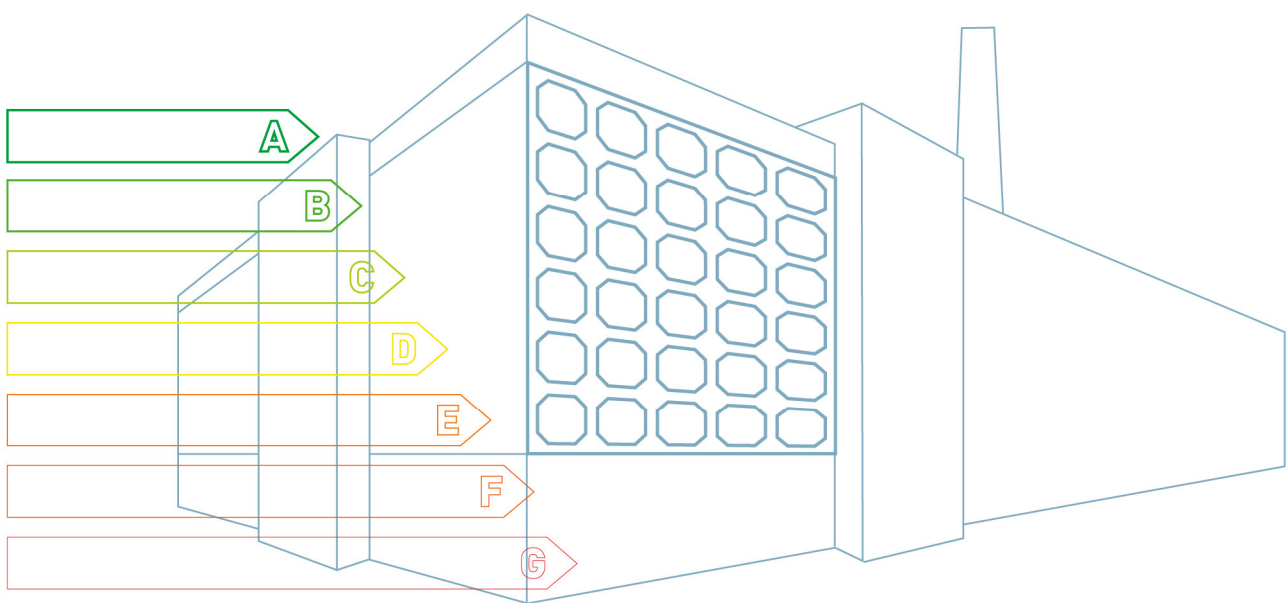




Weiterführende virtuelle Methoden und Softwareentwicklung zur Absicherung der Betriebsfestigkeit für den Multimaterial Leichtbau



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „e!Mission.at“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, featuring a large, looped 'T' and a cursive 'Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

Weiterführende virtuelle Methoden und Softwareentwicklung zur Absicherung der Betriebsfestigkeit für den Multimaterial Leichtbau

ABIL2

Autoren:

Gerhard Kepplinger

Dr. Michael Hofer

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
1.1	Einleitung	5
1.2	Aufgabenstellung	5
1.3	Schwerpunkte des Projektes	5
1.4	Einordnung in das Programm	7
1.5	Verwendete Methoden	7
1.6	Aufbau der Arbeit	8
2	Inhaltliche Darstellung	8
2.1	Virtuelle Entwicklung Betriebsfestigkeit betreffend Verbindungstechniken aufgrund Multimaterialmix für den Leichtbau (AP1)	8
2.1.1	Lebensdauerabschätzung von Klebungen mit Substratkombinationen Aluminium-Aluminium und Stahl-Aluminium	8
2.1.2	Lebensdauerabschätzung für Verklebungen von Composites	12
2.1.3	Bewertung punktförmiger Füge-technik von Bauteilen aus Composites	15
2.1.4	Ablauf zur Bewertung kritischer Schrauben in Fahrzeugstrukturen	17
2.1.5	Bewertung von Schweißnähten an Hybridstrukturen (Gussteile, Strangpressprofile, Bleche)	18
2.1.6	Beurteilung der Füge-technik hinsichtlich Kurzzeitfestigkeit	20
2.2	Methoden und Werkzeuge für Festigkeit, Steifigkeit, Ermüdung, Lebensdauerabschätzung für die virtuelle Entwicklung Betriebsfestigkeit aufgrund der Anforderungen des Multimaterial Leichtbaus (AP2)	22
2.2.1	Bestimmung des Potenzials für anisotropen Materialeinsatz	22
2.2.2	Erweiterung des PUCK-Kriteriums basierend auf der FEM-Analyse von Composites	25
2.2.3	Composite-Bewertung Gesamtprozess: Steifigkeit, Festigkeit und Lebensdauer	28
2.2.4	Simulations- und Erprobungsmethoden für hochfeste Stahlwerkstoffe und innovative Aluminiumwerkstoffe	35
2.2.5	Schädigungsrechnung unter Berücksichtigung von nichtlinearem Strukturverhalten durch Kontakte	36
2.2.6	Schädigungsrechnung auf der Basis spektraler Leistungsdichte (PSD)	38
3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	41
4	Ausblick und Empfehlungen	41
5	Literaturverzeichnis	43
6	Kontakt-daten	44

1.1 Einleitung

Ziel des Projektes ABIL2 ist die virtuelle Betriebsfestigkeitsbeurteilung innovativer Bauteil-, Modul- und Gesamtfahrzeugstrukturen mit Fokus Multimaterialmix und der daraus erforderlichen speziellen Verbindungstechniken bzw. Leichtbauwerkstoffe, wie faserverstärkte Kunststoffe oder Faserverbundstoffe. Dies stellt einen wesentlichen Baustein zur Massen- bzw. Gewichtsreduktion sowie in weiterer Folge zur daraus resultierenden Energieeffizienz von Automobilen dar, da die Entwicklung der Fahrzeuge hinsichtlich Steifigkeit, Festigkeit und Betriebsfestigkeit bis zu einem hohen Reifegrad durchgängig virtuell erfolgen kann.

1.2 Aufgabenstellung

Auf Basis neuer Simulationsmethoden soll es möglich sein, zusätzliche Gewichtseinsparungspotenziale zu realisieren, die mit herkömmlichen Methoden wie z.B. der Durchführung von zahlreichen teuren Prüfstandversuchen mit den entsprechenden Prototypen nicht oder nur teilweise erreicht werden können. Durch die konsequente Entwicklung und Anwendung von strukturunabhängigen Verbindungstechniken sowohl für punktförmige Verbindungen (Stanznieten, Schraubverbindungen etc.) als auch für linien- und flächenförmige Verbindungen (Schweißnähte, Klebungen) kann die Zeit zur Erstellung der Finite Elemente Modelle deutlich reduziert werden, wodurch die virtuellen Schleifen schneller durchgeführt und zusätzliche Optimierungsmaßnahmen eingebracht werden können.

Darüber hinaus ist es das Ziel, durch eine weitgehende Abbildung von hochgradig nichtlinearen Prozessen in der Finite Elemente Simulation und der nachfolgenden Steifigkeits-, Festigkeits- und Betriebsfestigkeitsauslegung das Spektrum jener im Entwicklungsprozess relevanten Lastfälle deutlich zu erweitern, die auf Basis der Simulation beurteilt werden können.

Die entwickelten Methoden und Konzepte fließen unmittelbar in die bestehende Betriebsfestigkeitssoftware in der Form von (Software-) Prototypen ein, und werden nach Validierung mit den zur Verfügung stehenden Versuchsergebnissen und anschließender Verfeinerung sowie nach dem Test der Prozessimplementierung schrittweise in den Entwicklungsablauf eingebracht.

