

Verbesserungspotentiale in der Entwicklung und Validierung hoch dynamisch belasteter Leichtbaukomponenten im Umfeld der Zulieferindustrie

Georg Gruber, Michael Walter und Sandro Wartzack
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik;
Universität Erlangen-Nürnberg*

1 Motivation

In Zeiten der zunehmenden Verknappung von Ressourcen und steigendem Umweltbewusstsein wird die Forderung nach energieeffizienten Lösungen im Transportsektor immer größer. Einen wesentlichen Ansatz zur Steigerung der Effizienz stellt der Leichtbau dar. Im Schienen- Luftfahrt- und Kraftfahrzeugwesen sind Unternehmen demnach bereit immer mehr in Gewichtseinsparungen zu investieren, um den Anforderungen der Kunden und der Gesetzgebung gerecht zu werden [1].

Die steigenden Leichtbaubemühungen und sich verschärfende Marktsituationen erhöhen die finanziellen Belastungen der Hersteller. Ein Weg diesem Trend entgegenzutreten ist unter anderem das Outsourcing von Entwicklungsaufgaben an hoch spezialisierte Zulieferer. Vor allem bei hochdynamisch belasteten Komponenten bestehen nach Meinung der Verfasser Verbesserungspotentiale in frühen Entwicklungsphasen sowie bei der Bauteilvalidierung, die eine erhöhte Leichtbaugüte der zu entwickelnden Komponenten ermöglichen.

2 Entwicklungssituation in Zulieferbetrieben

Die Entwicklungsaufgabe in Zulieferbetrieben startet stets mit der Übergabe des Lastenhefts durch den OEM. In diesem Dokument sind alle an die jeweilige Teilkomponente gestellten Anforderungen festgehalten. Bei strukturrelevanten Teilen umfasst das Lastenheft auch statische bzw. dynamische Anforderungen, welchen die Komponenten standhalten müssen. In frühen Entwicklungsphasen ist es hilfreich die dynamischen Lasten in statische Ersatzlasten zu überführen und diese für erste Strukturoptimierungen zu nutzen. Diese Erstellung der statischen Ersatzlasten erfolgt in der Regel nach Erfahrungswissen aus Mangel an normierten und wissenschaftlich belegten Ansätzen.

Unter Zuhilfenahme der Ersatzlasten können erste topologieoptimierte Lösungen entwickelt werden. Deren strukturelle Nachrechnung gestaltet sich bei Leichtbaukomponenten, die häufig aus anisotropen Verbundwerkstoffen bestehen, besonders in frühen Phasen als äußerst komplex. In der Regel wird der mangelnden Kenntnis des Anisotropiezustands mit pauschalen Abschwächungsfaktoren für die Steifigkeit Rechnung getragen [2]. Abgesehen von reinen Steifigkeitsuntersuchungen ist diese Linearisierung als kritisch anzusehen, da diese Ansätze den Werkstoff unrealistisch hochwertig wiedergeben. Die exakten Werkstoffkennwerte müssen über aufwendige und somit kostspielige Versuche und Simulationen ermittelt werden und liegen in der Regel erst in späten Entwicklungsphasen vor.

Bei dynamisch belasteten Komponenten sind am Ende des Entwicklungszyklus neben Simulationen auch detaillierte physikalische Tests der Prototypen notwendig, da bei der numerischen Berechnung noch nicht alle Einflussgrößen ausreichend sicher berücksichtigt werden können. Weiterhin bestehen gesetzliche Verordnungen, welche die Absicherung im physikalischen Versuch erfordern. Die korrekte Abbildung von Teilen des gesamten Systems als sog. Substruktur in einem kostengünstigen Komponententest bereitet vor allem bei Crashuntersuchungen große Probleme, da das Verhalten der Systemschnittstellen mit berücksichtigt werden muss.

3 Verbesserungsansätze

Bei der Überführung dynamischer in statische Probleme müssen die aus der Bewegung entstehenden Belastungen mittels statischer Ersatzlasten abgebildet werden. Im Maschinenbau ist das Aufstellen statischer Ersatzlasten vor allem aus der Wälzlagerberechnung bekannt. Allen bestehenden Ansätzen ist gemein, dass sich die Vorgehensweisen meist auf spezielle Anwendungs-

fälle beziehen, da deren Ermittlung auf empirischen Ansätzen beruht. Auch bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit fokussierten hoch dynamisch belasteten Bauteilen ist eine Unterscheidung in spezielle Anwendungsszenarien sinnvoll. Beispielsweise kann ein Ersatzlastkollektiv für schlagbelastete Komponenten erstellt werden, um mithilfe der Ersatzlasten eine Topologieoptimierung durchzuführen, welche einen ersten Geometrieorschlag liefert. Im Rahmen simulativer Studien sollen hierfür Crashlastfälle betrachtet und aus den Belastungen im zeitlichen Verlauf repräsentative Ersatzlasten bestimmt werden.

