

Pkw-Vorderwagenstruktur im Multi-Material-Design

Leichtbaukonzepte für die Zukunft

Die Verwendung von Leichtbauwerkstoffen im Fahrzeugbau führt nicht nur zu deutlichen Verbrauchssenkungen, sondern wirkt sich zusätzlich positiv auf die Fahreigenschaften aus. In Zeiten erheblich gestiegener Kraftstoffkosten sind solche Maßnahmen wirtschaftlich attraktiv und können zugleich zur Ressourcenschonung beitragen. Ein Konsortium unter Leitung des Instituts für Kraftfahrwesen Aachen (ika) der RWTH Aachen hat gezeigt, welche Gewichtseinsparungen für die Fahrzeugfront mit Hilfe eines Multi-Material-Designs möglich sind.

Die Gründe für gestiegene Fahrzeugmassen, die in den vergangenen Jahren in nahezu allen Fahrzeuggenerationen zu beobachten waren, sind vielfältig. Insbesondere die gewachsenen Sicherheits- und Komfortansprüche sowie die Forderung nach verbesserten Fahreigenschaften haben zu deutlichen Gewichtszunahmen geführt.

Die aktuelle CO₂-Debatte ist ein Anreiz zur Entwicklung verbrauchsarmer Fahrzeuge. Eine Möglichkeit zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs besteht in der Gewichtsreduzierung aller Fahrzeugkomponenten. So kann der Verbrauch um ca. 0,3 – 0,4 l/100 km gesenkt werden, wenn das Fahrzeuggewicht um 100 kg verringert wird. Dies entspricht einer Reduktion der CO₂-Emission von 8 – 11 g/km /l/. Obwohl exakte Grenzwerte für künftige Fahrzeuggenerationen noch nicht endgültig definiert sind, ist die Richtung dennoch klar: Die Emissionen kommender Fahrzeuge werden weiter sinken müssen. Um dieses ambitionierte Ziel erreichen zu können,

ist Leichtbau neben Verbesserungen des Antriebsstrangs ein wesentlicher Entwicklungsschwerpunkt.

Aus diesem Grund hat das Institut für Kraftfahrwesen Aachen gemeinsam mit den Industriepartnern Erbslöh, Ford Forschungszentrum Aachen, Henkel, Hydro Aluminium und ThyssenKrupp Steel sowie Partnerinstituten an der RWTH Aachen in den vergangenen drei Jahren eine Fahrzeugfrontstruktur in Multi-Material-Bauweise entwickelt, für die bei wirtschaftlicher Herstellbarkeit eine Gewichtseinsparung von 30 Prozent im Vergleich zu einer herkömmlichen Bauweise erzielt werden sollte.

DER MULTI-MATERIAL-ANSATZ

Leichtbau kann bekanntlich durch den Einsatz unterschiedlicher Materialien erreicht werden. Dazu zählen hochfeste Stähle, Leichtmetalle wie Aluminium und Magnesium oder Kunststoffe. Moderne, endlosfaserverstärkte Kunststoffe versprechen zwar das höchste



»Eine geeignete Verbindungstechnik ist notwendige Voraussetzung für die Einführung der Multi-Material-Bauweise in der Serie.« Dipl.-Ing. Micha Lesemann, Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika) der RWTH Aachen

Gewichtseinsparungspotenzial, sind aber für einen Einsatz in der Großserie derzeit noch zu teuer. Dies betrifft sowohl die Material- als auch die Fertigungskosten.

Der Multi-Material-Einsatz verfolgt die Idee, für jedes Bauteil das am besten geeignete Material zu verwenden. Bei der Auswahl fließen Faktoren wie Funktion, Haltbarkeit, Herstellbarkeit und Kosten ein.

Das so insgesamt erreichbare Potenzial zur Gewichtseinsparung aktueller Großserienmodelle wird auf 20 bis über 40 Prozent geschätzt. Der Einfluss auf die Kosten ist dabei nicht nur vom verwendeten Material abhängig. Steigende Kosten für den Zusammenbau, notwendige Investitionen in neue Fertigungseinrichtungen sowie höhere Lohnkosten durch erhöhten Handlingaufwand sind zu beachten.