1.3 Schwerpunkte des Projektes

Die virtuelle Erprobung und Simulation betreffend Steifigkeit, Festigkeit und Betriebsfestigkeit für innovative Leichtbaustrukturen stellt große Anforderungen an die zu entwickelnden Methoden und Verfahren. Für metallische Werkstoffe wie Stahl und Aluminium existieren jetzt einige entsprechende praxistaugliche Ansätze, die nicht zuletzt im abgeschlossenen Projekt ABIL entwickelt und in einer Betriebsfestigkeitssoftware umgesetzt wurden, wobei erstmalig auch ein entsprechender Fokus auf die Beurteilung der Verbindungstechnik gelegt wurde. Die in diesem Projekt verfolgte Auslegung auf Basis Simulation für faserverstärkte Kunststoffe bzw. Faserverbundstoffe, aber auch insbesondere für deren Kombination mit metallischen Werkstoffen in Hybridstrukturen, wie sie im Multimaterial Leichtbau zur Anwendung kommen, ist aufgrund der hohen Komplexität der Werkstoffe und der sich daraus

ergebenden neuen Schadensmechanismen und -formen überaus schwierig und konnte bislang noch nicht durchgeführt werden. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Berücksichtigung der speziellen Verbindungstechnik im Multimaterialmix dar, wobei die bisherigen Methoden und Ansätze erweitert bzw. gänzlich neu entwickelt werden müssen.

Weiter ist es notwendig, auch immer mehr hochgradig nichtlineare Lastfälle, die bisher nur mittels physischer Erprobung beurteilt werden können, in den virtuellen Entwicklungsprozess zu integrieren. Die sich daraus ergebenden Schwierigkeiten erstrecken sich von der Entwicklung spezifischer FE-Modellierungen, über die Berücksichtigung spezieller, auftretender Effekte (z.B. Plastifizierungseffekte) bis hin zur Entwicklung von geeigneten Versagenskriterien und Lebensdauermodellen und der Ableitung der benötigten Werkstoffkennwerte. Eine zentrale Rolle spielt die Validierung der entwickelten Methoden mit Versuchsergebnissen und Ergebnisse von Erprobungen, die aus der Literatur, aus Veröffentlichungen, aus parallel durchgeführten Projekten bzw. aufgrund der Teilnahme an entsprechenden Arbeitskreisen zur Verfügung stehen. Mit den in diesem Projekt verfolgten Methodenentwicklungen ist es möglich, die netzunabhängigen Vorgehensweisen zur Verbindung der Strukturen, auch auf den Bereich der Solid- Schalenverbindungen, wie sie etwa bei der Verbindung von Blechen oder Strangpressprofilen mit Gussknoten auftreten, zu erweitern. Dies betrifft nicht nur die Generierung von netzunabhängigen Ersatzmodellen zur Verbindung in den FE-Strukturen sondern auch die nachfolgende Lebensdauerabschätzung. Die Ausgangsbasis für praxistaugliche Verfahren zur Lebensdauerabschätzung von Klebungen auf Basis von metallischen Werkstoffen mit dem Schwerpunkt Stahl für schwingende Beanspruchung konnte durch das abgeschlossene Projekt ABIL, FFG-Nr. 825378, entwickelt werden. Die in diesem Projekt verfolgte Weiterentwicklung der Methoden zur Auslegung der Klebeverbindungen zwischen faserverstärkten Kunststoffen und Faserverbundstoffen, aber auch für Kombinationen mit metallischen Werkstoffen und die nachfolgende Implementierung eines anwendungsorientierten Verfahrens in einer Software ist bisher nicht verfügbar. Im Weiteren ist die Beurteilung der neuen Werkstoffe hinsichtlich Steifigkeit-, Festigkeit- und Betriebsfestigkeit an sich mit dem Ziel der virtuellen Entwicklung Neuland. So müssen z.B. geeignete FE-Modellierungen zur Abbildung des komplexen Aufbaus von Composite-Werkstoffen entwickelt werden, mit denen dieses Ziel erreicht werden kann. Entsprechende Methoden zur Abbildung der speziellen Versagensmechanismen in den einzelnen Lagen mit unterschiedlicher Faserausrichtung, Fasertypen und Faseranteilen müssen entwickelt und in die Software integriert werden. Die Definition des Lagenaufbaus für bestimmte Bauteile oder Module basiert derzeit zum größten Teil auf Erfahrungswerten und Annahmen und es gibt keinen durchgängigen Prozess von der Konstruktion zur Simulation sowie zur Rückführung der optimierten Ergebnisse in den konstruktiven Bereich. Mit der Entwicklung der in diesem Projekt geplanten Methoden ist es nun möglich, dass bereits in einer frühen Phase im Entwicklungsprozess auf Basis von Simulationsergebnissen für die an die Bauteile- bzw. Module- gestellten Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit-, Festigkeit- und Betriebsfestigkeit ein Erstvorschlag für einen optimierten Lagenaufbau weitgehend automatisiert erstellt werden kann, der eine Basis für die konstruktiven Verbesserungen im weiteren Entwicklungsablauf darstellt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die in diesem Projekt angestrebten Ergebnisse einen großen Technologiesprung für die virtuelle Entwicklung für Steifigkeit-, Festigkeit- und Betriebsfestigkeit darstellen, weil Bereiche, für die bisher noch keine oder keine geeigneten Berechnungsverfahren zur Verfügung stehen, erstmalig in die Simulation eingebunden werden können. In weiterer Folge eröffnen

die im Rahmen dieses Projekt zu entwickelnden Methoden und Verfahren auf Basis eines strukturierten und systematischen Ansatzes einen neuen, zukunftsweisenden Weg, die von innovativen Multimaterial Leichtbaustrukturen direkt und indirekt verursachten Kosten und Aufwände bei Energie und Material zu minimieren.

1.4 Einordnung in das Programm

Die mit diesem Projekt verfolgte virtuelle Betriebsfestigkeitsbeurteilung innovativer Bauteil-, Modul- und Gesamtfahrzeugstrukturen mit Fokus Multimaterialmix und der daraus erforderlichen speziellen Verbindungstechniken bzw. Leichtbauwerkstoffe wie faserverstärkte Kunststoffe, stellt einen wesentlichen Baustein zur Massen- bzw. Gewichtsreduktion sowie in weiterer Folge zur daraus resultierenden Energieeffizienz von Automobilen dar, da die Entwicklung der Fahrzeuge hinsichtlich Steifigkeit, Festigkeit und Betriebsfestigkeit bis zu einem hohen Reifegrad durchgängig virtuell erfolgen kann. Weiter ist es mit dieser Vorgehensweise auf Basis Simulation möglich, zusätzliche Gewichtseinsparungspotenziale zu realisieren, die mit herkömmlichen Methoden wie z.B. der Durchführung von zahlreichen teuren Prüfstandversuchen nicht oder nur teilweise erreicht werden können. Durch die konsequente Entwicklung und Anwendung von strukturunabhängigen Verbindungstechniken sowohl für punktförmige Verbindungen (Stanznieten, Schraubverbindungen etc.) als auch für linien- und flächenförmige Verbindungen (Schweißnähte, Klebungen) kann die Zeit zur Erstellung der Finite Elemente Modelle deutlich reduziert werden, wodurch die virtuellen Schleifen schneller durchgeführt und zusätzliche Optimierungsmaßnahmen eingebracht werden können.

1.5 Verwendete Methoden

Die Abarbeitung der Inhalte für die einzelnen Arbeitspakete des Projektes erfolgt analog zum umgesetzten Förderprojekt ABIL, jeweils in Phasen, die stufenweise umgesetzt und in den Entwicklungsablauf integriert werden. Damit verbunden ist die Erstellung von entsprechenden Prototypen und Versionen, um die erforderliche Funktionalität bereitstellen zu können. Einer Entwicklungsphase für die Methoden und Konzepte folgt eine erste Umsetzungsphase, damit die entwickelten Verfahren prototypisch angewandt werden können. Danach folgt eine erste Validierung mit Versuchsergebnissen zumeist an Proben oder bauteilähnlichen Proben bzw. der Anpassung der Methode aufgrund der Validierung. Die Erkenntnisse aus dieser Phase fließen in die zweite Umsetzungsphase ein, der eine weitergehende Validierungsphase folgt. Nach Projektabschluss ist die Prozessimplementierung in den Entwicklungsprozess in einem künftigen Vorentwicklungsprojekt geplant.