Nachdem erste Geometrieorschläge für das zu entwerfende Bauteil bestehen, sind diese rechnerisch abzusichern. Um bereits in frühen Phasen im Rahmen erster Struktursimulationen eine hohe Ergebnisgüte zu erhalten sind die gängigen Ansätze der vereinfachenden Materialbeschreibung zu vermeiden. Einen hohen Einfluss auf die Berechnung bei Verbundwerkstoffen hat der Effekt der Anisotropie. Im Rahmen des Beitrags soll ein Berechnungsansatz für faserverstärkte Kunststoffe vorgestellt werden, bei dem die übliche globale isotrope Betrachtung in eine lokale Isotropie-Betrachtung überführt wird. Es wird auf einen Reverse-Engineering-Ansatz von WARTZACK [3] aufgesetzt. Dabei wurde ein realer Komponentencrashtest einer Simulationsrechnung des identischen Testaufbaus gegenübergestellt und der E-Modul sowie das Bruchverhalten lokal angepasst, dass Berechnung und Simulation eine sehr gute Übereinstimmung lieferten. Grund für die Notwendigkeit der lokal unterschiedlichen Materialkennwerte ist die Tatsache, dass durch den Fertigungsprozess die Fasern innerhalb des Bauteils unterschiedlich orientiert sind. Bereiche bei denen Belastungsrichtung und Faserorientierung gut übereinstimmen erhalten hohe bzw. senkrecht zur Orientierung belastete Bereiche erhalten niedrige mechanische Kennwerte. Die Materialbeschreibung bleibt isotrop, was eine stabile und schnelle Berechnung garantiert.

In frühen Entwicklungsphasen liegen jedoch keine für das Reverse-Engineering notwendigen Prototypenbauteile vor. Weiterhin soll auch die gängige Prozesskette der integrativen Simulation [4] vermieden werden, da diese mit einer langwierigen Modellaufbereitung und langen Berechnungszeiten verbunden ist. Deshalb ist eine lokale Isotropie über einen vereinfachten zweistufigen Simulationsansatz zu ermitteln. Dabei wird eingangs durch eine überschlägige Prozesssimulation die Orientierung der Fasern ermittelt. Hier sollen bevorzugt konstruktionsbegleitende Systeme eingesetzt werden, welche ein einfaches Aufsetzen der Simulation sowie schnelle Berechnungszeiten garantieren. In einer zweiten Simulation soll der Verlauf der Kraftlinien ermittelt werden. Dies erfolgt in einer linear-elastischen Berechnung, welche durch Bildung der resultierenden Hauptspannung den Kraft-

fluss liefert. Über einen Mapping-Algorithmus müssen den Bauteilbereichen entsprechende Materialkennwerte zugewiesen werden. Das Materialverhalten soll in die drei Bereiche *parallel (P)* bzw. *senkrecht (S)* belastet, sowie *Isotrop (I)* (aufgrund regelloser Faserverteilung) aufgeteilt werden. Die jeweilige Materialbeschreibung wird von entsprechenden Spannungsdehnungs-Kurven abgeleitet, welche zum Teil in der Literatur zu finden sind oder aus eigenen Tests stammen. Sollten aufgrund großer Deformationen große Änderungen des Kraftflusses entstehen muss dieser neu ermittelt werden und eine Aktualisierung des Mappings erfolgen.