GEWICHTS- ODER KOSTENGÜNSTIG

Im Laufe des Projekts wurden zwei Fahrzeugfrontkonzepte mit unterschiedlichen Entwicklungsschwerpunkten entwickelt. Bei dem so genannten gewichtsgünstigen Konzept wurde der Fokus auf eine möglichst große Gewichtseinsparung im Vergleich zur Referenzstruktur gelegt, während beim kostengünstigen Konzept eine Gewichtsreduzierung bei nur geringfügig gestiegenen Kosten erzielt werden sollte.

BEWERTUNGSKRITERIEN

Die Entwicklung der Konzepte erfolgte hauptsächlich virtuell durch den Einsatz der Finite-Elemente-Methode. Dabei wurden insgesamt acht statische und drei dynamische Lastfälle betrachtet. Für die Untersuchung der Steifigkeitseigenschaften waren dies unter anderem die Lastfälle Biegung und Torsion. Als Crash-Lastfälle wurden der Crash-Reparaturtest zur Versicherungseinstufung nach AZT sowie zwei Hochgeschwindigkeitslastfälle analysiert. Dazu wurde der von der Zeitschrift „auto motor und sport“ bekannte AMS-Lastfall anstelle des üblicherweise verwendeten Frontal-Crashes nach Euro NCAP verwendet, da dieser mit seiner deformier-

baren Barriere für das in der frühen Konzeptphase verwendete reduzierte Vorderwagenpackage keine realistische Lasteinleitung in die Fahrzeugstruktur erlaubt. Als dritter Lastfall wurde der Aufprall mit voller Überdeckung gemäß FMVSS 208 gewählt. Ziel aller Lastfälle war es, Struktureigenschaften zu erreichen, die mindestens denen der Referenzstruktur entsprechen.

BILD 1 Topologieoptimierung

Bauraum

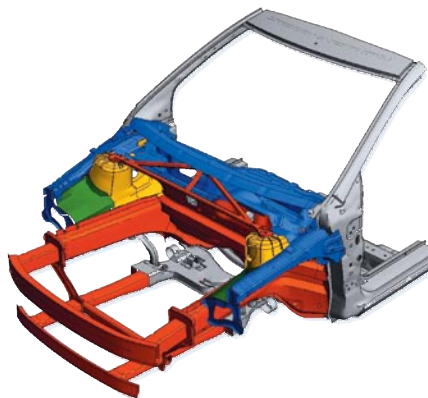


Topologievorschlag

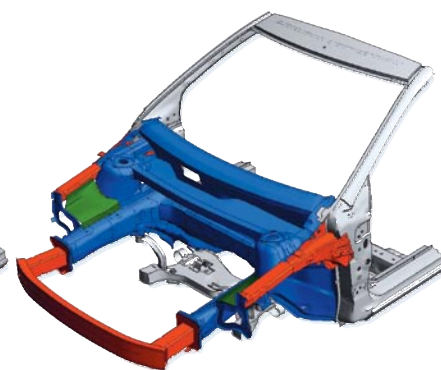


BILD 2 Ausgearbeitete Konzepte

Gewichtsgünstiges Konzept



Kostengünstiges Konzept



■ Aluminium ■ Stahl ■ Magnesium ■ Kunststoff ■ unverändert

»Die Entwicklung der Öl- und Materialpreise wird über die Wirtschaftlichkeit von Multi-Material-Bauweisen entscheiden.«

Dr.-Ing. Markus Bröckerhoff, Teamleiter Passive Sicherheit, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka)



Die Bewertung umfasste jedoch nicht nur die Analyse der genannten Lastfälle. Neben der Gewichtsreduzierung war auch die Teileanzahl relevant, da sie dank Funktionsintegration verringert werden sollte. Begleitet wurde die Untersuchung durch eine Kostenbewertung.