1.6 Aufbau der Arbeit

Das Projekt wurde gemäß der beschriebenen Inhalte in die beiden Arbeitspakete

- AP1 Virtuelle Entwicklung Betriebsfestigkeit betreffend Verbindungstechniken aufgrund Multimaterialmix für den Leichtbau
- und
- AP2 Methoden und Werkzeuge für Festigkeit, Steifigkeit, Ermüdung, Lebensdauerabschätzung für die virtuelle Entwicklung Betriebsfestigkeit aufgrund der Anforderungen des Multimaterial Leichtbaus

gegliedert.

2 Inhaltliche Darstellung

2.1 Virtuelle Entwicklung Betriebsfestigkeit betreffend Verbindungstechniken aufgrund Multimaterialmix für den Leichtbau (AP1)

2.1.1 Lebensdauerabschätzung von Klebungen mit Substratkombinationen Aluminium-Aluminium und Stahl-Aluminium

2.1.1.1 Erweiterung der Methode zur Simulation von Klebungen auf Aluminium-Aluminium und Stahl-Aluminium Verbindungen - Modellierungsvorschrift und Verfahren zur Festigkeits- und Lebensdauerbeurteilung

Bei der Erweiterung der Methode zur Simulation von Klebungen von Stahl-Stahl Verbindungen auf Aluminium-Aluminium und Stahl-Aluminium Verbindungen konnte auf die umfangreichen Erfahrungen aus dem abgeschlossenen Projekt „ABIL“ (FFG Nr.: 825378) zurückgegriffen werden. Bei den in diesem Projekt durchgeführten abschließenden Validierungen an Proben und bauteilähnlichen Proben konnte im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung erzielt werden, allerdings zeigte es sich speziell an den bauteilähnlichen Proben, dass noch weitere Schritte zur Verbesserung der Simulationsqualität erforderlich sind. Dazu zählt eine Abstimmung der entwickelten Klebermodellierung für metallische Werkstoffe mit Hinblick auf den Einsatz in nichtlinearen Simulationen des Steifigkeits-, Festigkeits- und nachfolgend des Betriebsfestigkeitsverhaltens, die generell im Multimaterialverbund bzw. speziell zur Abbildung von Missbrauchslastfällen verstärkt eingesetzt werden. Aus diesem Grund wurden in einem ersten Schritt die erarbeiteten Modellierungen und Ankopplungen an die Grundstruktur insbesondere für nichtlineare Berechnungen, bei denen als FE-Solver die Software NASTRAN eingesetzt wird, an KS2-Proben (Kopfzug- Scherzugproben) und der bauteilähnlichen Probe T-Profil validiert und weiterentwickelt bzw. die Anwendbarkeit der Modellierungen und der entwickelten Beanspruchungskriterien an Gesamtfahrzeugmodellen untersucht. Hierbei musste im Hintergrund auch immer der Modellierungsaufwand und vor allem die benötigte Rechenzeit berücksichtigt werden, da ab einem bestimmten Aufwand die FEM-Simulationen nicht mehr zu bewältigen sind. Dabei wurden 3 Möglichkeiten der Ankopplung der Klebschicht an die Schalenstruktur analysiert, die Anbindung mittels RBE3-Elementen und der im durchgeführten Projekt „ABIL“ entwickelten speziellen Anbindungen mittels

MPC-Gleichungen (MPC = Multi Point Constraint) und eine Kopplung über TIE-Constraints (nicht lösbare Kontaktbedingungen), wie Sie im FEM-Solver NASTRAN zur Verfügung stehen. Der Vorteil der TIE-Constraints konnte darin ermittelt werden, dass auch größere Verformungen bei nicht-linearen Simulationen unterstützt werden und die Datenmenge zur Definition der Kopplung stark reduziert werden kann. Insgesamt sind sowohl die MPC-Anbindung (erstellt über die Betriebsfestigkeitssoftware) und die TIE-Constraints (erstellt mit dem Preprocessor) günstig mit Hinblick auf die Reduzierung der Einflüsse unterschiedlicher Vernetzungseinheiten. Bei der MPC-Anbindung werden zudem die Verdrehungen der SHELL-Elemente berücksichtigt, wodurch sich insgesamt bessere Ergebnisse in diesem Fall ergeben. Als weitere relevante Modellierungseinflüsse wurden darüber hinaus noch die Elementfeinheit der Hexaeder zur Abbildung der Klebschicht, die Anzahl der Elemente über die Klebschicht sowie die Berücksichtigung der Fertigungseinflüsse (Klebschichtwulst am Rand der Klebefläche, Abweichung der Klebschichtdicke vom Ideal) untersucht. Dabei zeigte es sich, dass eine Vernetzungseinheit von 3 mm x 3 mm bei den Klebehexaedern ausreichend ist und eine weitere Verfeinerung auf 1,5 mm x 1,5 mm keinen großen qualitativen Mehrwert bringt und den Nachteil von stark gestiegenen Modellgrößen mit sich führt. Die Anzahl der Hexaeder über die Klebschichtdicke hat einen deutlichen Einfluss auf die erzielten Ergebnisse, als akzeptabler Kompromiss zwischen Aussagequalität und Modellgröße konnte hier ein Wert von 2 identifiziert werden. Diese Modellierung ist im Gegensatz zur Modellierung mit 1 Element bereits in der Lage, die Querkontraktion in der Klebschicht darzustellen. Die weiterführenden Untersuchungen an Proben wurden ohne Berücksichtigung eines Klebschichtwulsts durchgeführt. Dies entspricht auch der Fertigung der Versuchskörper. Bei den bauteilähnlichen Proben (T-Profil mit Lastrichtung vertikal und horizontal) treten Klebschichtwulste jedoch auf und müssen zur Erklärung von lokalen Effekten berücksichtigt werden. Generell wird aber eine (konservative) Lösung angestrebt, d.h. die Bauteilverbindungen müssen auch ohne begünstigende Klebewulste die entsprechende Festigkeit erreichen. In der Projektanwendung ist es von den Aufwänden (sowohl zeitlich als auch rechentechnisch) und von den vorliegenden Fügeinformationen nicht möglich, diese Fertigungsparameter gezielt abzubilden.

Mit den identifizierten Modellierungen können bereits Steifigkeitsbewertungen für Stahl-Stahl und Aluminium-Stahl bzw. Aluminium-Aluminium Strukturen durchgeführt werden. In Hinblick auf Festigkeits- und Betriebsfestigkeitsbewertung wurden die im vorangegangenen Projekt „ABIL“ entwickelten Beanspruchungskriterien (von Mises Vergleichsspannung, Schlimmer Vergleichsspannung und modifizierte Schlimmer Vergleichsspannung) um die Beanspruchungskriterien modifizierte Normalspannungskomponente und „von Mises Stress on Plane“ erweitert. Dabei wurde analog zur Vorgehensweise im Grundwerkstoff ein kritisches Schnittebenenverfahren im Raum eingesetzt, bei dem die Versagenskriterien in definierten Schnittebenen im Raum ausgewertet werden. Dies bietet gegenüber den bisher vorliegenden Beanspruchungskriterien den Vorteil, dass sich dadurch für die verschiedenen Belastungszustände des Klebers implizit die richtigen Vorzeichen für die bewertete Spannung (Unterscheidung Zug-Druck) ergeben und die Superposition der Beiträge zu den Beanspruchungsparametern in den Schnittebenen aufgrund der variierenden äußeren Belastungen problemlos durchgeführt werden kann. Dies ist insbesondere von Bedeutung bei vielen auftretenden variierenden äußeren Belastungen (Beanspruchungskollektive) an komplexen Bauteilen oder Gesamtfahrzeugen, weil dadurch die Zeit zur Bestimmung der Beanspruchungsparameter-Zeitverläufe für die nachfolgende Bewertung stark reduziert werden kann. Als weiterer Punkt wurde auch die Art der

Bestimmung des Spannungsgradienten, wie er für die Berücksichtigung des Mikrostützwirkungseffektes in der Klebschicht benötigt wird, verbessert indem zur Bestimmung nun der Differenztensor über die Klebehexaeder herangezogen wird.