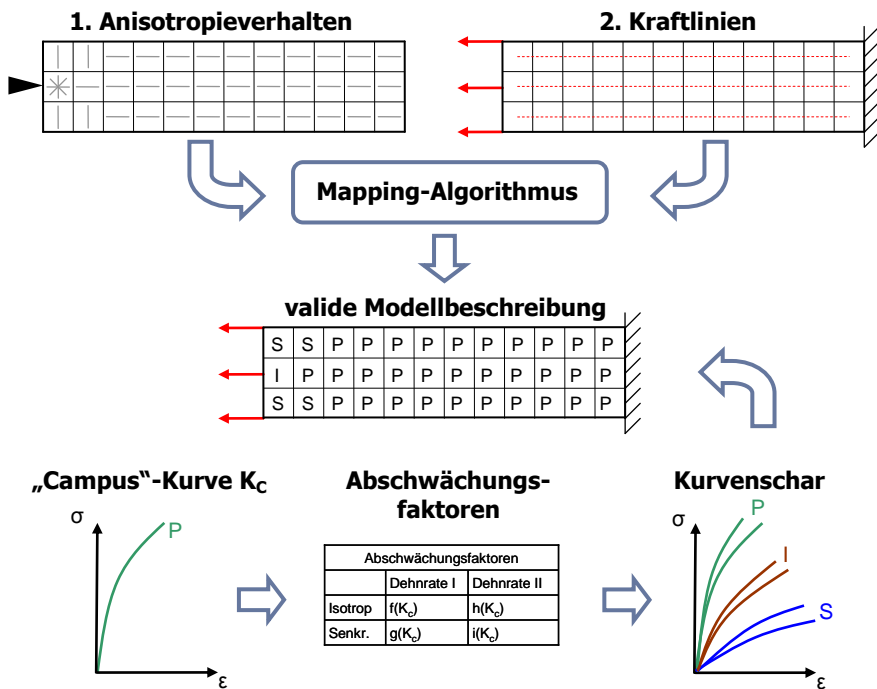


Bild 3.1: Zweistufiger Simulationsansatz

Da für den Großteil der Kunststoffe lediglich Kennwerte für faserparallele Belastung vorliegen, ist eine Erstellung eines Kataloges an Abschwächungsfaktoren zur systematischen Ableitung des isotropen bzw. senkrecht belasteten Werkstoffverhaltens anzustreben. Zusätzlich kann über systematische Abschwächungsfaktoren die Dehnratenabhängigkeit in Form von Kurvenscharen ermittelt werden. Der grundlegende Ablauf des vereinfachten Simulationsansatzes ist in Bild 3.1 zusammenfassend dargestellt.

Stehen erste Prototypen zur Verfügung, ist es notwendig das Verhalten der Komponenten unter den vorgegebenen dynamischen Lasten zu überprüfen. Hochdynamische Lastszenarien, welche im Fokus des vorliegenden Beitrags stehen, treten vor allem bei Crashvorgängen auf. Diese sind stets mit großen Deformationen der Strukturen verbunden. Bei der für den Komponententest notwendigen Submodellbildung ist es folglich nicht zulässig von konstanten Schnittstellen auszugehen. Neben deformierbaren Lagerstellen müssen zusätzlich im Deformationsverlauf entstehende Abstützungen mit abgebildet werden. Ein Ansatz für realistische Komponententests für Fahrzeugtüren mit flexiblen Schnittstellen wurde von WARTZACK und ZENS [5] bereits vorgestellt. Auf Basis dieser Vorarbeiten soll eine allgemeine Methodik entwickelt werden, um flexible Aufnahmen für verschiedenste Prüfkomponenten systematisch zu generieren.

Den Ausgangspunkt stellt jeweils die Impaktanalyse der Gesamtstruktur dar. Im Kontext der Fahrzeugtechnik handelt es sich hierbei um die Crashsimulation des Gesamtfahrzeugs. Der erste Schritt ist die Ermittlung eines reduzierten Energieanteils, welcher als Lastrandbedingung auf die Komponente aufgeprägt werden muss. Anschließend werden die Lager- sowie die Berührstellen der Komponenten bestimmt, welche die Schnittstellen zum Gesamtsystem darstellen. Im Berechnungsmodell des Makrosystems müssen die Bewegungsabläufe der Knoten im Schnittstellenbereich analysiert werden. Hier gilt es sowohl den kinematischen als auch den dynamischen Deformationsablauf zu charakterisieren. Unter dem kinematischen Verhalten ist das rein geometrische Deformationsgeschehen zu verstehen. Es kann eine Unterscheidung in Translation, Rotation bzw. Überlagerung beider Bewegungsabläufe vorgenommen werden. Das dynamische Verhalten kann im Wesentlichen in proportionales sowie progressives bzw. degressives Schnittstellenverhalten unterteilt werden. Da es sich bei Crashvorgängen um hoch komplexe Vorgänge handelt, weisen einzelne Schnittstellen im zeitlichen Verlauf häufig unterschiedliche Charakteristika auf.

Zur Durchführung des realen Komponenten-Crashtests soll ein Baukasten entwickelt werden, welcher eine systematische Abbildung der Schnittstellen in Abhängigkeit von den Schnittstellencharakteristika erlaubt. Ziel des Baukastens ist zum einen eine hohe Flexibilität, um alle wesentlichen Randbedingungen abbilden zu können. Zum anderen muss die Kalibrierung schnell und kostengünstig durchführbar sein. Die Grundzüge des möglichen methodischen Vorgehens sind am Beispiel einer einfachen Balkenstruktur in Bild 3.2 dargestellt.

