

1 Einleitung

Aufgrund der umweltpolitischen Diskussion um die Begrenztheit der Ölressourcen und die Erderwärmung steht die Energieeffizienz von Kraftfahrzeugen im Fokus der Öffentlichkeit. Besonderen Anlass zur Kritik geben die stetig wachsenden Kohlenstoffdioxidemissionen (CO_2) der Fahrzeuge, da diese wesentlich zum Treibhauseffekt¹ beitragen.

Es besteht gleichzeitig weltweit ein wachsender Bedarf an individueller Mobilität [Pië06], so dass die Anzahl der Kraftfahrzeuge weiter zunimmt und damit die CO_2 -Emissionen, verursacht durch den Autoverkehr, ansteigen. Im Zuge dessen haben sich die europäischen Automobilhersteller im Vorgriff auf eine gesetzliche Regelung freiwillig verpflichtet, die CO_2 -Emissionen der Fahrzeugmotoren von 190g CO_2 pro gefahrenem Kilometer auf 140g CO_2 pro km bis zum Jahr 2008 zu reduzieren. Nachdem diese Reduzierung von den Automobilherstellern nicht erreicht werden konnte, soll jetzt durch den Einsatz neuer Technologien ein CO_2 -Ausstoß von 125g CO_2 pro km für Neufahrzeuge europäischer Produktion ab dem Jahr 2015 erreicht werden [KEGZ08].

Durch die Wünsche der Fahrzeugkunden und gesetzlicher Vorgaben wächst der Bedarf an Komfort, Sicherheit und Agilität (Sportlichkeit) der Fahrzeuge, was die wachsenden

¹Der Treibhauseffekt wird überwiegend durch den Menschen durch den Ausstoß von Treibhausgasen verursacht. Die Treibhausgase sammeln sich in der Atmosphäre und verhindern die Wärmerückstrahlung von der Erdoberfläche ins All. Das Kyoto-Protokoll von 1998 legt folgende Treibhausgase als besonders relevant für den Treibhauseffekt fest: Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (F-KKW / HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW / PCF) und Schwefelhexafluorid (SF_6).

Verkaufszahlen von höher motorisierten und teureren Fahrzeugmodellen belegen. Der Wunsch nach Komfort und Sicherheit erhöht das Fahrzeuggewicht durch steifere Karosserien oder zusätzliche Ausstattung wie z.B. Klimaanlage, elektrische Fensterheber oder Fahrerassistenzsysteme. Dieses führt von einer Fahrzeuggeneration zur nächsten zu einem stetig steigenden Gesamtfahrzeuggewicht. Um trotzdem Sportlichkeit und Fahrzeugagilität zu erreichen, werden immer größere Antriebsleistungen benötigt. Aufgrund des höheren Verbrauchs der stärkeren Motoren nimmt folglich die CO₂-Emission pro Fahrzeug zu.

1.1 Antriebs- und Leistungsbedarf eines KFZ

Die benötigte Antriebsenergie bzw. -leistung eines Kraftfahrzeugs (KFZ) setzt sich aus dem Integral über einen Fahrzyklus der benötigten Vortriebs- bzw. Widerstandskraft F_W und dem Wirkungsgrad $\eta_{Antrieb}$ des Motors zusammen [Hal97]. Unter der Annahme

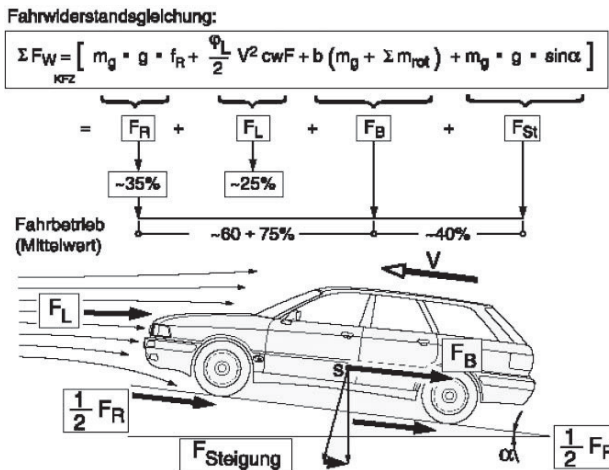


Abb. 1.1: Fahrwiderstand eines Kraftfahrzeugs [Hal97]

eines konstanten Motorenwirkungsgrad ist der Energie- bzw. Leistungsbedarf proportional zum Kraftstoffverbrauch und damit zur CO₂-Emission. Die Vortriebs- bzw. Widerstandskraft setzt sich aus der Summe der einzelnen Widerstände zusammen (Abb. 1.1, S. 22 und Formel 1.1, S. 23).

