotive
engineering, in Arapgirlioglu, H., Atik, A., Elliott, R.,
Turgeon, E. (Eds): Research on Science and Art in 21st
Century Turkey, Taschenbuch, November 2017, pp. 2976-
2987.
- 36 Lehnert, F., Kalke, S., Scheer, J., Seethaler, L., Dörnborg,
F.T.H.:
Einsatz von Magnesium im Automobilbau,
ATZ 10, 2002, Jahrgang 104, Seiten 910-918.
- 37 Kumar, D. S., Sasanka, C. T., Ravindra, K. N., Suman, K. N.
S.:
Magnesium and Its Alloys in Automotive
Applications–A Review, American Journal of Materials
Science and Technology, (2015) Vol. 4, No. 1
pp. 12-30, doi:10.7726/ajmst.2015.1002.
- 38 Hirsch, J.:
Aluminum in innovative light-weight car design, Materials
Transactions, Vol. 52, No. 5, 2011, pp. 818-824.
- 39 Hirsch, J.:
Recent development in aluminium for automotive
applications, Trans. Nonferrous Met.
Soc. China 24(2014) 1995–2002.
- 40 Keidis, A., Knothe, W.:
Fahrzeugleichtbau mit Gusseisen und Aluminium,
GIESSEREI 104(2017)10, S. 48-50.
- 41 Schruoff, I.:
Automobiler Leichtbau mit Strukturbauteilen aus
Druckguss, GIESSEREI 102(2015)02, S. 84 – 89.
- 42 Anonym:
Megatrend Leichtbau, neue Werkstoff- und
Prozessentwicklungen aus und mit Aluminium,
Ankündigung der Aluminium-Messe: Aluminium 2021 vom
18. – 20. Mai 2021 in Düsseldorf,
<https://www.aluminium-exhibition.com/de/ALUMINIUM/Automotive/777/>
- 43 Anonym:
Das Auto der Zukunft besteht aus Kunststoff (2017),
<https://www.plastverarbeiter.de/69520/das-auto-der-zukunft-besteht-aus-kunststoff/>.
- 44 Kunststoffe im Automobilbau - Tagungsband 2015;
VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf 2015.
- 45 Goede, M., Stehlin, M., Rafflenbeul, L., Kopp, G., Beeh, E.:
Super Light Car—lightweight construction
thanks to a multi-material design and function integration,
Eur. Transp. Res. Rev. (2009), 1, pp. 5–10,
DOI 10.1007/s12544-008-0001-2.
- 46 Merks, V.:
Karosserie, quo vadis - CSI Entwicklungstechnik GmbH,
[https://www.csi-online.de/fileadmin/yag/Referenzen_PDFs/csi_referenzen_rie_062015_01_QUO_VA DIS.pdf](https://www.csi-online.de/fileadmin/yag/Referenzen_PDFs/csi_referenzen_rie_062015_01_QUO_VA_DIS.pdf)
- 47 Wittich, H.:
Revolutioniert Tesla den Karosseriebau?: Model Y und Co.
aus nur noch vier Teilen,
https://www.freenet.de/auto/neuheiten/revolutioniert-tesla-den-karosseriebau-model-y-und-co-aus-nur-noch-vier-teilen_7915400_4717844.html vom 9.08.2020.
- 48 Lambert, F.:
Tesla has a giant new machine to produce the Model Y
frame in almost one piece, Jul. 23rd 2019,
<https://electrek.co/2019/07/23/tesla-giant-machine-produce-model-y-body-one-piece/>
- 49 Anonym:
Tesla präsentiert neue Heck-Struktur von Model Y, 3. Mai
2020,
<https://teslamag.de/news/tesla-praesentiert-heck-struktur-model-y-musk-revolution-in-fertigung-28240>
- 50 Anonym:
Exklusiv: Tesla will bei deutschem Model Y vorderes
Rahmen-Teil an einem Stück gießen,
18. September 2020, <https://teslamag.de/news/exklusiv-tesla-deutsches-model-y-vorderes-rahmen-teil-guss-an-einem-stueck-29990>
- 51 Ambos, E., Müller, E.:
Ein halbes Dezennium Prozessforschung
beim Druckgießen unter Nutzung schneller
Computertomografen – Eine Bilanz,
GIESSEREI-PRAXIS (2016)1/2, S. 54 – 61.