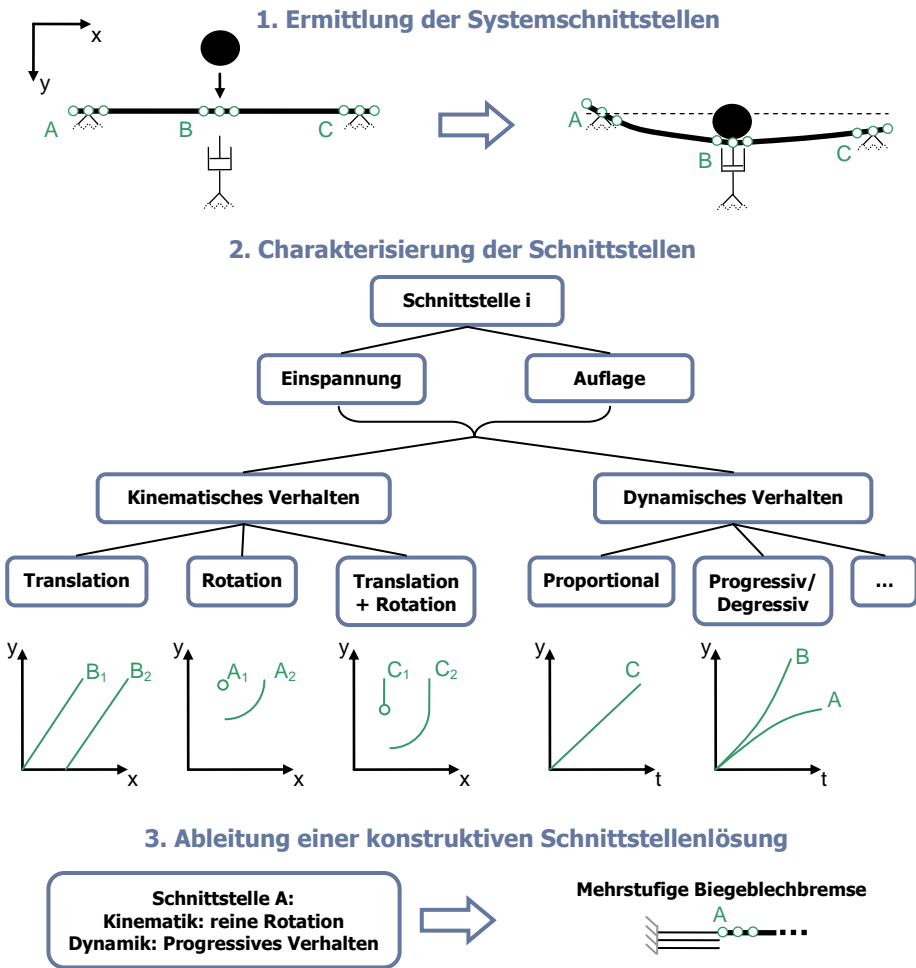


Bild 3.2: Methodischer Ansatz zur Submodellbildung bei Crashtests

Im Vorherigen wurden drei Ansätze zur Verbesserung der Entwicklung und Validierung hoch dynamisch belasteter Leichtbaukomponenten im Umfeld der Zulieferindustrie vorgestellt. Bild 3.3 fasst diese in einem Ablaufschema zusammen. Durch die Erstellung topologischer Lösungen unter Zuhilfenahme von Ersatzlasten, sowie durch aussagekräftige Berechnungsansätze für frühe Entwicklungsphasen sollen unnötige Iterationsschleifen vermieden werden. Die Bereitstellung einer Methodik zur Generierung von Komponententests soll eine belastbare versuchstechnische Bauteilabsicherung ermöglichen, bevor erste Prototypen des Gesamtsystems vorliegen.