KONZEPTABLEITUNG

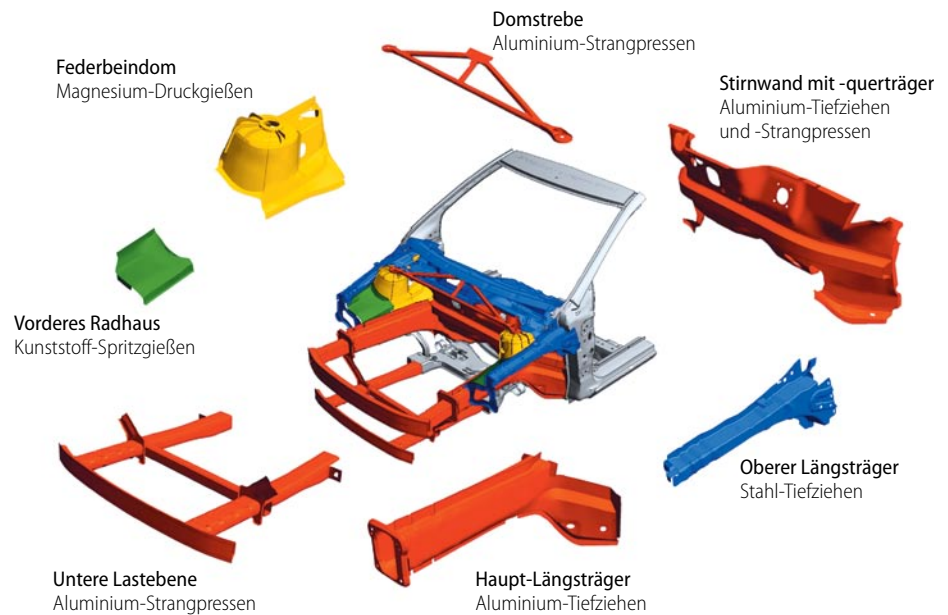
Zur Ableitung der Konzepte wurde zunächst der zur Verfügung stehende Bauraum des Referenzvorderwagens definiert. Eine Topologieoptimierung für einzelne sowie kombinierte Lastfälle lieferte dann Vorschläge für die Materialverteilung und Gestaltung der Lastpfade (Bild 1). Für die dynamischen Crash-Lasten wurden dabei statische Ersatzlasten aufgebracht.

Aus den Topologieoptimierungsergebnissen wurden anschließend die beiden zuvor genannten Konzepte abgeleitet (Bild 2). Es folgten eine detaillierte Gestaltung der Einzelteile und deren Optimierung im Hinblick auf die Steifigkeits- und Crash-Eigenschaften. Beim gewichtsgünstigen Konzept ergaben sich schließlich eine aluminiumintensive Konstruktion mit einem Federbeindom aus Magnesium-Druckguss sowie ein zusätzlicher unterer Lastpfad (Bild 3). Beim kostengünstigen Konzept wurde ein höherer Anteil an Stahlbauteilen vorgesehen, der durch kostengünstige Aluminium-Extrusionsprofile – zum Beispiel beim vorderen Stoßfänger und oberen Längsträger – ergänzt wird (Bild 4).

NEU ENTWICKELTE KOMPONENTEN

Die Topologieoptimierung wurde im Projektverlauf nicht nur zum Auffinden der Hauptlastpfade, sondern auch zur Entwick-

BILD 3 Hauptbestandteile des gewichtsgünstigen Konzeptes



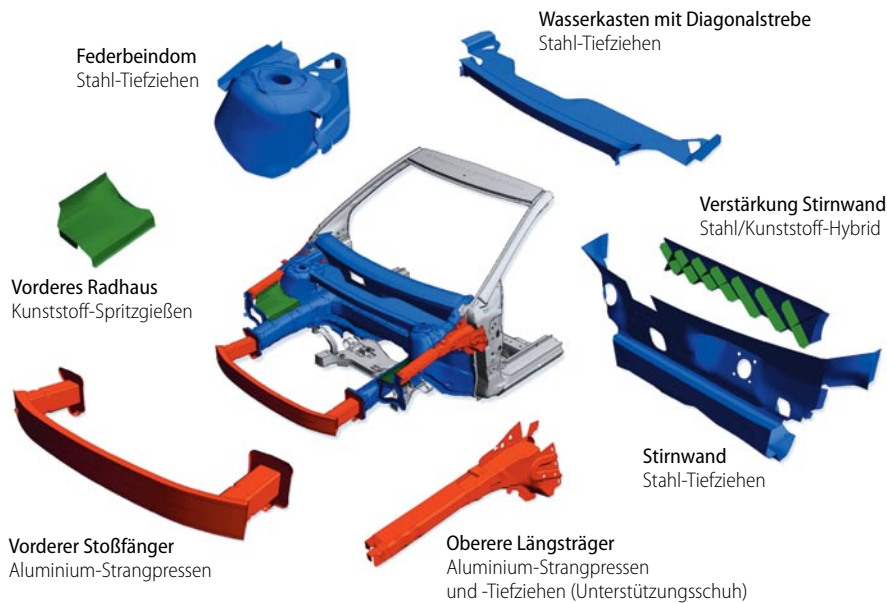
lung einzelner Vorderwagenkomponenten verwendet. Ein Beispiel ist der Federbeindom des gewichtsgünstigen Konzeptes, der als Magnesium-Druckguss-Bauteil (AM 60 Legierung) mit den aus den Ergebnissen der Topologieoptimierung abgeleiteten Rippen und Wandstärken ausgelegt wurde /2/.