$$F_W = F_L + F_R + F_B + F_{St} \quad (1.1)$$

Luftwiderstand	$F_L = \frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot v^2 \hat{=} 35\% \cdot F_W$
Rollwiderstand	$F_R = m_g \cdot g \cdot \mu_R \hat{=} 25\% \cdot F_W$
Beschleunigungswiderstand	$F_B = a \cdot (m_g + \sum m_{rot})$
Kraft zum Überwinden einer Steigung	$F_{St} = m_g \cdot g \cdot \sin \alpha$

Um den Energie- bzw. Leistungsbedarf des gesamten Fahrzeugs zu erhalten, muss noch die benötigte Kraft für den Betrieb aller sonstigen, vorwiegend elektrischen Verbraucher (z.B. den Generator) bezogen auf ihren jeweiligen Wirkungsgrad addiert werden (Formel 1.2 und 1.3, S. 23).

$$\text{Energiebedarf} \quad E = \int_{\text{Zyklus}} \frac{F_W}{\eta_{\text{Antrieb}}} + \sum \frac{F_{\text{sonst.}}}{\eta_{\text{sonst.}}} ds \quad (1.2)$$

$$\text{Leistungsbedarf} \quad P = \int_{\text{Zyklus}} \frac{F_W}{\eta_{\text{Antrieb}}} + \sum \frac{F_{\text{sonst.}}}{\eta_{\text{sonst.}}} dv \quad (1.3)$$

1.2 Leichtbauansatz bei Kraftfahrzeugen

Es ist schwer, den Energiebedarf der meisten Verbraucher zu senken, da diese vor allem der Sicherheit (z.B. Fahrzeuglicht) oder dem Komfort (z.B. Klimaanlage) dienen und somit unverzichtbar sind. Es wird allerdings in Formel 1.1 ersichtlich, dass das Fahrzeuggewicht einen großen Einfluss auf die Vortriebs- bzw. Widerstandskraft hat.

Vergleicht man die Massenanteile der einzelnen Fahrzeugkomponenten, sieht man, dass die Karosserie ca. 35 % des Fahrzeuggesamtgewichtes ausmacht. Dadurch gewinnt Ka-

rosserieleichtbau immer mehr an Bedeutung. Laut Haldenwanger ist eine Reduktion der CO₂-Emission um bis zu 30 % durch ein geringeres Fahrzeuggewicht möglich (Abb. 1.2, S. 24). In der Gewichtsreduktion liegt das größte Einsparpotential für den Kraftstoffverbrauch [Hal06].

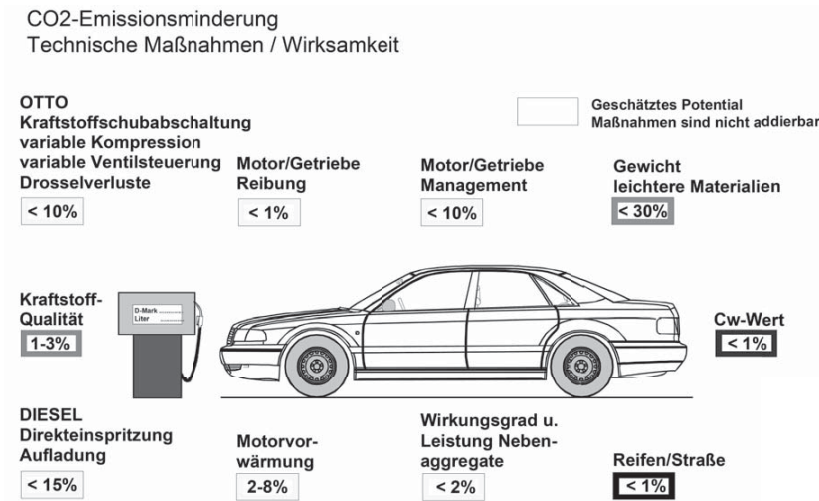


Abb. 1.2: CO₂-Emissionsminderung - Technische Maßnahmen / Wirksamkeit [Hal06]

Bei gleicher Motorleistung führt Leichtbau zu einer höheren Fahrzeugagilität, da weniger Kraft zum Beschleunigen benötigt wird. Alternativ kann bei gleicher Agilität die Antriebsleistung verringert werden. Ist die eingesparte Antriebsleistung groß genug, kann ohne Komfortverlust ein nicht so leistungsstarkes und damit leichteres Antriebsaggregat eingesetzt werden. Durch diesen sekundären Effekt, auch Downsizing genannt, verringert sich das Fahrzeuggewicht zusätzlich.