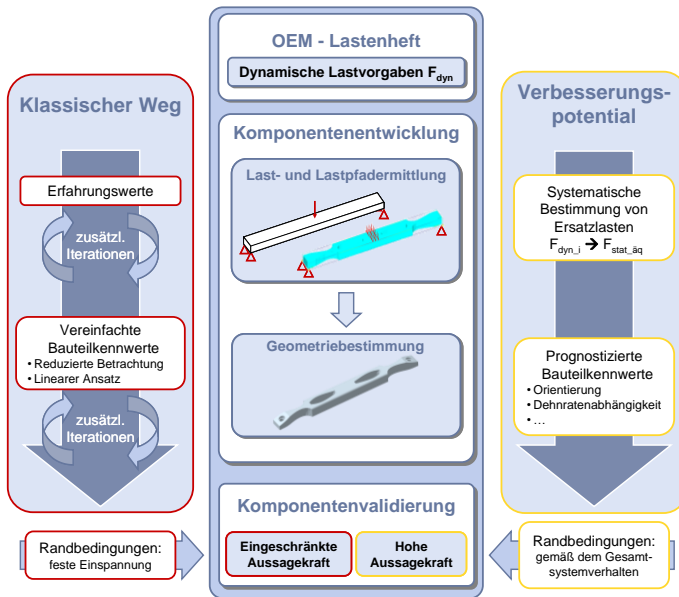


Bild 3.3: Ablaufschema der Komponentenentwicklung

4 Fallbeispiel Seitenaufprallschutz aus Kunststoff

Im Folgenden werden am Beispiel der Entwicklung eines Seitenaufprallträgers (engl. SIPS – Side Impact Protection System) für Leichtkraftfahrzeuge (LKfz) die im Vorhergehenden beschriebenen Ansätze vorgestellt. Bei LKfz handelt es sich um zunehmend elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge mit einem zulässigen Maximalgewicht von 400 kg. Derzeit ist für Fahrzeuge dieser Klassen keine Erfüllung von Craschnormen verpflichtend. Untersuchungen des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. haben ergeben, dass LKfz bei den gängigen Crashtests vergleichsweise schlecht abschneiden. „Die vorgeschriebene Massenbeschränkung erlaubt nicht ohne weiteres die Verwendung zeitgemäßer Sicherheitseinrichtungen und ausreichend steifer Strukturen“ [6]. Vor diesem Hintergrund ist für ein LKfz ein Seitenaufprallschutz zu entwickeln, wobei die vorgestellten Ansätze eingesetzt bzw. angedeutet werden sollen. Die Untersuchungen werden an einer vergleichbaren Referenz-Kleinwagenstruktur durchgeführt.

Die Komponente soll hinsichtlich des NCAP Pfahltests optimiert werden. Bei diesem Szenario schlägt das Testfahrzeug seitlich mit 30 km/h auf eine feste zylindrische Barriere auf. Im Rahmen des Projekts wird gefordert, dass

der Seitenaufprallträger 20% der Last aufnimmt. Verglichen mit der Referenzstruktur soll das Bauteilgewicht von 2 kg auf 1,7 kg reduziert werden, was einer Massenabnahme von 15% entspricht. Dieses Entwicklungsziel soll durch den Einsatz von kurzfaserverstärktem Kunststoff erreicht werden.

4.1 Topologieoptimierung mithilfe von Ersatzlasten

Der erste Schritt besteht im Auffinden der Lastpfade im Rahmen einer Topologieoptimierung. Basierend auf diesen Ergebnissen kann eine geometrische Lösung abgeleitet werden. Für die Optimierungsrechnung müssen eingangs der zur Verfügung stehende Bauraum, der Werkstoff, die Last sowie Optimierungsrandbedingungen festgelegt werden. Der zulässige Bauraum wird anhand einer Analyse der Referenz-Fahrzeuggeometrie festgelegt. Als Werkstoff wird ein kohlenstofffaserverstärkter Polyamid der Firma BASF (Ultramid T KR 4370) gewählt, dessen Kennwerte in freien Materialdatenbanken hinterlegt sind. Die Einspannung des Modells erfolgt an den Rändern, vereinfachend als Festlager ausgeführt. Da die Aufgabe des Seitenaufprallschutzes die Sicherung der Fahrgastzelle darstellt, wird als Optimierungsziel eine maximale Steifigkeit angestrebt, wobei das geforderte Maximalgewicht von 1,7 kg nicht überschritten werden darf. Eine Schwierigkeit stellen die aufzubringenden Kräfte dar, da dynamische Lasten nicht direkt aufgeprägt werden können. Beim Pfahltest wirkt zu Beginn des Crashvorgangs die Kraft als eine linienförmige Last. Während des Deformationsverlaufs wächst diese zu einer Flächenlast an. Durch eine Impaktsimulation wurde der Seitenaufprallträger der Referenzstruktur untersucht und die Angriffsfläche bei halbem Deformationsverlauf als Zielfläche für die Lasteinleitung gewählt. Die Flächenlast wird zu den Seiten hin abfallend gestaltet, entsprechend der Kontur des Pfahls (vgl. Bild 4.1 rechts). Diesem Ansatz liegt der Gedanke zu Grunde, dass die Optimierung nur für eine diskrete Momentaufnahme des Deformationsvorgangs erfolgen kann. Die Fokussierung auf den Zustand bei halbem Deformationsweg soll eine Reduktion des Problems mit erhöhter Aussagekraft ermöglichen. Zusätzlich wird eine Optimierung mit zentraler Lasteinleitung in Form einer Linienlast aufgestellt. In beiden Fällen werden in Summe die gleichen Lastbeträge aufgeprägt. Der konkrete Kraftwert kann beliebig angesetzt werden, da es sich um die Optimierung eines rein linearen Problems handelt. Die ermittelten Optimierungsstrukturen für beide Fälle sind Bild 4.1 zu entnehmen. In beiden Varianten fallen die Lastpfade sehr ähnlich aus. Der wesentliche Unterschied ist in der Trägermitte zu erkennen. Hier fällt der zentral auftretende, kaum belastete Bereich bei verteilter Lasteinleitung erkennbar größer aus. Für beide Optimierungen werden die Lastpfade konstruktiv über eine Fachwerkstruktur abgebildet, (vgl. Bild 4.2 oben) bei welcher der Abstand der mittleren Kreuzungspunkte entsprechend der