2.1.1.2 Umsetzung der Methode zur Festigkeits- und Lebensdauersimulation von Klebungen zwischen Bauteilen aus Aluminium und Aluminium sowie Stahl und Aluminium Verbindungen als Prototyp in der Betriebsfestigkeitssoftware

Im Wesentlichen kann die Methode der Berechnung analog zu den Stahl-Stahl-Verklebungen angewendet werden. Die Ankopplung der Solid-Kleberhexaeder (Elementtyp: HEXA) über RBE3 („Rigid Body“ Element, Typ3 - „Interpolation Element“) an die Schalenelemente kann prinzipiell unverändert übernommen werden. Die Einbindung über Multi-Point-Constraint- (=MPC) Elemente bietet bei linearen FEM-Berechnungen Vorteile, da die Koppelung unter Berücksichtigung auch der rotatorischen Freiheitsgrade der Schalenelemente insgesamt eine bessere Kompatibilität zwischen den unterschiedlichen Elementtypen bietet. Lediglich bei großen Verdrehungen („Large displacements“) ist es vorteilhaft mit RBE3 zu koppeln, da dann die Koppelgleichungen im FEM-Solver intern aktualisiert werden und keine künstlichen Zwangskräfte zufolge von Starrkörperbewegungen entstehen. Als Basis für die Schädigungsrechnung (kleine Bewegungen) ist daher das HEXA-MPC-Modell zu bevorzugen, für Hochlasten (große Bewegungen) bietet die HEXA-RBE3-Modellierung eine höhere Ergebnisqualität. Für ABAQUS wird schließlich die Koppelung der Elemente für Hochlasten über sogenannte TIE Elemente, ebenfalls auf Basis von gekoppelten Freiheitsgraden bewerkstelligt. Die Methode zur Berechnung der Schädigung ist auch bereits in der Software umgesetzt.

2.1.1.3 Ableitung geeigneter Werkstoffparameter für die Kleberarten

Für die Ableitung der Werkstoffkenngrößen erwies es sich als sehr zielführend die reale nominelle Klebeschichtdicke in der Modellierung zu berücksichtigen. Während für die Berechnung von Steifigkeiten verklebter Strukturen eine Korrektur über den Schubmodul bzw. E-Modul des Klebstoffes akzeptable Ergebnisse liefern kann, ist zur Beurteilung der Festigkeit (lokale Spannungen, lokale Dehnungen) die korrekte Klebeschichtdicke abzubilden. Auch an dieser Stelle der Werkstoffableitung spielt die gewählte Modellierung eine wichtige Rolle, also wurde hier der Ansatz mit 2 Elementen über die Schichtdicke gewählt um auch die entsprechenden Spannungsgradienten abbilden zu können. Die Elementgröße in der Ausdehnungsrichtung der Flanschebenen ist hinsichtlich Berechnungsressourcen mit 3mm noch am unteren Limit, die Modellierung mit 4mm wird dazu noch alternativ verfolgt. Für zwei unterschiedliche Epoxid-Klebstoffe wurden Berechnungen auf Probenebene durchgeführt und die erforderlichen Werkstoffkennwerte auf der Basis von Versuchswöhlerlinien ermittelt bzw. kalibriert.

2.1.1.4 Validierung der Methode zur Festigkeits- und Lebensdauersimulation von Klebungen für Aluminium-Aluminium und Stahl-Aluminium Verbindungen an Proben und Bauteilen

Anhand von verklebten Probekörpern aus Al-Werkstoffen konnte die Gültigkeit der Modellierung der Klebschichten analog zu verklebten Stahlbauteilen bestätigt werden. Auch der Ablauf für die Festigkeits- und Schädigungsrechnung wurde vom generellen Ablauf her nicht verändert. Dennoch sind erwartungsgemäß für die zu bewertenden Klebstoffe die Werkstoffeigenschaften jeweils neu zu bestimmen, dies geschieht üblicherweise durch Proben mit Scher- und Schälzugbeanspruchung.

2.1.1.5 Methode zur Berücksichtigung von variablen Amplituden (für die Schädigungsrechnung von Klebverbindungen)

Nach der Umsetzung der Schädigungsrechnung für konstante Amplituden ist nun auch die Methodik zur Beurteilung unterschiedlicher Amplitudenhöhen definiert worden. So ist es üblich, für steife Strukturklebverbindungen mit geringer Kriechneigung die Schwingspiele nach der Methodik der Rainflow-Klassierung aus dem Last-Zeit-Verlauf zu ermitteln. Anschließend kommt der gleiche Berechnungsablauf, wie für konstante Amplituden umgesetzt, zur Anwendung.

2.1.1.6 Mit Erkenntnissen aus der Validierung überarbeitete und in Betriebsfestigkeitssoftware als Prototyp implementierte Methode

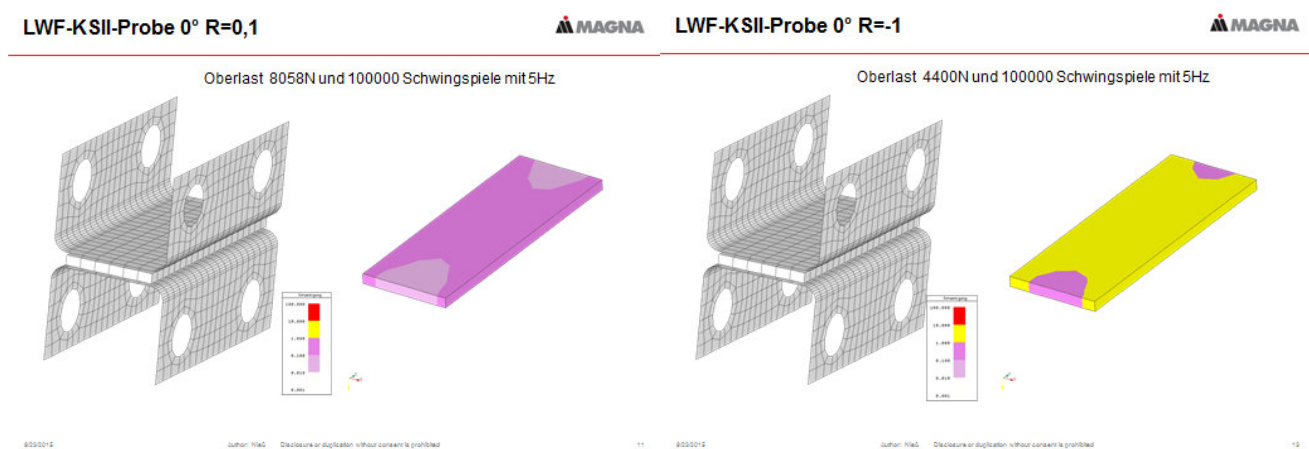


Abbildung 1: Schädigungsverteilung von Strukturklebstoffen an der KS2-Probe für schwellende (R=0,1) und wechselnde Belastung (R=-1)

Die Umsetzung der Schädigungsrechnung für variable Amplituden erfolgte vollinhaltlich im Software Code. Somit sind die Beanspruchungskriterien Von Mises Vergleichsspannung, Schlimmer Vergleichsspannung, modifizierte Schlimmer Vergleichsspannung, modifizierte Normalspannungskomponente sowie „von Mises Stress on Plane“ verfügbar. Die Berechnung erfolgt wieder nach dem kritischen Schnittebenenverfahren. Die variablen Amplituden werden entsprechend der abgeleiteten Werkstoffwöhlerlinien aus der Validierung berücksichtigt.

2.1.1.7 Weiterführende Validierung der Festigkeits- und Lebensdauersimulation von Klebungen für Aluminium-Aluminium und Stahl-Aluminium Verbindungen an Proben und Bauteilen

Die Methodik zur Validierung erfolgte an den Festigkeitsklebern ARALDITE® AV 119 (Epoxid-Kleber) E= 3050MPa, sowie AF 126-2 (Epoxid-Kleber, Klebeband) E= 2030MPa. Beide Kleber wurden jeweils an 2 Proben, welche eine stark unterschiedliche Beanspruchung repräsentieren (Scherbeanspruchung bzw. Kombination Scherung - Schälung) getestet. Die Probenbauteile sind aus der Al-Legierung 5251, siehe [Bro1999].