- 52 Duczek, S., Berger, H., Ambos, E. und Gabbert, U.,
Eine neue Methode zur Berücksichtigung des Einflusses
der Porosität in Al-Druckgussteilen auf die Festigkeit – Ein
Beitrag zum Leichtbau,
GIESSEREI RUNDSCHAU, Wien 62 (2015),9/10, S. 222 – 227.
- 53 Skidmore, N.: Wasserfreie Formtrennmittel, GIESSEREI
107, 09, 2020, Seiten 49-50.
- 54 Günnel, T.:
Leichtbau-Experte: Karosserie aus einem Guss: „Eine
schöne und lohnenswerte Aufgabe“,
Interview mit Heinrich Timm, Mitglied des Vorstands
Composites United e.V. und langjähriger Leiter des Audi-
Leichtbauzentrums, siehe
<https://www.fahrzeug-karosserie.de/karosserie-aus-einem-guss-eine-schoene-und-lohnenswerte-aufgabe-a-957640/>.
- 55 Beuthner, A.:
Exakt wissen statt schätzen,
Automobil Produktion, 03/2017, Seiten 52-53.
- 56 Kopp, G., Beeh, E., Schöll, R., Kobilke, A., Straßburger, P.,
Kriescher, M.:
New lightweight structures for advanced automotive
vehicles – safe and modular, Procedia - Social and
Behavioral Sciences, 48 (2012), pp. 350 – 362.
- 57 Hielscher, C., Grenz, J., Camberg, A. A., Wingenbach, N.:
Ansatz zur effektiven Auslegung von Hybridbauteilen,
ATZ, 07-08, 2020, 122. Jahrgang, Seiten 60-65.
- 58 Anonym
Fahrwerk
WIKIPEDIA, letzte Fassung vom 5.8.2020
- 59 Kinzer, F. (Hrsg.)
Kfz-Fahrwerk
5. Auflage. Transpress, Verlag für Verkehrswesen, Berlin
1987
- 60 Refvi, S.; Tamm, C.; Thirunarukkarasu, D. und Timmer, A.
Methodik zur Identifizierung von Leichtbaulösungen in
Fahrzeuganwendungen
ATZ 122(2020)06, S. 62 – 67
- 61 Stefan Schlott, S. und Eisenkrämer, S.
Wie sich die Fahrwerktechnik weiterentwickelt
Fahrwerk-Handbuch 5. Auflage Springer Verlag 2017
- 62 Klein, H.
Die Autoindustrie ist im Sinne der Agilität gefordert
Springer-Professional-Interview mit dem Leiter
Fahrwerktechnik von ZF 02.05.2018
- 63 Pfeffer, P.
Interview: Neue Entwicklungsmethoden für das Fahrwerk
ATZ 115 (2013) 06, S. 467
- 64 Heißing, B. et al.
Fahrwerk-Handbuch
Kapitel 9. Zukunftsaspekte des Fahrwerks
© Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien
Wiesbaden GmbH 2011
- 65 Hobohm, J.; et al.: Auf der Maur, A.; Dambeck, H.; et al.
Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der
Energiewende.
Prognos AG Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-
und Energietechnik. DBFZ
Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige
GmbH. Mai 2018
- 66 Feikus, F., J.; Heiselbetz, C.
E-Mobilität – Herausforderungen für den Aluminiumguss.
GIESSEREI 105. April 2018, S. 70
- 67 Anonym
Elektroautos und E-Mobilität – Förderungen und
weiterführende Links
<https://www.oesterreich.gv.at>, Österreichische
behördenübergreifenden Plattform, abgerufen am
11.10.2020
- 68 Anonym
Neuzulassungen in der EU-Anteil der Elektroautos
verdreifacht
<https://www.tagesschau.de>, Tagesschau, abgerufen am
11.10.2020
- 69 Anonym
Es gibt genügend Gründe, Verbrennungsmotor und
Wasserstoff zu kombinieren
<https://www.keyou.de/technologie/>, KEYOU GmbH
München, abgerufen am 6.10.2020
- 70 Winterhagen, J.
H2 in der Brennkammer
VDInachrichten Nr. 42 vom 16.10.2020

FACHBEITRÄGE & KURZINFORMATIONEN

Proguss-Austria Mitglieder sind jederzeit eingeladen, der Redaktion Fachbeiträge zu Schwerpunktthemen für die GIESSEREI RUNDSCHAU zu senden.

Chefredaktion: Mag. Dietburg Angerer
angerer@proguss-austria.at
+43 664 1614 308

austria
proguss