Optimierung unterschiedlicher ausgeführt wird. Die Wandstärken wurden jeweils in Form einer Parameteroptimierung bestimmt.

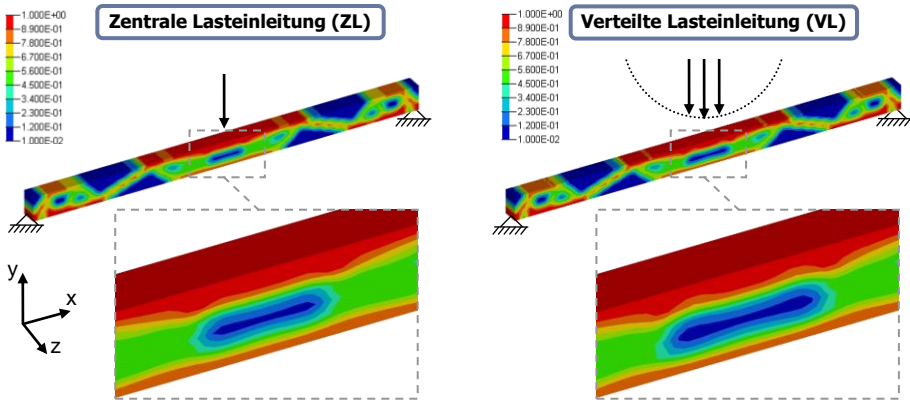


Bild 4.1: Optimierungsstrukturen bei unterschiedlicher Lastaufbringung

Zur Bewertung der Strukturperformanz werden die beiden erstellten Kunststoff-Seitenaufprallträger im Rahmen eines Komponenten-Crashtests mit fester Einspannung untersucht. Dabei stößt der Pfahl, der mit einer Masse von 20% des Fahrzeuggewichts modelliert wurde, gegen den Träger. Zum Vergleich wird auch eine Simulation mit einem gewichtsäquivalentem Stahlträger durchgeführt, welcher entsprechend dem Referenzfahrzeug als einfache Rohrkonstruktion ausgeführt ist. Der Stahl sowie der Kunststoff werden mit einem nichtlinearen Johnson-Cook-Ansatz abgebildet, wobei das Versagen in Abhängigkeit von der Dehnung definiert wird. Die Anisotropie wird vereinfachend mit einem Abschwächungsfaktor von 0,8 für Steifigkeit und Festigkeit berücksichtigt (vgl. [2]), da der im Folgekapiel beschriebene Ansatz zur Abbildung des richtungsabhängigen Materialverhaltens sich noch in der Entwicklung befindet. Die Simulationen ergeben, dass die maximale Deformation des Stahlträgers mit ca. 125 mm ca. 6% größer ausfällt als bei den Kunststoffvarianten. Durch Berücksichtigung der verteilten Lasteinleitung kann bei den Kunststoffträgern die Intrusion um einen weiteren Millimeter reduziert werden.