Es zeigt sich, dass auch für Aluminium die bekannten Routinen zur Schädigungsrechnung anwendbar sind. Wichtig sind dabei aber definierte Klebschichtdicken. Unabhängig von den Substratwerkstoffen Aluminium oder Stahl zeigte sich bei üblichen Modellierungen an Karosserien aber auch, dass die Spannungen bei Modellierungen mit üblichen Elementfeinheiten und Bauteilabständen stark streuen und in weiterer Folge auch die Lebensdauer von Klebschichten (verstärkt durch die sehr flachen

Wöhlerlinien) örtlich sehr stark abfällt. Als praktikabler Ansatz hat sich in der Projektarbeit für Epoxid-Strukturkleber die Auswertung in Form einer Sicherheit gegen Kleberversagen erwiesen.

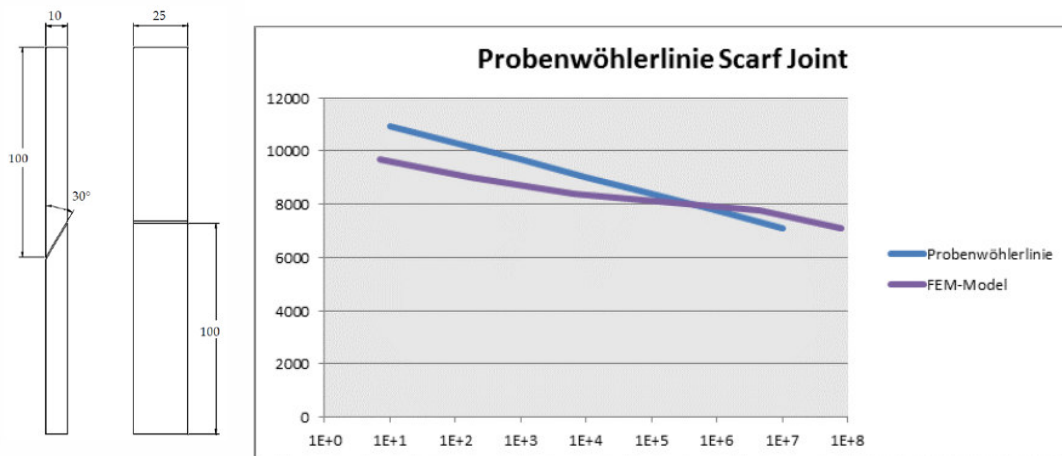


Abbildung 2: Probengeometrie „Scarf Joint“ und Wöhlerlinie aus Versuch bzw. Simulation

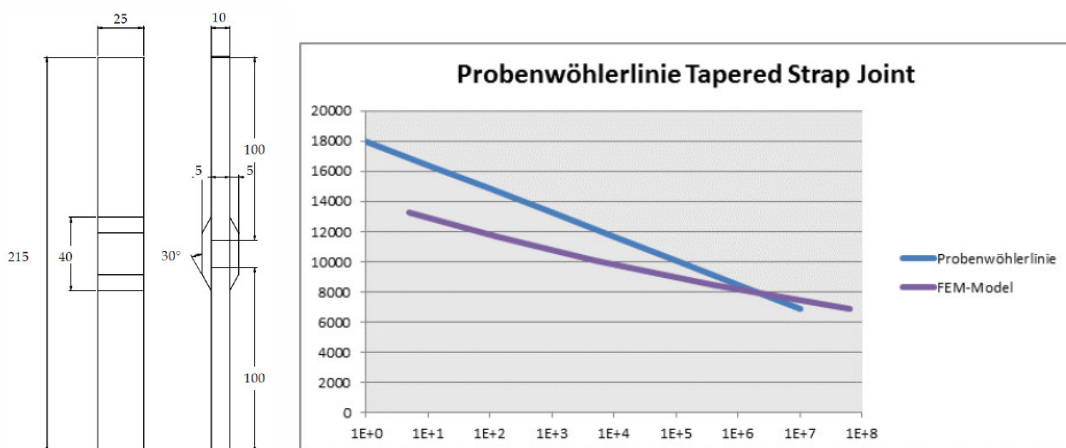


Abbildung 3: Probengeometrie „Tapered Strap Joint“ und Wöhlerlinie aus Versuch bzw. Simulation

2.1.2 Lebensdauerabschätzung für Verklebungen von Composites

2.1.2.1 Erstes Konzept für die Simulation der Klebeverbindung bei Composite Werkstoffen mit UD-Schichten

Bei der Klebung von Compositewerkstoffen auf unidirektionalen Lagen (UD-Schichten) wurde zunächst ein erstes Konzept zur Beurteilung erstellt. Dabei mussten neben den Erfahrungen aus der Methodenentwicklung für die Klebeverbindung metallischer Bauteile die spezifischen Eigenschaften der verwendeten Klebertypen (PU-Kleber) bzw. die auftretenden größeren Klebspalte (1mm-2mm) berücksichtigt werden. Das Konzept sieht vorerst eine quasistatische Berechnung mit dem FEM-Solver NASTRAN vor, die das nichtlineare Materialverhalten und eine geometrisch nichtlineare Beschreibung aufgrund der großen, vom Klebewerkstoff ertragbaren Deformationen berücksichtigen kann. Unter zyklischer Belastung tritt hier ein Erweichen des Klebewerkstoffes auf („Mullins Effekt“). Entsprechend der vorangegangenen maximalen Beanspruchung verringert sich die Steifigkeit bei nachfolgenden niedrigeren Beanspruchungen. Daher sollen neben den Spannungen auch die Dehnungen in den Berechnungsprozess eingehen. Aus diesem Grund wurde in einem ersten Schritt die Schnittstelle zum FE-Solver NASTRAN dahingehend erweitert, dass neben den Spannungstensoren auch die

entsprechenden Dehnungstensoren aus den NASTRAN Ergebnisfiles übernommen werden können. Die FE-Modellbildung basiert auf der Klebermodellierung bei metallischen Werkstoffen, wobei die netzunabhängige Anbindung an die Composite-Struktur aufgrund der großen, auftretenden Deformationen mit NASTRAN TIE-Constraints vorgesehen ist.

2.1.2.2 Methode zur Simulation der Klebeverbindung inkl. Modellierungsvorschrift bei Composite Werkstoffen mit UD-Schichten

An Probeteilen und auch an konkret auskonstruierten Composite-Komponenten einer Karosseriestruktur wurden Modellierungen erprobt. Im Vordergrund steht an dieser Stelle neben der Ergebnisqualität hinsichtlich Steifigkeit, Festigkeit und Lebensdauer zunächst auch die Möglichkeit der effizienten Erstellung der Klebeverbindungen in den FEM-Modellen.

2.1.2.3 Umsetzung der Methoden zur Berücksichtigung von variablen Amplituden und zur Festigkeits- und Lebensdauersimulation von Klebungen bei Composite Werkstoffen mit UD-Schichten als Prototyp in der Betriebsfestigkeitssoftware

Im Gegensatz zu Klebungen auf Epoxid-Harz-Basis werden für die Composite deutlich weichere Klebstoffe verwendet. Die Umsetzung der Methode erfolgte entsprechend folgendem Ablauf. Als essenzielle Erweiterungen musste dem nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Verhalten auch bei niedrigen Beanspruchungen Rechnung getragen werden, sowie die Veränderung (Entfestigung) der Materialeigenschaften nachdem bestimmte Maximalbeanspruchungen überschritten wurden (Mullins Effekt).