Im Automobilbau haben sich vier Säulen des Leichtbaus herauskristallisiert [Buc05]:

1. konstruktiver Leichtbau

Gestalt- und Topologieoptimierung; Bionik ...

2. konzeptioneller Leichtbau

Weglassen verzichtbarer Komponenten, z.B. Reserverad; einfache tragende Strukturen; gleiche Achslastverteilung; ...

3. Fertigungsleichtbau

Einsatz von dickenoptimierten Blechen und Profilen; strukturelles Kleben (Hybridfügen)

4. stofflicher Leichtbau

Einsatz von Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium (Al), Magnesium (Mg) oder Faserkunststoffverbunde (FKV); Mischbauweise

Da bereits sehr viel Erfahrung in der Karosserieauslegung vorhanden ist, sind die Bauweisen schon ausgereizt und damit nah am Optimum. Das größte Leichtbaupotential steckt im stofflichen Leichtbau, da hier die herkömmlich verwendeten Materialien durch steifere und festere Materialien ersetzt werden. Um die gleichen Aufgaben wie die ursprünglichen Bauteile zu übernehmen, können die Bauteile aus Leichtbauwerkstoffen leichter konstruiert werden. Allerdings sind die Leichtbauwerkstoffe noch sehr teuer und nicht für jeden Einsatz geeignet.

Ebenso geht der Trend immer mehr zu einer gesamtheitlichen Bewertung der CO₂-Bilanz. Diese erfasst alle CO₂-Emissionen von der Gewinnung der Rohstoffe über den Betrieb des Fahrzeugs bis hin zum Recycling. Ganzheitlich betrachtet führt nur der Einsatz von Aluminium mit hohem Recyclinganteil zu einer als positiv zu bewertenden CO₂-Bilanz [SMF⁺06].

Um auch mit anderen Werkstoffen eine positive CO₂-Bilanz zu erreichen, muss der Werkstoff entsprechend seiner Eignung ideal eingesetzt werden. Eine reine Materialsubstitution ist nicht sinnvoll. So hält die Mischbauweise, auch Multi Material Design genannt, immer mehr Einzug in den modernen Karosseriebau. Durch Mischbauweisen können die Eigenschaften der unterschiedlichen Werkstoffe optimal genutzt werden, so

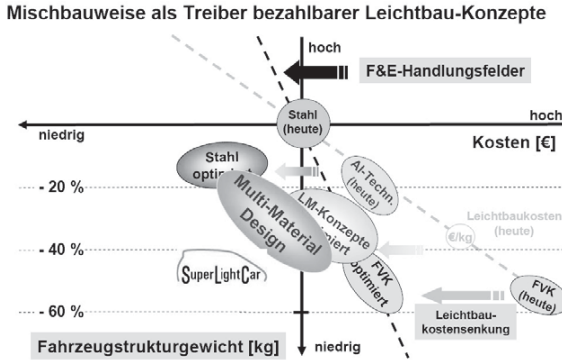


Abb. 1.3: Trends und Entwicklung des Karosserieleichtbaus [Goe07]

dass der Karosserieleichtbau gesamtheitlich die CO_2 -Emissionen reduziert und zudem wirtschaftlich ist [Goe07] (Abb. 1.3, S. 26).

Einen weiteren Vorteil bieten sichtbare Leichtbaustrukturen durch einen Imagegewinn für die Firmen wie beispielsweise das aus Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen hergestellte Fahrzeugdach des BMW M3 CSL. BMW wirbt unter anderem erfolgreich mit einer verbesserten Fahragilität aufgrund des niedrigeren Schwerpunkts [HSL04], obwohl der Effekt bei einer Gewichtseinsparung von 1,1 kg zu einer alternativen Aluminiumkonstruktion (5,6 kg zur Alternative aus Stahl) vernachlässigbar gering ist [HSL04].

Leichtbau gilt als fortschrittlich. Durch geschickt vermarkteten Leichtbau können die Mehrkosten teilweise oder sogar im Ganzen kompensiert werden.

