

ABSICHERUNG NEUER KONZEPTIDEEN DURCH SIMULATION UND VERSUCH AM BEISPIEL EINER VORDERWAGENSTRUKTUR

Dipl.-Ing. Elmar Beeh, Prof. Horst E. Friedrich, Dipl. Ing. Michael Kriescher,
Dipl. Ing. Simon Brückmann, Dipl. Ing. Philipp Straßburger

DLR- Institut für Fahrzeugkonzepte

Pfaffenwaldring 38-40; 70569 Stuttgart

Zusammenfassung:

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs entwickelt sich zu einem starken Treiber für die Entwicklung leichter Karosseriestrukturen. Eine Herausforderung hierbei ist die Gewährleistung der passiven Sicherheit derartiger Fahrzeugstrukturen. Das DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR-FK) beschäftigt sich mit der Konzeption neuer Bauweisen und Wirkmechanismen und mit der Weiterentwicklung von Prüfverfahren und -einrichtungen. Die simultane Entwicklungsarbeit in den Fachgebieten Konstruktion, Simulation und Versuch, ermöglicht die Entwicklung zukunftsfähiger Leichtbaukonzepte. Am Beispiel einer am DLR-FK entwickelten PKW-Frontstruktur wird die Entwicklung einer Simulationsmethodik und die stufenweise Absicherung der Bauweiseneigenschaften von der Probe bis zum Vorderwagendemonstrator erläutert.

Stichwörter: Leichtbau, Entwicklungsmethoden, Konzeptabsicherung,

VALIDATING NEW CONCEPT IDEAS THROUGH SIMULATION AND EXPERIMENT USING THE EXAMPLE OF A NEW FRONT END VEHICLE STRUCTURE

Abstract:

The drive train electrification emerges to be a strong driver for the development of lightweight car body design. One key challenge in this connection is guaranteeing the passive safety of such automotive structures. The Institute of Vehicle Concepts of the German Aerospace Center (DLR-FK) deals with the conception of new structural architectures as well as with the continuous development of suitable testing methods and testing infrastructure. The development work in the fields of design, simulation and testing enables the making of future lightweight vehicle concepts. With the help of a vehicle front end structure designed at DLR-FK, the development of a simulation methodology and the progressive validation of structural properties from a simple part test to a testing of realistic front end demonstrator will be illustrated.

Keywords: Lightweight design, Engineering design methodology, concept validation

Einleitung

Der Leichtbau als Mittel zur Effizienzsteigerung und Emissionsreduktion von Fahrzeugen rückt immer mehr in den Fokus der Automobilindustrie. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs entwickelt sich hierbei zu einem starken Treiber für die Entwicklung leichterer Karosseriestrukturen unter Nutzung alternativer Leichtbauwerkstoffe, wie Aluminium, Magnesium oder Faserverbunde. Eine Herausforderung hierbei ist die Gewährleistung der passiven Sicherheit derartiger Fahrzeugstrukturen. Lassen sich Stahl- und Aluminiumstrukturen in konventionellen Bauweisen noch recht genau in der Numerik abbilden, so ergibt sich bei neuen Konzepten und Werkstoffen häufig die Schwierigkeit der Einbindung in die Simulation. Die Notwendigkeit, die Struktureigenschaften durch aufwändige Versuche zu ermitteln, nimmt durch die Anwendung von Multimaterialbauweisen wieder zu.

Das DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR-FK) beschäftigt sich im Forschungsfeld „Leichtbau- und Hybridbauweisen“ mit der Konzeption neuer Bauweisen und Wirkmechanismen und mit der Weiterentwicklung von Prüfverfahren und –einrichtungen. Die simultane Entwicklungsarbeit in den genannten Fachgebieten, ermöglicht die Entwicklung zukunftsfähiger Leichtbaukonzepte. Um den oben beschriebenen Herausforderungen bei Multimaterialstrukturen wirksam zu begegnen, betreiben die Forscher eine Komponentenprüfanlage, welche die Untersuchung von Fahrzeugteilstrukturen ermöglicht. Das Anlagenkonzept ermöglicht insbesondere einen einfachen Abgleich von Simulations- und Versuchsdaten, so dass teure Gesamtstrukturtests durch günstigere Komponententests ersetzt werden können. Am Beispiel einer am DLR-FK entwickelten PKW-Frontstruktur wird die Entwicklung einer Simulationsmethodik und die stufenweise Absicherung der Bauweiseigenschaften von der Probe bis zum Vorderwagendemonstrator erläutert.