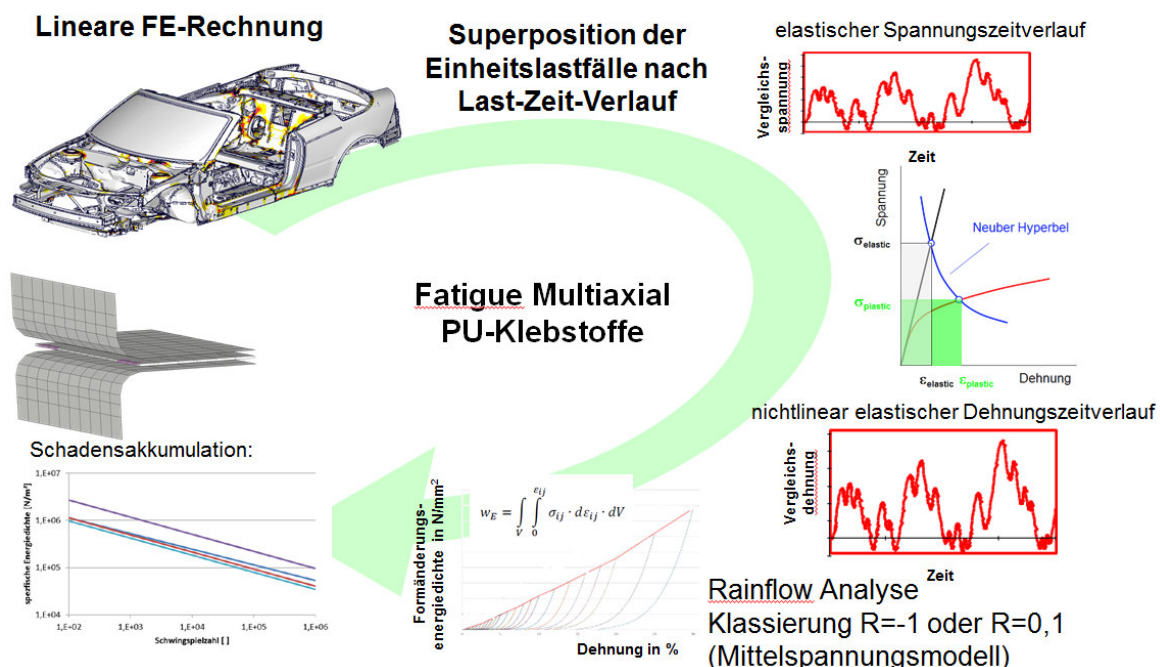


Abbildung 4: Ablauf der Schädigungsrechnung für Klebstoffe aus PUR

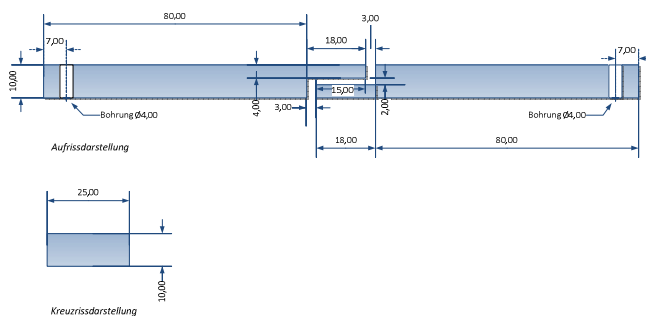
2.1.2.4 Methode für eine erste Festigkeitsbeurteilung für die PUR-Klebung - Konzept zur Lebensdauerbeurteilung

Das Konzept zur Lebensdaueranalyse liegt als Ablauf vor und wurde auch im Rahmen eines „Postprocessing“ an ABAQUS-FEM-Berechnungen nachgeschaltet. Mit dem abgeleiteten Modell

konnten entsprechende Gesetzmäßigkeiten über die Lebensdauer von schwingend beanspruchten mit PUR-Klebung gefügten Probekörpern gefunden werden. Das Berechnungsmodell beurteilt die Klebverbindung hinsichtlich des Mullins Effektes auf der Basis von Spannungen. Die Beurteilung unterschiedlicher Beanspruchungszustände (Schäl- bzw. Scherbeanspruchung) ist Bestandteil des Berechnungsmodells.

2.1.2.5 Validierung der Methoden zur Simulation der Klebung bei Composite Werkstoffen mit UD-Schichten und für variable Amplituden

Dicke Zugscherprobe



Kopfzugprobe

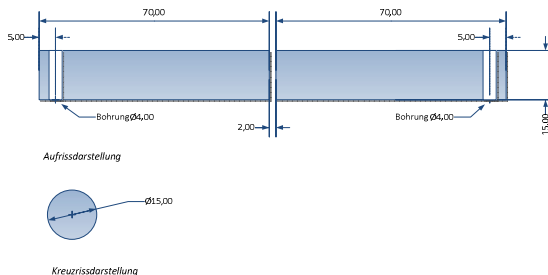


Abbildung 5: Dicke Zugscherprobe bzw. Kopfzugprobe zur Ermittlung von Wöhlerlinien aus PUR

Zunächst wurde aus Versuchen mit der dicken Zugscherprobe bzw. mit der Kopfzugprobe die erforderlichen Werkstoffparameter von 2 PUR-Klebstoffen BF2850M und BF9050S jeweils für 2 Spannungsverhältnisse ($R=0,1$ bzw. $R=-1$) gewonnen (Abbildung 5).

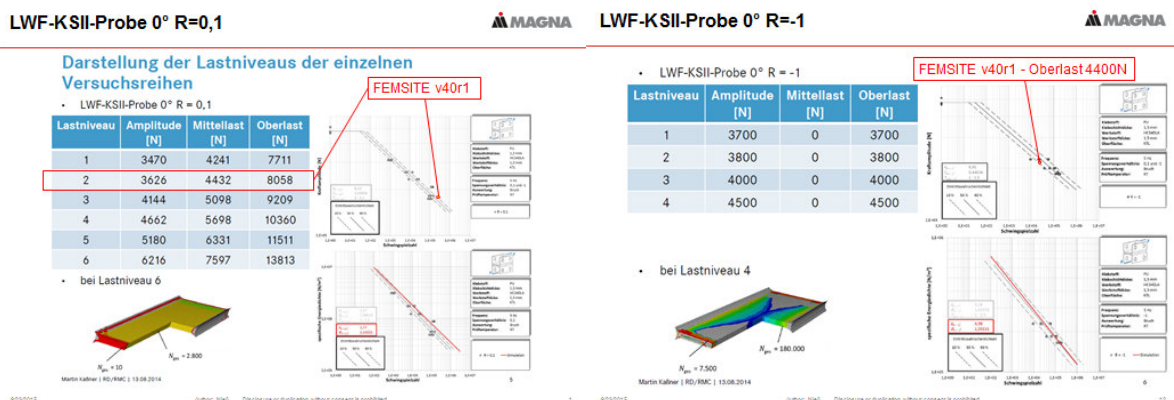


Abbildung 6: Wöhlerlinien für PUR-Klebstoffe aus KS2-Proben für $R=0,1$ bzw. $R=-1$

Anhand der angeführten KS2-Proben wurde wiederum für die beiden PUR-Klebstoffe BF2850M und BF9050S eine Validierung der Lebensdauerabschätzung durchgeführt. Durch die Kalibrierung des Modells anhand der dicken Zugscherprobe bzw. der Kopfzugprobe gibt es in der Validierung eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation (sowohl hinsichtlich Wöhlerlinienneigung als auch der absoluten Lebensdauerwerte).

Erste Anwendungen mit denselben Klebstoffen an Karosseriemodulen (verklebtes Dach) zeigte nur sehr geringe Schädigungen, was nicht zuletzt an den großen Klebschichtdicken lag, primäres Kriterium war wieder eher der Steifigkeitsverlust durch den Einsatz des sehr weichen PUR-Klebers.

2.1.3 Bewertung punktförmiger Fügetechnik von Bauteilen aus Composites

2.1.3.1 Geeignete Steifigkeitsabbildung (Ersatzmodell) für die punktförmigen Verbindungstypen bei der Verbindung von Compositewerkstoffen untereinander bzw. mit metallischen Werkstoffen auf Basis netzunabhängiger Modellierung

Als Verbindungsform für Composite-Bauteile kommen sehr oft Klebungen zum Einsatz. Um den Taktzeiten der Automobilindustrie zu genügen, ist zumeist eine zusätzliche mechanische Fixierung der Bauteile erforderlich. Dies wird bei Stahl zumeist durch punktförmige Verbindungen wie Schweißpunkte erreicht. Bei Aluminium und Composite-Werkstoffen sind Schrauben und Stanznietverbindungen üblich. Für diesen Verbindungstyp wurde in der Vergangenheit das Schweißpunktmodell auf Stanznieten metallischer Bauteile erweitert und in diesem Arbeitspaket durch Verbindungen für Composite mit Lagenaufbau erweitert.