Zur Steigerung der Torsionssteifigkeit wurde ferner eine Domstrebe aus Aluminium-Extrusionsrohren eingeführt. Die Stirnwand ist durch ein Extrusionsprofil verstärkt, das aus einer 6000er-Legierung besteht. Der obere Längsträger wurde im Vergleich zur Referenzstruktur nur geringfügig verändert. Sein Gewicht konnte durch den Einsatz eines hochfesten Dualphasen-Stahls (DP 600) und eine veränderte Lastverteilung durch den zusätzlichen unteren Lastpfad reduziert werden.



»Vor dem Hintergrund der aktuellen CO₂-Diskussion nehmen wir ein zunehmendes Interesse der Automobilindustrie an Leichtbauthemen wahr.«

Dipl.-Ing. Peter Urban, Leiter Geschäftsbereich Karosserie, Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika) der RWTH Aachen

BILD 4 Hauptbestandteile des kostengünstigen Konzeptes


Der Hauptlängsträger besteht aus einer Aluminium-Schalenlösung, die durch ein Aluminium-Extrusionsprofil (ebenfalls 6000er-Legierung) verstärkt wird. Die Topologieoptimierung hat ferner gezeigt, dass das vordere Radhaus strukturell nicht relevant ist. Daher wurde es durch ein einfaches Kunststoff-Schließteil aus Polypropylen ersetzt.

Der neu eingeführte, untere Lastpfad besitzt eine Schrägstellung von fünf Grad nach oben um die Querachse des Fahrzeugs. Der Grund hierfür liegt in der festgelegten Höhe der deformierbaren Barriere des „Euro NCAP“-Frontalcrashes. Um ein Unterfahren zu verhindern, war – ausgehend vom hinteren Anbindungspunkt am Subframe – eine waagerechte Ausführung nicht möglich. Schräggestellt und mit entsprechenden Initialisierungssicken versehen, nimmt der untere Lastpfad nun einen beträchtlichen Teil der eingeleiteten kinetischen Energie dank Faltenbeulens auf.

Das kostengünstige Konzept nutzt einige Gleichteile des gewichtsgünstigen Konzeptes: Neben dem vorderen Radhaus aus Polypropylen handelt es sich um das vordere Crash-Management-System aus Crash-Boxen und Stoßfänger. Diese bestehen durchweg aus Aluminium-Extrusionsprofilen der 7000er-Serie. Der Stoßfänger wurde zur Versteifung als Doppelkammerprofil ausgelegt.

Der obere Längsträger besteht ebenfalls aus einem Aluminium-Profil in 7000er-Legierung. Der gesamte hintere Teil des Vorderwagens ist hingegen stahlintensiv konstruiert. Hier ist besonders die durch ein Stahl/Kunststoff-Hybridteil verstärkte Stirnwand hervorzuheben. Dank dieser Konstruktion ist die gewünschte Strukturintegrität des Stirnwandquerträgers im Offset-Lastfall ge-

währleistet. Zusätzlich bietet sie die Möglichkeit, die Intrusion im Bereich des Fußraums weiter zu reduzieren, indem die Hohlräume des Kunststoff-Inlays mit Strukturschaum ausgefüllt werden. Die Kunststoffrippen bestehen aus kurzfaserverstärktem Polyamid (PA6/GF30).