Konzeptidee zur neuartigen Vorderwagenstruktur

Das DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte beschäftigt sich seit seiner Gründung im Jahre 2004 mit der Entwicklung von neuartigen Energieabsorptionsprinzipien und mit leichten und sicheren Fahrzeugstrukturen, wie z. B. Fahrzeugfrontstrukturen. Dabei werden gängige Entwicklungswerkzeuge, wie die Topologieoptimierung und die statische und dynamische Simulation eingesetzt. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis einer Topologieoptimierung einer Vorderwagenstruktur. Mit derartigen Werkzeugen kann eine Struktur im Hinblick auf gewichtsspezifische Steifigkeit und Eigenfrequenzen optimiert werden.

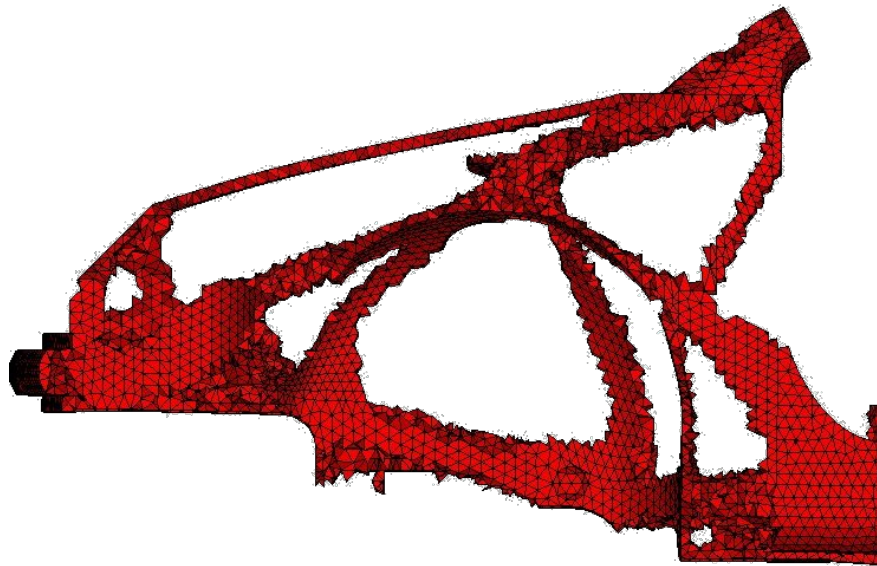


Abbildung 1: Ergebnis einer Topologieoptimierung für den vorderen Fahrzeugbereich; Result of a topology optimisation of a vehicle front structure

Derartige Simulationsergebnisse erleichtern dem Konstrukteur das Verständnis für benötigte Lastpfade, erfordern aber auch viel Erfahrung in der Annahme der wirkenden Lastfälle.

An Grenzen dieser Entwicklungsmethoden stößt man, wenn Eigenschaften optimiert werden sollen, welche durch die virtuellen Entwicklungswerkzeuge nicht betrachtet werden. So kann die oben gezeigte Topologieoptimierung zwar statische Eigenschaften optimieren, jedoch lassen sich beispielsweise für die Energieabsorption bei dynamischen Lastfällen bislang keine geeigneten Strukturvorschläge berechnen. Einschränkungen gibt es auch bei der in der Entwicklung von Fahrzeugstrukturen eingesetzten Crashsimulation. Dort hängen die Berechnungsergebnisse stark von den verwendeten Materialmodellen ab. Gerade bei neu entwickelten Werkstoffen oder bei Faserverbunden führt dies zu erheblichen Einschränkungen, so dass in solchen Fällen vermehrt auf Komponententests zurückgegriffen werden muss. Ähnlich verhält es sich, wenn die entwickelte technische Lösung neuartige Mechanismen oder Wirkprinzipien nutzen soll, was im folgenden Beispiel des am DLR-FK entwickelten Vorderwagenkonzepts der Fall ist.