Zur Entwicklung einer geeigneten Steifigkeitsabbildung (Ersatzmodell) für die punktförmigen Verbindungstypen bei der Verbindung von Compositewerkstoffen untereinander bzw. mit metallischen Werkstoffen wurden zunächst die relevanten Verbindungstypen im Multimaterialverbund identifiziert und ein entsprechendes Konzept erstellt. Dabei findet eine Unterscheidung nach der Materialkombination statt. Für FVK – FVK Verbindungen, FVK – Metallverbindungen bzw. Verbindungen von Sandwich-Materialien sind Schrauben mit entsprechenden Inserts relevant.

2.1.3.2 Umsetzung der automatischen Generierung der netzunabhängigen Ersatzmodelle für die punktförmigen Verbindungstypen bei der Verbindung von Compositewerkstoffen untereinander bzw. mit metallischen Werkstoffen in der Betriebsfestigkeitssoftware

Aufgrund des komplexen Aufbaus der Schraubverbindung an diesen Stellen (Schraube, Mutter, Insert, Verklebung, CFK-Laminat) wird hier standardmäßig eine netzabhängige Modellierung der Verschraubung mittels RBE2-Sternen und Beam-Elementen analog zur Vorgehensweise bei Karosserieschrauben angewendet werden, insbesondere wenn die Spannungen direkt an der Schalenstruktur ausgewertet werden sollen.

Die an der mechanischen Verbindung auftretenden Kräfte können aus dem Gesamtfahrzeugmodell für einzelne Lastfälle bzw. gesamte Belastungskollektive auf eine detaillierte Abbildung des Schraubverbundes übertragen werden, und die in den jeweiligen Komponenten auftretenden Spannungskomponente-Zeitverläufe mit den entwickelten Methoden zur Simulation der Klebung bzw. der Composite Werkstoffe auf Basis von UD-Schichten hinsichtlich Festigkeit bewertet werden.

Unter Einbeziehung der Erfahrungen aus dem durchgeführten Projekt ABIL konnten für diese Verbindungstypen eine netzunabhängige Modellierung analog zur Schweißpunktmodellierung (Hexaeder

mit 4 Balkenelementen) als Steifigkeitsmodell herangezogen werden, das an die zugrundeliegende Schalenstruktur mittels MPC-Gleichungen netzunabhängig angekoppelt wird.

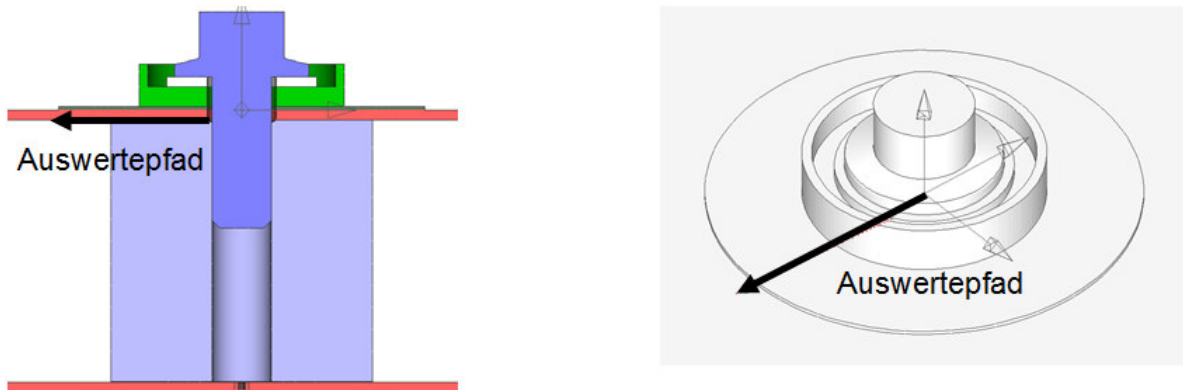


Abbildung 7: FEM-Modell eines Inserts an einem Bauteil aus 2 CFK-Deckschichten und Schaumkern

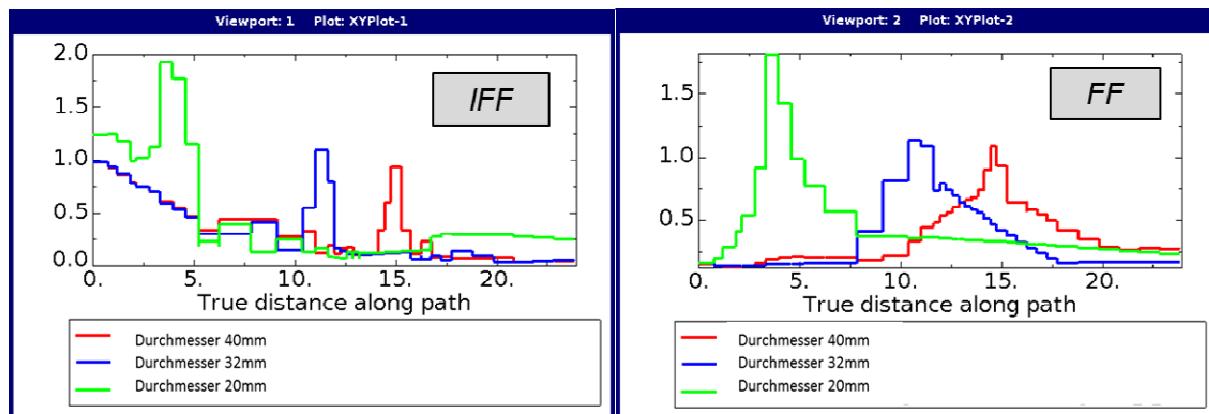


Abbildung 8: Verlauf der Composite-Anstrengung nach PUCK für Zwischenfaserbruch (IFF) und Faserbruch (FF) in radialer Richtung (Lastfall: Vorspannung kombiniert mit axialem Zug)

Zum Abschluss der Untersuchungen zur Tragfähigkeit einer Insert-Verbindung steht schließlich eine detaillierte FEM-Berechnung am Solidmodell. Hier wurde als Versagenskriterium die Einbindung des Inserts in die Composite-Struktur als maßgeblich erkannt. So zeigt sich schließlich der sehr wichtige Einfluss der Auflagefläche auf die Beanspruchung und schließlich das Versagen der angebundenen Composite-Bauteile. Um eine weitere Bewertung in großen Strukturen nur auf Basis von ermittelten Kräften in Verbindung mit Parametermodellen bewerten zu können, ist somit in den zu erstellenden Parametermodellen eine genaue Erfassung der Auflagefläche aber auch Geometrie der Inserts im Inneren erforderlich.

Hinsichtlich automatischer Generierung der Modelle ist die hier (Abbildung 7) dargestellte Grundstruktur des Inserts in weiterer Folge parameteroptimiert worden, sodass prinzipiell die Möglichkeit einer automatisierten Anpassung der Insert-Verbindung möglich ist. Dennoch sollten hier hinsichtlich der Fertigungseinschränkung bzw. Verfügbarkeit von Standard-Inserts zunächst die Modelle vereinheitlicht werden.

2.1.4 Ablauf zur Bewertung kritischer Schrauben in Fahrzeugstrukturen

2.1.4.1 Methode zur Erkennung kritischer Schrauben im Gesamtverbund

Als weiterer Punkt wurde eine Methode zur Erkennung kritischer Schrauben im Gesamtverbund unter Betriebsbeanspruchungen entwickelt.