1.3 Mischbauweise im Automobilbau

Im Allgemeinen werden Fahrzeugkarosserien vorwiegend in Monobauweise aus Stahl (z.B. VW Passat) oder Aluminium (z.B. Audi A8) entwickelt und produziert. Fahrzeugkarosserien aus Faserverbundwerkstoffen (z.B. Porsche Carrera GT oder McLaren

SLR) bilden eher die Ausnahme und werden bisher nur in den Kleinserien der Supersportwagen verwendet. Ein Novum in der Automobilindustrie ist die Mischbauweise des aktuellen Audi TT [Qui07].

In der Mischbauweise werden unterschiedliche Materialien für einzelne Bauteile oder Baugruppen so ausgewählt, dass das Potential der einzelnen Werkstoffe optimal ausgenutzt werden kann. Durch die Wahl der Bauteile ist stofflicher Leichtbau im Mischbau immer auch konzeptioneller Leichtbau. Durch lokal geschickten Leichtbau ergeben sich neben dem geringen Gewicht und Kraftstoffverbrauch positive Effekte für das Gesamtfahrzeug. Die Fahrdynamik wird durch Absenken des Fahrzeugschwerpunkts oder durch eine gleichmäßigere Achslastverteilung verbessert. So besteht z.B. der Vorderwagen des Audi TT zum Großteil aus Aluminium, um die Vorderachse zu entlasten, während der Hinterwagen aus Stahl besteht, was eine Gewichtsersparnis im Vergleich zu einer Vollstahlkarosserie von ca. 48% zur Folge hat [Hal06].

Durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften entstehen zusätzliche Herausforderungen für die Fahrzeugkonstruktion z.B. durch unterschiedliche Wärmedehnungen oder Spannungspotentiale. Besonders belastet sind die Krafteinleitungspunkte, da hier die Materialien mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften direkt aufeinander treffen, was dazu führt, dass neben den normalen Lasten zusätzliche durch die Materialpaarung verursachte Belastungen ertragen werden müssen.

Die Erfahrungen, die man mit den klassischen Fügeverfahren gesammelt hat, sind durch die unterschiedlichen Materialpaarungen nicht geschlossen übertragbar. Es ist wichtig, dass die Vorteile des Mischbaus nicht durch ungünstige Fügungen wie erhöhtes Gewicht, geringere Steifigkeit oder Festigkeiten oder aufwändiges / ungünstiges Design im Fügebereich aufgehoben werden.

Um im Automobilbau zu noch steiferen und leichteren Karosserien zu gelangen, ist nach dem Einsatz von Aluminium der Einsatz von hochfesten Stählen oder kohlenstofffaser-verstärkten Kunststoffen (CFK) der nächste Schritt. Durch die hohe Steifigkeit der

Kohlenstofffasern sowie die Möglichkeit, anisotrop zu konstruieren, bietet der Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen ein hohes Potential. Weitere Potentiale für eine Einsatz von Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen bietet auch das hohe Energieabsorptionsvermögen dieses Werkstoffs für Crashelemente [BM05].

Vor allem für Kleinserien eignen sich Faserverbundbauteile. Gerade bei kleinen Stückzahlen ist der Einsatz von FKV-Bauteilen durch die geringen Investitionskosten und durch eine mögliche Funktionsintegrität wirtschaftlich, weil in der Faserverbundbauweise Bauteilgeometrien möglich sind, die sich in Metall nicht oder nur mit großem Aufwand herstellen lassen. So konnte bei der Heckklappe des Lamborghini Gallardo Spyder neben der Gewichtsreduktion von 30% eine Teilerreduktion von 11 auf 2 Teile im Vergleich zur Aluminiumbauweise erreicht werden [ACE08].

Die fasergerechte Krafteinleitung in FKV-Bauteile stellt im automobilen Mischbau durch die hohen Stückzahlen, die automatisierten Fertigungstechniken und den hohen Kostendruck eine besondere Herausforderung dar.

1.3.1 CFK-Einsatz im Automobilbau

Bisher werden Komponenten aus endlosfaserverstärkten Verbundkomponenten nur im Supersportwagenbereich und in Kleinserien verbaut. Abgesehen von Monocoque Strukturen, die keinen klassischen Mischbau darstellen, werden nahezu alle Kohlenstofffaserverbundbauteile als Montageteile in Karosseriestrukturen integriert. Beim größten Teil der Faserverbundteile handelt es sich um nicht tragende Anbau- und Verkleidungsteile wie z.B. das R8 Side-Blade. Strukturell tragende Teile werden ebenfalls in der Montage mit einem sehr geringen Automatisierungsgrad verbaut. Als Beispiel ist hier der Aston Martin Vanquish mit einer Stückzahl von ca. 300 Fahrzeugen pro Jahr zu benennen [Her04], bei dem die A-Säule, die Domstrebe im Motorraum und der Tunnel aus Faserverbundwerkstoffen gefertigt sind.