Wesentliches Merkmal des neuartigen Vorderwagens ist die Nutzung von Schälrohren als Energieabsorber. Statt die Energie bei einem Unfall durch das sogenannte Faltenbeulen zu absorbieren, wird die Außenhaut von teleskopisch ineinander schiebbaren runden Trägerstrukturen durch eine Ringschneide abgeschält (siehe Abbildung 2).

Vorteil dieser Bauweise ist, neben einer hohen spezifischen Energieabsorption von bis zu 70 KJ/kg [1] und einem konstanten Kraftverlauf ohne größere Lastschwankungen, die einfache Modifizierung der Längskraft über kleine geometrische Eingriffe im Bereich des Schneiden- oder Rohraußendurchmessers.

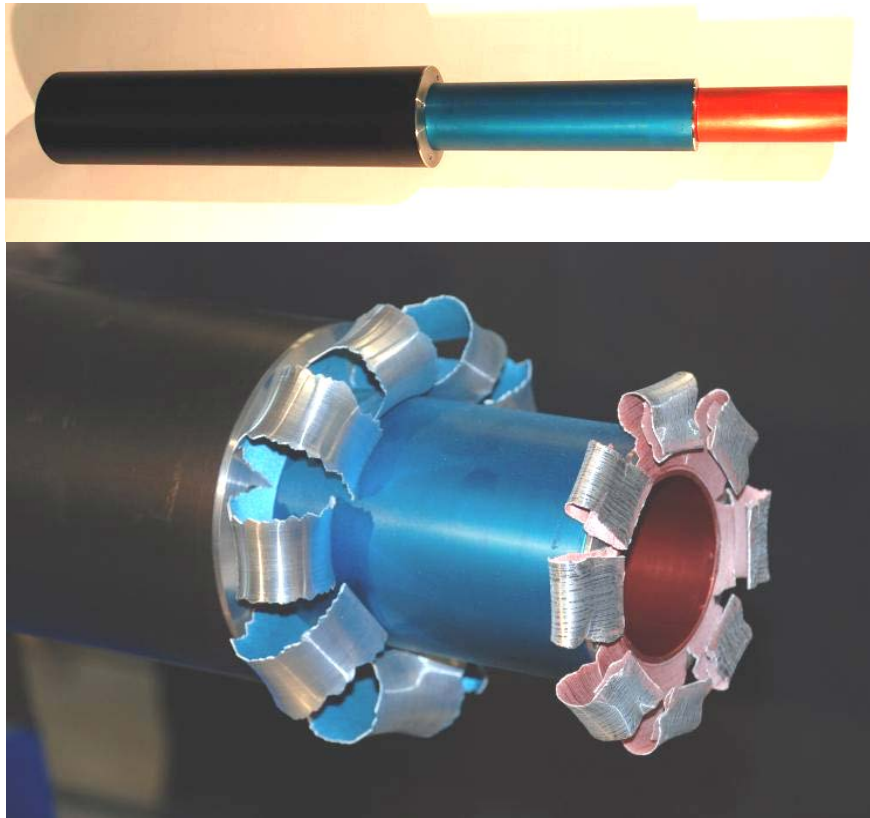


Abbildung 2: Längsträgerdemonstrator vor (oben) und nach (unten) dem energieabsorbierenden Schälvorgang; Demonstrator of a longitudinal rail before (top) and after (below) the energy dissipating cutting operation

Um die Potentiale des neuartigen Energieabsorbers optimal zu nutzen, wurde eine Konzeptidee für einen Vorderwagen entwickelt, bei welcher eine dreidimensionale Stützstruktur geschaffen wurde, die eine Funktionstrennung von Steifigkeiten erlaubt. Die Steifigkeit in Richtung der Fahrzeugquer- und -hochachse werden von der in Abbildung 3 blau dargestellten Struktur übernommen, während die rote Struktur die Steifigkeit in Längsrichtung bestimmt.