Die Domstrebe des kostengünstigen Konzeptes ist durch zwei Blechschalen in den Wasserkasten integriert. Beim Hauptlängsträger handelt es sich um eine Schalenbauweise, bei der ein Tailor Welded Blank in den Güten DP 600 bzw. DP 800 und Wandstärken von 1,3 bzw. 1,5 mm zum Einsatz kommt. Mit dieser Materialverteilung lässt sich das gewünschte Crash-Verhalten erreichen. Die kinetische Energie wird dabei durch Faltenbeulen im vorderen Bereich des Bauteils aufgenommen.

VERBINDUNGSTECHNIK

Der Zusammenbau von Bauteilen unterschiedlicher Materialien stellt die

größte Herausforderung beim Multi-Material-Design dar. Gleichzeitig ist er einer der größten Kostentreiber. Die Mehrzahl der heute im Markt befindlichen Großserien-Fahrzeuge wird in einer stahlintensiven Bauweise hergestellt, bei der fast ausschließlich das Punktschweißen als Füge-technik zum Einsatz kommt. In einem Multi-Material-Fahrzeug ist diese Technik nicht einsetzbar. Stattdessen müssen mechanische Fügeverfahren oder Kleb-techniken verwendet werden.

Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus dem unterschiedlichen elektro-chemischen Potenzial der verschiedenen Metalle. Schon im frühen Entwicklungsprozess gilt es, eine mögliche Kontaktkorrosion bei einer Multi-Material-Bauweise zu verhindern. Eine Isolation der verschiedenen Metallwerkstoffe durch die Verwendung von Klebstoff stellt eine mögliche Lösung dar.

Zusammen mit mechanischen Verbindungstechniken verspricht das Kleben das größte Potenzial für die Verbindung unterschiedlicher Materialien. Eine Beschreibung dieser Verbindungstechnik in der numerischen Simulation ist derzeit jedoch noch schwierig, da insbesondere das Versagensverhalten noch unzureichend beschrieben ist. Aufgrund der großen Bedeutung der Simulation in allen Phasen des Produktentstehungsprozesses behindert dies eine noch breitere Anwendung der Klebtechnik im Karosseriebau.

Die Crash-Simulationen wurden in diesem Projekt mit dem Finite-Elemente-Solver Radioss durchgeführt. Für diesen Code wurde eine Materialkarte entwickelt, die crash-stabile Klebstoffe wie den eingesetzten Terokal 5074 von Henkel abbilden kann. Eine Versuchsreihe an generischen und bauteilähnlichen Probekörpern hat Eingangsdaten für die Kalibrierung des gewählten

Materialmodells bei statischer und dynamischer Belastung geliefert (Bild 5). Während die Korrelation von Versuch und Simulation im statischen Fall sehr zufriedenstellend ist, macht der dynamische Fall weitere Arbeiten erforderlich.

BEWERTUNG

Mit beiden neuen Konzepten wurden jeweils mindestens ebenso gute Struktureigenschaften wie mit der Referenzstruktur erreicht. Dies gilt sowohl für die Steifigkeitseigenschaften als auch für die genannten Crash-Lastfälle. Darüber hinaus zeigt das gewichtsgünstige Konzept, dass der zusätzliche untere Lastpfad das Crash-Verhalten deutlich verbessert.

Insgesamt konnte bei Erfüllung aller Anforderungen bei dem gewichtsgünstigen Konzept für die veränderten Bauteile eine Gewichtseinsparung von 38 Prozent erreicht werden. Beim kostengünstigen Konzept betrug der Gewichtsvorteil immerhin noch 18 Prozent. Ferner konnte die Teilezahl durch die Multi-Material-Konstruktionen um sechs bzw. acht reduziert werden. Die Kostenbewertung erfolgte durch das ika auf der Basis eines im Rahmen der ULSAB-Studie im Jahre 2002 entwickelten Kostenmodells [3]. Im ersten Schritt wurden damit zunächst die Kosten der Referenzstruktur approximiert. Die dafür verwendeten Werkstoffpreise beruhen auf öffentlichen Preislisten der Werkstofflieferanten. Das betrachtete jährliche Produktionsvolumen wurde mit 435.000 Stück angenommen.