Eine Besonderheit stellt die Hybridisierung auf Bauteilbasis des BMW Hydrogen 7 dar [BMW06]. Aufgrund des Wasserstoffantriebs erhöht sich das Fahrzeuggewicht erheblich. Deshalb werden bei dieser Kleinserie die Stahlkomponenten gezielt mit aufgeklebten CFK-Strukturen verstärkt, um so eine Neuentwicklung von Fahrwerk und Getriebe zu vermeiden. Alle Fahrzeuge mit endlosfaserverstärkten Verbundbauteilen werden in Kleinserien wenig bis gar nicht automatisiert gefertigt.

Für den Einsatz von endlosfaserverstärkten Faserverbundwerkstoffen in einer Großserie sind die heutigen Herstellungsverfahren der begrenzende Faktor. Aufwändig ist, dass zunächst die Faserhalbzeuge konfektioniert und in einem anschließenden Arbeitsschritt konsolidiert werden müssen. Dabei werden im Normalfall bei flächigen Bauteilen zunächst die einzelnen Laminatlagen aus Multiaxialgelegen (MAG) und Geweben zugeschnitten und anschließend im Harztransferverfahren, dem sogenannten Resin Transfer Moulding (RTM), mit Kunstharz infiltriert und ausgehärtet [Pot97]. Nach dem Entformen der Bauteile muss ein Beschnitt bzw. ein Besäumen der Bauteilkanten stattfinden, was einen weiteren aufwändigen Arbeitsschritt bedeutet. Eine komplette Automatisierung dieser Arbeitsschritte stellt sich als schwierig dar, so dass in der Produktion von FKV-Bauteilen noch große Anteile an Handarbeit nötig sind.

Durch eine Teilautomatisierung können beispielsweise bei der Herstellung des Kohlenstofffaserverbunddaches des BMW M3 CSL und M6 Stückzahlen von etwa 50 Stück pro Tag erreicht werden. Zusätzlich besteht der BMW M6 Stoßfänger aus einem geflochtenen Kohlenstofffaserverbundwerkstoff, wodurch eine Gewichtsersparnis der Stoßfänger von 20% vorne und 40% hinten in der Karosserie erreicht wird. Hier wird ein Sandkern in mehreren Schichten mit trockenen Kohlenstofffaserowings umflochten. Nach der Infiltration und Konsolidierung der so entstandenen Preform wird der Sandkern entfernt. Durch das textile Fertigungsverfahren des Flechtens wird so ein extrem leichter und steifer Hohlprofilträger effizient hergestellt. Die Montage der Faserverbundkomponenten ist ohne Zeitverlust in die Fertigungsreihe des BMW 6er Modells nahezu vollautomatisiert integriert [BMW05].

Im Gegensatz zur teilautomatisierten Herstellung des Faserverbunddachs bei BMW wird die Heckklappe des Lamborghini Gallardo Spyder [ACE08] zwar nach dem gleichen Verfahren, jedoch mit großem Aufwand größtenteils in Handarbeit hergestellt. Hier beträgt die maximale Stückzahl ca. 1500 Teile pro Jahr. Bei so geringen Stückzahlen werden diese Komponenten wenig bis gar nicht automatisiert gefertigt und montiert, da die Automatisierung in der Herstellung von FKV-Bauteilen nur mit großem Aufwand zu realisieren ist.

Durch neue Fertigungstechniken und -kapazitäten in der Luftfahrtindustrie nähern sich die Stückzahlen bestimmter Komponenten im Flugzeugbau immer mehr den Stückzahlen im Automobilbau an [Her04], so dass die im Flugzeugbau entwickelten Technologien für Faserverbundwerkstoffe sich mehr und mehr auch für den Einsatz im Automobilbau eignen. Die Fügeverfahren aus der Luftfahrt sind allerdings nicht geschlossen auf die überwiegend automatisierte automobiler Fertigung übertragbar. Ebenso sind die zurzeit im Automobilbau verfügbaren Fügeverfahren nur bedingt für Verbindungen mit Faserverbundbauteilen einsetzbar.