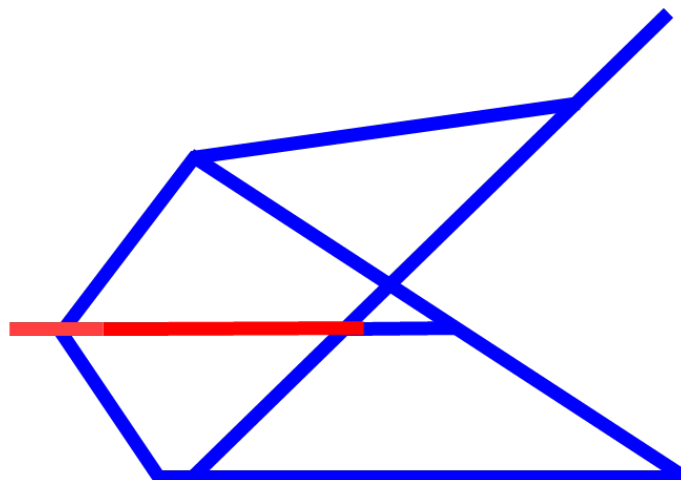


Abbildung 3: Funktionsschema der neuartigen Vorderwagenstruktur mit symbolisierter Funktionstrennung; Functional Scheme of the new front structure with symbolized function separation

Wie derartige neue Konzeptideen durch geeigneten Methoden in Simulation und Versuch abgesichert werden können, wird in den folgenden Absätzen beschrieben.

Methodisches Vorgehen zur Absicherung der Konzeptidee

Für die Lösung der Aufgabenstellung wird methodisch der in Abbildung 4 dargestellte Entwicklungsprozess beschriftet.

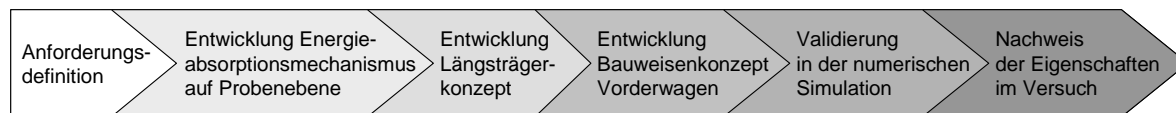


Abbildung 4: Methodische Vorgehensweise in der Vorderwagenentwicklung; Methodic approach within the front structure development

Startpunkt ist die genaue Analyse der Anforderungen an Vorderwagenstrukturen. Dabei werden z. B. Kriterien für den Energieabsorptionsmechanismus in Form von idealen Kraft/Weg-Kurven ermittelt (siehe Abbildung 5).

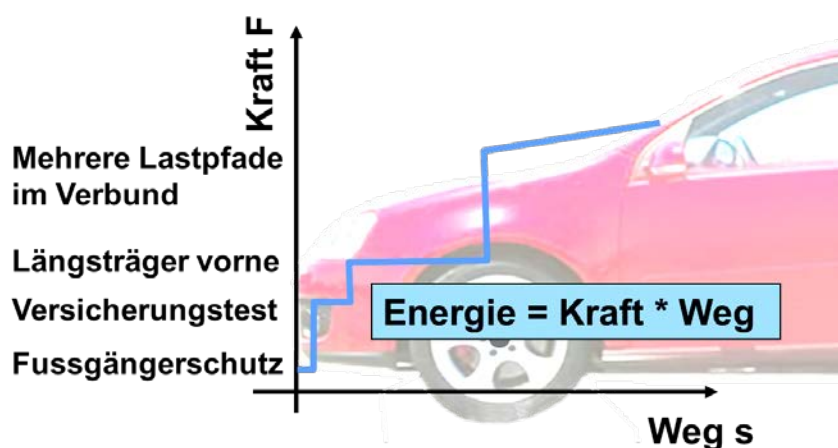


Abbildung 5: Qualitative Darstellung des gewünschten Axialkraftverlaufs in Vorderwagenstrukturen; Qualitative diagram of the target force-deflection characteristics within the front structure [2]

Die analysierten Anforderungen werden dann von den Leichtbauexperten des Instituts für Fahrzeugkonzepte in gewünschte funktionale Eigenschaften übersetzt. Die in Abbildung 5 dargestellte Kraft-Weg-Kennung kann z. B. technisch dann umgesetzt werden, wenn der verwendete Energieabsorptionsmechanismus eine sehr präzise einstellbare und konstante Längskraft ermöglicht. Im Falle der beispielhaft beschriebenen Vorderwagenentwicklung wurde eine anforderungsgerechte Konzeptidee entwickelt, bei der die Energie durch einen Schäl- oder Zerspanungsvorgang absorbiert wird.