4.2 Strukturmechanische Auslegung

Wie der in Kapitel 3 vorgestellte Ansatz zur Berücksichtigung der Anisotropie eingesetzt werden kann, soll ebenfalls am Beispiel des Seitenaufprallschutzes demonstriert werden. Ausgangspunkt ist das auf Grundlage

der Topologieoptimierung erstellte 3D-Modell der Komponente. Die Faserorientierung wird durch eine Füllsimulation ermittelt. Da der Berechnungsansatz speziell auch in frühen Phasen eingesetzt werden soll, kommt das konstruktionsbegleitende Tool Moldflow MPA zum Einsatz. Diese Software ermöglicht die Berechnung der Oberflächenorientierung, welche eine erste Aussage hinsichtlich der Faserorientierung liefert. In einer unabhängigen linearelastischen Strukturberechnung wird über die resultierende Hauptspannung der Kraftfluss zu Beginn des Deformationsvorgangs bestimmt. Über einen Mappingalgorithmus muss geprüft werden inwiefern Belastungs- und Werkstofforientierung übereinstimmen. Anschließend ist den finiten Elementen des Crashrechnungsnetzes das jeweils entsprechende Werkstoffmodell zuzuweisen.

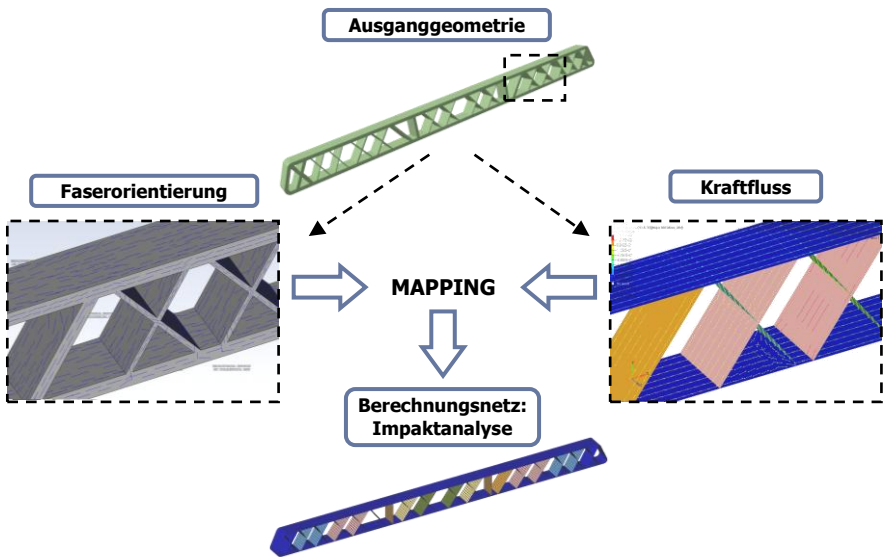


Bild 4.2: Mapping von Faserorientierung und Kraftlinienverlauf

In Bild 4.2 ist der Kraftlinienverlauf sowie die Orientierung für einen kleinen Abschnitt der Beispielkomponente dargestellt. Man erkennt, dass weitgehend eine gute Übereinstimmung der Orientierung mit der Lastrichtung vorliegt. Im Bereich der Rippenkreuzungspunkte führen unregelmäßige Faserläufe jedoch zu ungünstigen Belastungsverhältnissen, welche durch entsprechende Materialzuweisungen berücksichtigt werden müssen. Das hier visuell dargestellt Mapping ist jedoch noch in eine Software zu implementieren, um einen automatisierten Ablauf zu ermöglichen.

4.3 Ableitung der Schnittstellen für Komponenten-Crashtests

Nachdem die Entwicklungsschleife erstmals durchlaufen ist, soll eine Validierung des Bauteils beim Zulieferer erfolgen. Da die Gesamtfahrzeugstruktur für entsprechende Versuche nicht zur Verfügung steht wird der in Kapitel 3 vorgestellte Ansatz des Komponenten-Crashtests eingesetzt. Ausgangspunkt stellt die Crashsimulation des Gesamtfahrzeugs dar, wobei zur Reduktion der Berechnungszeiten lediglich die Teilstruktur des Türumfeldes mit dem Standard-SIPS untersucht wird. Die erzielten Ergebnisse liefern demnach nur qualitative Aussagen. Im Gegensatz zur Definition des Pfahltests nach NCAP wird das Fahrzeug als raumfest angenommen, während der Pfahl mit der Versuchsgeschwindigkeit und einer äquivalenten Masse versehen wird. Dieser Tausch der Bezugssysteme ermöglicht eine direkte Übertragung der Simulationsergebnisse auf den Komponententest, bei dem ebenfalls die Testkomponente als raumfest angenommen wird. Bild 4.3 zeigt die Simulation des reduzierten Gesamtsystems. Zur Charakterisierung der Systemschnittstellen werden die Deformationsverläufe der Aufnahmepunkte des SIPS ausgewertet.