Um wirtschaftlich zu fügen, muss sich auch die Fügetechnik in den jetzigen nahezu vollautomatisierten Automobilbau einfügen. Viele strukturell tragende Bauteile können sinnvoll nur im Karosseriebau in das Fahrzeug eingebracht werden. Abgesehen von den verstärkenden Strukturen des BMW Hydrogen 7 werden bis heute keine Faserverbundkomponenten im Karosseriebau integriert.

Es ist notwendig, mögliche Fügeverfahren im Hinblick auf automobiler Anforderungen zu analysieren und zu bewerten, um die Eignung und die Einflussfaktoren, die sich aus der Mischverbindung ergeben, abschätzen zu können.

Aufgrund der vielen Freiheitsgrade für die Herstellung von Faserverbundwerkstoffen beginnt die Entwicklungskette eines Bauteils bei der Halbzeugherstellung [HS03], was direkt auf die Verbindungstechnik übertragen werden kann.

1.3.2 Verbindungstechnik im Mischbau

Durch die Forschungen der Luft- und Raumfahrttechnik wurden bereits sehr viele Verbindungen und Verbindungskonfigurationen untersucht, woraus allgemeine Designregeln abgeleitet werden konnten [Arb03] [US 02].

Aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren (z.B. Faser- und Matrixtyp, Lagenaufbau und -dicke, Verbindungselement) lassen sich nur grobe Tendenzen aufzeigen. Detaillierte Aussagen sind selten auf andere Materialien und Verbindungskonfigurationen übertragbar. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf den Automobilbau ist zusätzlich sehr gering, da vor allem luftfahrttypische Verbindungsszenarien wie z.B. mehrreihige Nietverbindungen oder die punktuell sehr hoch belasteten Anschlüsse von Rotorblättern untersucht wurden. Diese Verbindungskonfigurationen sind im automobilen Umfeld meist aufgrund ihres Aufwands in der Herstellung, Geometrie etc. und der geringen Automatisierbarkeit höchstens in Kleinserien oder gar nicht realisierbar.

Bahn- bzw. nahtförmige strukturelle Mischverbindungen werden im Flugzeugbau vor allem durch Kleben oder Nieten realisiert. Häufig werden aus Fertigungs-, Festigkeits- und Sicherheitsgründen die beiden Verbindungstechniken kombiniert. Dabei erweist sich die Qualitätssicherung der Verklebung als besondere Herausforderung. Hier wird ein großer Aufwand für die Klebflächenvorbehandlung und die anschließende zerstörungsfreie Prüfung (NDT, Non Destructive Testing) der Verbindung betrieben, der im Automobilbau so nicht zu realisieren ist.

Mischverbindungen im Automobilbau mit einem nicht metallischen Fügepartner sind in der Regel nicht strukturell bzw. semi-strukturell tragende Verbindungen. Vor allem aus Gründen unterschiedlicher Wärmeausdehnungen der Materialien ($\Delta\alpha$ -Problematik) kommt meist das Dickschichtkleben zum Einsatz, so dass Wärmespannungen über ein Schieben in der relativ dicken Klebschicht reduziert werden. Als Beispiel kann hier das Einkleben der Fahrzeugscheiben genannt werden.

Automobilspezifische Untersuchungen betrachten die Mischverbindung von Aluminium und Kohlenstoffaserverbundstrukturen nur als einen Teilaspekt [BMK⁺03] und beschäftigen sich lediglich mit der Machbarkeit verschiedener Verbindungsverfahren [HBD⁺04]. Es wurden quasistatische (qst.), schlagartige und dynamische Untersuchungen vor und nach Alterung durchgeführt. Die Machbarkeit der verschiedenen Verbindungsarten konnte nachgewiesen und Tendenzen für deren Festigkeit aufgezeigt werden.

Eine umfassende Bewertung und die Ableitung von Designregeln waren und sind aber aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren nicht möglich, da die bisherigen Untersuchungen nur für sehr spezielle Materialkombinationen durchgeführt wurden. Eine genaue Versagensanalyse und Optimierung zur Verbesserung der Verbindungseigenschaften sowie eine Untersuchung unterschiedlicher Einflussfaktoren sind mit Ausnahme der Betrachtung verschiedener Klebstoffe nicht aufgezeigt worden. Die gewonnenen Messergebnisse sind nicht so für den Konstrukteur aufbereitet worden, dass sie ihm direkt in der täglichen Arbeit helfen.