Prinzipversuche zu Schälrohren

Nach einer theoretischen Potentialanalyse wurde mit einfachen Prinzipversuchen der Nachweis erbracht, dass das physikalische Grundprinzip geeignet ist, die gewünschte Funktion zu erfüllen (Abbildung 6). Begonnen wurde dabei mit quasi-statischen Versuchen auf der Druckprüfanlage gefolgt von ersten dynamischen Versuchen auf der Schnellzerreißmaschine.

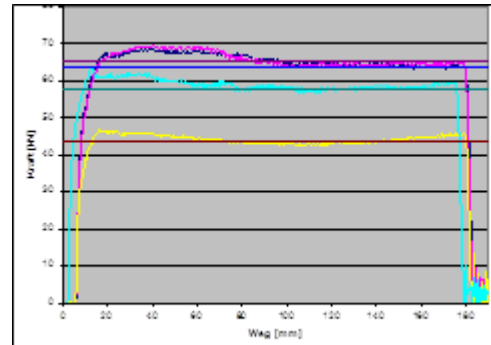


Abbildung 6: Einfaches Versuchsrohr (links) mit gemessenen Kraft-Weg-Kurven (rechts); Simple test specimen (left) with measured force-deflection graph (right)

Die ersten Versuchsergebnisse aus Abbildung 6 bestätigen die theoretischen Annahmen, dass bei Zerspanungsvorgängen gleichmäßige Kraftverläufe ohne größere Kraftsprünge und präzise einstellbare Kräfte möglich sind.

Nach erfolgreichem Nachweis der prinzipiellen Eignung des Verfahrens wurden erste, dem späteren Bauraum im Vorderwagen angepasste, generische Längsträgerstrukturen entwickelt (siehe Abbildung 2).

Entwicklung von Simulationsansätzen

Um im weiteren Verlauf der Entwicklung verstärkt auf numerische Werkzeuge zurückgreifen zu können, wurde eine Methode entwickelt, um das neuartige Energieabsorptionskonzept in der numerischen Simulation abbilden zu können. Hochaufgelöste Betrachtungen der mikromechanischen Vorgänge, wie in Abbildung 7 dargestellt, sind für übliche Vernetzungsgrößen im Fahrzeug aufgrund der enormen Rechenzeiten nicht geeignet.

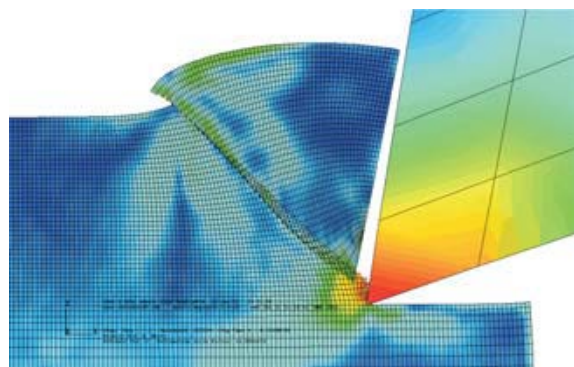


Abbildung 7: FE Berechnung eines Scherspans mit Schneide; Finite element simulation of a shearing chip with cutting edge [3]

Ein Lösungsansatz für die Simulation ist es, den Zerspanungsvorgang mit Hilfe von Analogien in vereinfachte Simulationsmodelle zu übersetzen. Im Realversuch ist die durch den Schälvorgang gegebene Änderung der Ausgangswandstärke gering. Deshalb kann die Schwächung des Rohrquerschnitts in vielen Anwendungsfällen und in der numerischen Simulation vernachlässigt werden. Um in der

Crashsimulation Energie zu absorbieren muss während der Bewegung von Teilen zueinander eine Kraft wirken. Diese kann in der Simulation beispielsweise durch aufgebrauchte Reibkräfte, durch Federn oder durch Dämpfer eingebracht werden. Im Beispielprojekt wurden mehrere Alternativen untersucht und bewertet (siehe Abbildung 8).