Neben den reinen Bauteilkosten flossen in die Kostenbewertung auch der Aufwand für Herstellung, Werkzeuge und den Zusammenbau ein, der sich aus Lohn-, Energie- und Investitionskosten zusammensetzt. Die Kosten der Strangpress- und Gussbauteile wurden von den bei der Auslegung beteiligten Projektpartnern ermittelt. Dabei wurden identische Randbedingungen zur Kostenermittlung angenommen.

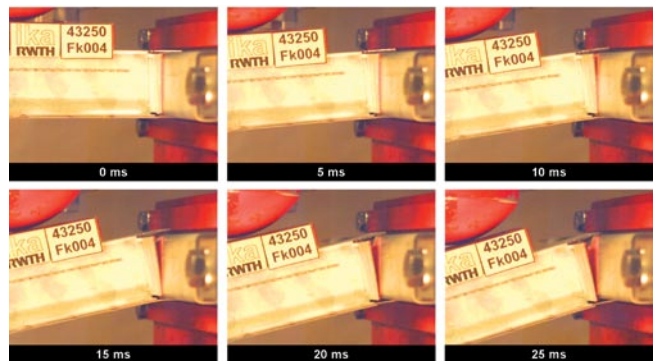
Für eine vollständige Kostenbewertung hat das ika schließlich für beide Konzepte eine Zusammenbaufolge ausgearbeitet. Insgesamt ergeben sich danach Kostensteigerungen von rund 31 Prozent für das gewichtsgünstige und abgeschätzte rund 7 Prozent für das kostengünstige Konzept.

ZUSAMMENFASSUNG

Multi-Material-Design zeigt in Bezug auf Gewichtseinsparung und wirtschaftliche Fertigung vielversprechende Ansätze. Belegen lässt sich dies durch Wirtschaftlichkeitsberechnungen verschiedener Konzepte, die unterschiedliche Leichtbaugrenzkosten (d. h. zulässige Mehrkosten pro Gewichtseinsparung) aufweisen. Die Entwicklung der Kraftstoff- und Materialpreise sowie gesetzliche Rahmenbedingungen hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs werden maßgeblich darüber entscheiden, welches der Konzepte zukünftig am wirtschaftlichsten sein wird.

Das Projekt hat ferner gezeigt, dass die Verbindungstechnik für das Fügen von Bauteilen unterschiedlicher Materialien weiterer Anstrengungen bedarf. In dieser Hinsicht hat das Kleben sein Potenzial zwar unter Beweis gestellt, jedoch müssen Simulati-

BILD 5 Verhalten des Klebstoffs unter dynamischer Beanspruchung



onmethoden insbesondere für dynamische Lastfälle weiter verbessert werden. Die Verbindungstechnik stellt in Bezug auf die Multi-Material-Bauweise somit die Herausforderung der Zukunft dar und ist eine der wesentlichen Voraussetzungen für die Einführung entsprechender Konzepte in kommende Fahrzeuggenerationen.

DANKSAGUNG

Im Namen aller Partner danken die Autoren dem Ministerium für Innovation, Wissenschaft, Forschung und Technologie des Landes Nordrhein-Westfalen, das dieses Projekt maßgeblich gefördert hat.

LITERATUR

- /1/ Wallentowitz, H.: Strukturentwurf von Kraftfahrzeugen. Aachen: Institut für Kraftfahrwesen Aachen, 2004
- /2/ Priyantoro, B.: Possibility of Application for Magnesium Die-cast in Suspension Strut Housings. In: Euromotor: New Advances in Body Engineering. Aachen: Institut für Kraftfahrwesen Aachen, 2006
- /3/ ULSAB-AVC Konsortium: ULSAB-AVC Economic Analysis. Brüssel: WorldAutoSteel, International Iron and Steel Institute, 2002

► English abstract: **Page 63**

Die Autoren

DIPL.-ING. MICHA LESEMANN (leseemann@ika.rwth-aachen.de) ist Projektingenieur im Geschäftsbereich Karosserie des Instituts für Kraftfahrwesen Aachen (ika) der RWTH Aachen.

DR.-ING. MARKUS BRÖCKERHOFF war Projektingenieur am ika und ist nun Teamleiter Passive Sicherheit im Geschäftsbereich Karosserie der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka).

DIPL.-ING. PETER URBAN leitet den Geschäftsbereich Karosserie am Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika) der RWTH Aachen.