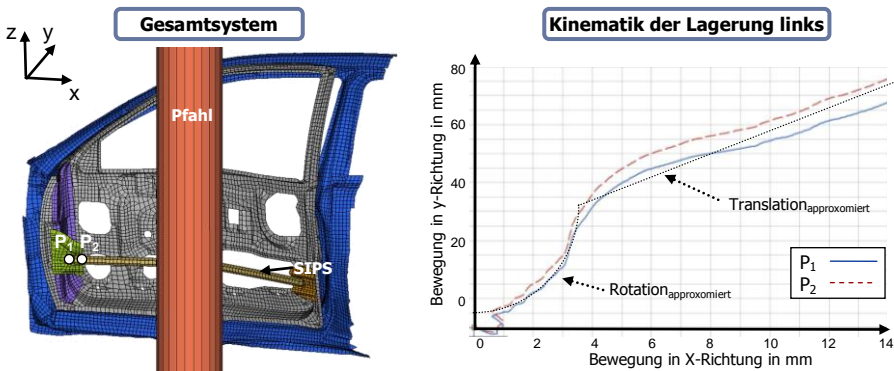


Bild 4.3: Türmodul (Außenblech ausgeblendet) nach der Deformation

In Bild 4.3 rechts sind für die linke Einspannung des SIPS die Bewegungsabläufe zweier Knoten in der XY-Ebene dargestellt. Die Deformation kann durch eine reine Rotation mit einer anschließenden geradlinigen Translation approximiert werden. Die Realisierung der Rotation soll durch eine Biegeblechbremse mit definiertem Anschlagpunkt erfolgen. Die nachfolgende geradlinige Bewegung kann durch entsprechende Reibelemente erzeugt werden. Diese Betrachtungen müssen in selber Weise für die rechte Einspannung sowie für die mittig entstehende Abstützung am Türinnenblech

erfolgen. Weiterhin ist der zeitabhängige Verlauf der Schnittstellen-deformation zu untersuchen und eventuelles progressives bzw. degressives Verhalten bei der Erstellung der Lagerelemente zu berücksichtigen. Auf Rücksicht des Umfangs des Beitrags wird auf diese weiterführenden Betrachtungen verzichtet.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden drei Bereiche in der Entwicklung hoch dynamisch belasteter Leichtbaukomponenten aufgezeigt, welchen vor allem in Hinblick auf die Entwicklungsabläufe bei Zulieferern Verbesserungspotential aufweisen. Speziell in frühen Phasen soll eine systematische Reduktion dynamischer Probleme auf statische Ersatzbetrachtungen den Einsatz von Topologieoptimierungen ermöglichen. Ebenfalls im Kontext der frühen Phasen werden Berechnungsansätze für eine erste Bauteilauslegung gefordert. Im Sinne eines „Predictive Engineering“ wird weiterhin die Notwendigkeit eines systematischen Ansatzes zum Aufstellen von Komponenten-Crashtests gefordert. Für die drei genannten Bereiche wurden mögliche Lösungsansätze vorgestellt und am Beispiel der Entwicklung eines Seitenaufprallschutzes verdeutlicht.

Literatur

- [1] Imam, O.; Naughton, P.: Leichtbau von Automobilkarosserie und -interieur. *Lightweight Design*, 3 (2009), S. 32–36.
- [2] Schmachtenberg, E.: Wenn Kunststoffe Metall ersetzen. *Plastverarbeiter* 08/2004, S. 52/53.
- [3] Wartzack, S.: Versagensprognose bei der Crashsimulation von Kunststoff Türsystemen zur Erschließung des Leichtbaupotenzials in Fahrzeugen. In: VDI-Bericht der Tagung SIMVEC 2008. Baden-Baden: 2008.
- [4] Assaker, R.: Digimat Multi-Scale Modeling. In: Baur, E. (Hrsg.) *Kunststoffe+Simulation* 2008. Stuttgart: 2008.
- [5] Wartzack, S.; Zens, T.: Ein Seitenaufprallprüfstand für Fahrzeugtüren als Beispiel für ein erfolgreiches Zusammenwirken von Simulation und Versuch. *VDI-Berichte* Nr. 1900, 2005.
- [6] Gwehenberger, J.; Reinkemeyer, C.; Kühne, M.: Untersuchungen des Sicherheitsrisikos von Leichtkraftfahrzeugen. GDV e. V. Berlin: 2007.