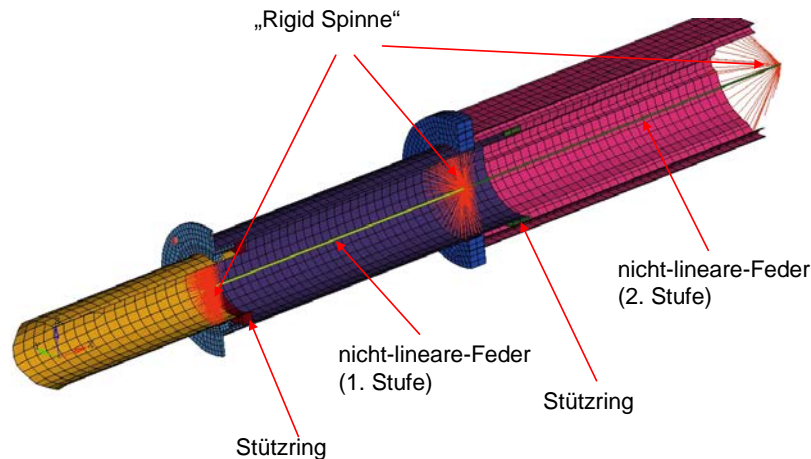


Abbildung 8: Variante des Entwicklungsmodells für die Längskrafterzeugung in der dynamischen Simulation; Variant of the simulation modell for the implementation of axial forces within the dynamic simulation

Als zielführend erwies sich der Einsatz von Federelementen, welchen über die Parametereinstellungen in der Simulationssoftware LS-DYNA Eigenschaften zugewiesen wurden, welche denen der Zerspanungsrohre weitgehend ähneln.

Konzeption einer generischen Vorderwagenstruktur

Mit Hilfe der nunmehr vorhandenen Simulationsmethodik kann die Entwicklung größerer Teilstrukturen, wie der oben beschriebenen Vorderwagenstruktur unter Nutzung der Vorteile der virtuellen Produktentwicklung schnell und effizient durchgeführt werden. Wichtiger Bestandteil der genutzten Entwicklungsmethodik ist die Aufteilung der Gesamtaufgabe in lösbare Teilaufgaben. Diese Vorgehensweise beinhaltet die Strategie, mit einfachen Prinziplösungen die Grundfunktion sicherzustellen, um dann im späteren Entwicklungsverlauf die Konzepte zu detaillieren und die Komplexität zu steigern. Auf Basis der Konzeptidee (Abbildung 3) wurde nun eine Vorderwagenstruktur in einfacher Rahmenbauweise entworfen, welche sich auch für die wirtschaftliche Durchführung von Realversuchen eignet (Abbildung 9)

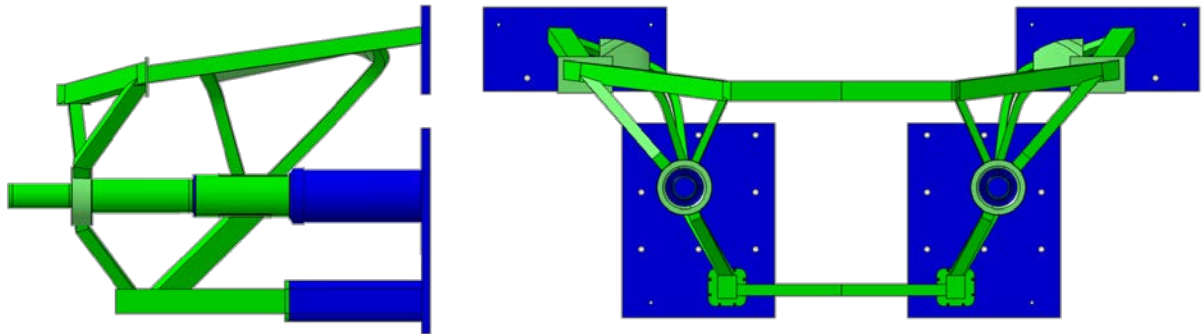


Abbildung 9: Seitenansicht (links) und Vorderansicht (rechts) der Vorderwagenstruktur in Rahmenbauweise (grün) mit Adaptern für den Crashversuch (blau); Side view (left) and front view (right) of the front structure in a frame design (green) with adapters for the crash test (blue)

Die Eigenschaften der Rahmenstruktur wurden unter Anwendung der oben beschriebenen Simulationen optimiert. Dabei wurden die folgenden für den Frontunfall wichtigen Lastfälle betrachtet:

- Frontunfall gegen eine starre Barriere bei voller Überdeckung
- Frontunfall gegen eine starre Barriere bei 40% Überdeckung
- Frontunfall gegen eine 30° schräggestellte Barriere mit 40% Überdeckung

Bei allen durchgeführten Simulationen wurden die Randbedingungen so gewählt, dass sie mit der späteren Anbindung an die Komponentenprüfanlage des Institutes für Fahrzeugkonzepte übereinstimmen. So besitzt der Vorderwagen zusätzlich zum Eigengewicht eine Zusatzmasse, so dass das Gesamtgewicht bei 941kg liegt. Da es sich bei den Simulationen und späteren Versuchen um die Entwicklung und Optimierung einer neuen Struktur handelt, werden alle Einflüsse, welche die Interpretation der Ergebnisse verfälschen vermieden. Beispiel hierfür ist der Verzicht auf die in einigen Crashnormen verwendeten deformierbaren Barrieren, welche einen Teil der Aufprallenergie absorbieren und deshalb die Aussagen über die Leistungsfähigkeit der entwickelten Struktur verfälschen. Wichtig für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit ist außerdem der Vergleich mit konventionellen Referenzstrukturen. Hierzu wurden leichte Karosseriestrukturen aus dem EU-Projekt SuperLight Car [4] ebenfalls mit den oben beschriebenen Simulationslastfällen berechnet.

Aufbau und Crashtest Vorderwagen

Nach Abschluss der virtuellen Vorentwicklung wurden Vorderwagenstrukturen in der in Abbildung 9 dargestellten Profilbauweise gebaut und auf der Komponentenprüfanlage getestet. Das Institut für Fahrzeugkonzepte ist mit dieser Anlage in der Lage, Fahrzeugteilstrukturen bis hin zu vollständigen Karosserien, bei Massen von bis zu 1300 kg und Aufprallgeschwindigkeiten von bis zu 64 km/h im Crashversuch zu testen (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: Komponentenprüfanlage des DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte; Component crash test facility of the DLR-Institute of vehicle concepts

Die Testkonfiguration entspricht exakt den Annahmen der Simulation, so dass aus den Versuchsergebnissen genaue Rückschlüsse auf die Qualität und die Effekte in der Simulation gezogen werden können. Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse des erfolgreichen Vorderwagentests.

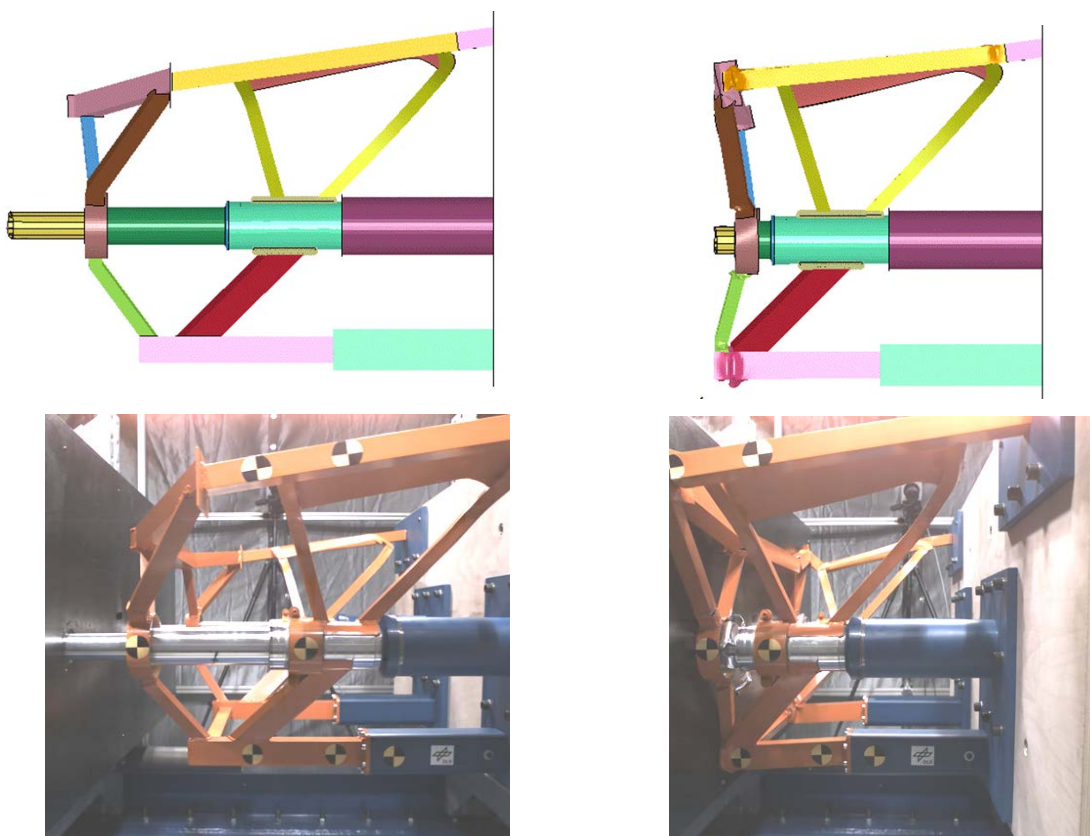


Abbildung 11: Simulationsergebnis (oben) und Ergebnis des Crashversuchs (unten); Simulation results (top) and result of the crash test (below)

Zusammenfassung und Ausblick

Simulation und Versuch sind und bleiben wichtige Bestandteile der Entwicklungskette. Bestrebungen, die Anzahl von Versuchen und Prototypen zu reduzieren können den Entwicklungsprozess verschlanken und effizienter machen. An Grenzen stößt man, wenn neue Bauweisen- oder Werkstoffkonzepte sich durch Simulationsmethoden nach dem Stand der Technik nicht realistisch abbilden lassen. Dann bedarf es der Entwicklung angepasster Simulations- und Testmethoden. Diesen Bedarf hat das DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte identifiziert und hat im Bereich der Simulationsmethoden und bei der technischen Ausstattung Voraussetzungen geschaffen, um die Zuliefer- und Fahrzeugindustrie bei der Entwicklung neuer Bauweisen- und Werkstofflösungen zu unterstützen. Wesentlicher Bestandteil der Versuchsausstattung ist die Komponentencrashanlage, welche durch das Anlagenkonzept einen einfachen Abgleich zwischen Versuchsergebnis und Simulation ermöglicht. Am Beispiel der Entwicklung einer neuartigen Vorderwagenstruktur konnte die Prozesskette von ersten Versuchen an kleinen Funktionsproben, über die Entwicklung von geeigneten Simulationsmethoden bis hin zum realen Crashversuch dargestellt werden.

Literatur

- [1] Markus Faigle, Untersuchungen alternativer Mechanismen zur Crashenergieabsorption, Studienarbeit am DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, 2009
- [2] In Anlehnung an: Henning Wallentowitz, Aufbau von Kraftfahrzeugen, Vorlesungsumdruck Kraftfahrzeuge III, Institut für Kraftfahrwesen Aachen (IKA) 1998, ISBN 3-925 194-24-X
- [3] Prof. Dr.-Ing. H. Weule; Forschung aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe (TH), 2003; Band 118, ISSN 0724-4967
- [4] Kopp, Gundolf und Beeh, Elmar und Goede, Martin und Rafflenbeul, Lukas und Stehlin, Marc; Super Light Car - Leichtbau in der Fahrzeugkarosserie durch Multi-Material-Design; Internationales Stuttgarter Symposium, 24.-25.März 2009, Stuttgart