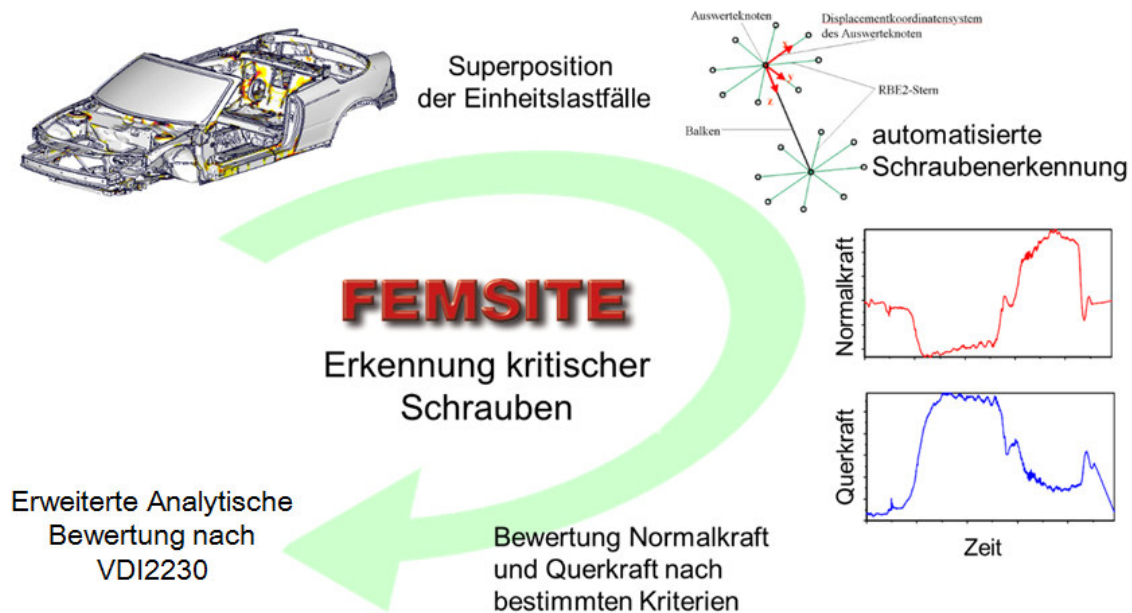


Abbildung 9: Methode zur Erkennung kritischer Schrauben

Dazu werden für ein Beanspruchungskollektiv die Kräfte an der Schraubverbindung aus dem FE-Modell ermittelt und gemäß den äußeren Belastungen superponiert. Die auszuwertenden Schrauben werden dabei automatisiert im Gesamtfahrzeugmodell anhand der festgelegten Schraubenmodellierung (RBE2-Stern mit Balken) erkannt, wodurch der Spezifikationsaufwand für den Anwender minimiert wird und die Gesamtheit aller verwendeten Schrauben erfasst werden kann. In dem entwickelten Verfahren werden die Peaks in den sich ergebenden Schraubenkraft-Zeitverläufen getrennt nach Normalkraft und Querkraft ermittelt und nach bestimmten Kriterien den zulässigen Werten gegenübergestellt, woraus ein Sicherheitswert abgeleitet werden kann. Potenziell kritische Schrauben können so anhand einer Sicherheit unterhalb eines kritischen Wertes erkannt werden, wobei die korrespondierende Belastungssituation im Schraubenkraft-Zeitverlauf als Input für eine nachfolgende detaillierte konventionelle Schraubenberechnung im eigens entwickelten Tool auf Excel-Basis aufbereitet wird.

2.1.4.2 Implementierung der Methode zur Erkennung kritischer Schrauben im Gesamtverbund in der Betriebsfestigkeitssoftware

Entsprechend der Kräfte an den spezifizierten Schraubenelementen erfolgte die Transformation der im allgemeinen global vorliegenden Kraftkomponenten in die lokalen Komponenten der Schraube und wurde schließlich zur Axialkraft in Richtung der Schraubenachse und resultierende Querkraftkomponente zerlegt. Der gesamte zeitliche Verlauf aus Axialkraft und Querkraft wird von der Software der Bewertung nach VDI2230 zugeführt und somit ohne Vorselektion die kritischste Beanspruchungssituation bewertet.

2.1.4.3 Erste Validierung der Methode zur Erkennung kritischer Schrauben im Gesamtverbund

Bekannte Problemstellen aus bereits durchgeführten Hardware-Versuchen konnten als Hot Spots ausgemacht werden. In der jetzigen Umsetzung ist die Analyse über aus Axial- und Querkräfte in der Regel ausreichend um Festigkeitsprobleme zu identifizieren.

2.1.4.4 Methode zur Simulation von Schrauben unter Berücksichtigung der Vorspannungen und Krafteinleitungen

Für die angeführte Methode können Schrauben anhand der angreifenden Betriebskraft beurteilt werden. Entsprechend dem Verschraubungsdiagramm ist es damit aber noch nicht möglich, die tatsächliche Schraubenlängsbeanspruchung bzw. die Restklemmkraft der Verbindung zu beurteilen. Ein etwaiges Versagen durch Rutschen des Schraubverbandes (und in weiterer Folge ein Lockern des Schraubverbandes) zufolge der äußeren Querkraftbeanspruchung ist ebenfalls eng mit der vorliegenden Klemmkraft verbunden. Mit den an dieser Stelle zur Anwendung kommenden Schraubverbindung als Solid und Modellierung der Kontaktflächen, kann auch das Rutschen mit diesem somit nichtlinearen Modell beurteilt werden.

2.1.4.5 Validierung der Methode zur Simulation von Schrauben unter Berücksichtigung der Vorspannungen und Krafteinleitungen

Die Methodik zur Bewertung der Schraubverbindungen mit den ermittelten Kräften aus Balkenmodellen von FEM-Modellen konnte automatisiert werden. Entsprechende Werkzeuge zur Gruppierung von Elementen machen nicht nur die Bewertung der jeweiligen Schraubstelle hinsichtlich Axial- und Querkraft einzelner Lastfälle möglich. Aus einer Last-Zeit-Reihe können jetzt die ungünstigsten Kombinationen aus Axial- und Querkraft extrahiert und gleich unmittelbar nach VDI2230 bewertet werden. Die Berechnung der Schraubstellen hinsichtlich Abscheren wurde ebenfalls verfeinert, sodass auch dafür jetzt entsprechende Sicherheiten ausgerechnet werden können. Hinsichtlich Abscheren von Gewinden wurde auch noch die Berücksichtigung der Streuung der Gewindeüberdeckung in radialer Richtung Rechnung getragen, mit der Standardberechnung nach VDI2230 ist man hier nicht immer auf der sicheren Seite gewesen. Die Schraubstellen(-modelle) können auch um die Vorspannkraft erweitert werden, sodass entsprechende allfällige Rutschphänomene besser simuliert werden können. Ein Schraubenversagen durch Axialkräfte einer Innendruckbelastung konnte mit der erweiterten Modellierung inklusive Modellierung der Gewindegänge und den auftretenden sehr hohen Mittelspannungen bei geringen Amplituden jetzt nachgestellt werden. Damit ist auch die effektive Optimierung von Gewindeausläufen an Schraubverbindungen möglich geworden.

2.1.5 Bewertung von Schweißnähten an Hybridstrukturen (Gussteile, Strangpressprofile, Bleche)

2.1.5.1 Methode zur Modellierung von Schweißnähten an Solidbauteilen bzw. Hybridstrukturen

Die Modellierung von Schweißnähten an Solidbauteilen bzw. Hybridstrukturen ist für eine effiziente Modellerstellung im Falle von Spaceframe-Strukturen, bei der viele Gussknoten an die Blechstrukturen mittels einer großen Zahl von Schweißnähten an die Blechstrukturen angebunden werden, essentiell. Die bisher angewandte Vorgehensweise zur Solid-Strukturkopplung, bei der die Solid-Struktur der Gussknoten durch weitgehend manuelle Vernetzung aufwändig als Schalenstruktur mit Bereichen unterschiedlicher Blechdicke abgebildet und netzabhängig an die Schalenstruktur der Blechteile

angekoppelt wurde, ist in diesen Fällen nicht mehr gangbar. Dies gilt besonders für den Fall von komplexen Gussknoten, bei dem durch die Schalenmodellierung zwar die Steifigkeit, nachfolgend aber nicht Festigkeit und Betriebsfestigkeit in ausreichendem Maße beurteilt werden können. In der entwickelten Methode wird bei der Modellierung im Preprocessor die Oberfläche der Gussknoten im Bereich der Schweißnaht zusätzlich als Schalenstruktur extrahiert (Deckschalen). In den durchgeführten Untersuchungen hat es sich gezeigt, dass es sinnvoll ist, den Deckschalen die Dicke der jeweiligen Schweißnaht zuzuweisen. Nachfolgend werden in der Software mit den im Projekt „ABIL“ entwickelten Methoden die Schweißnähte mit Verbindungsschalen realisiert, die netzunabhängig mittels spezieller-MPC Gleichungen an die Deckschalen bzw. die Blechstrukturen angekoppelt werden (Abbildung 10).

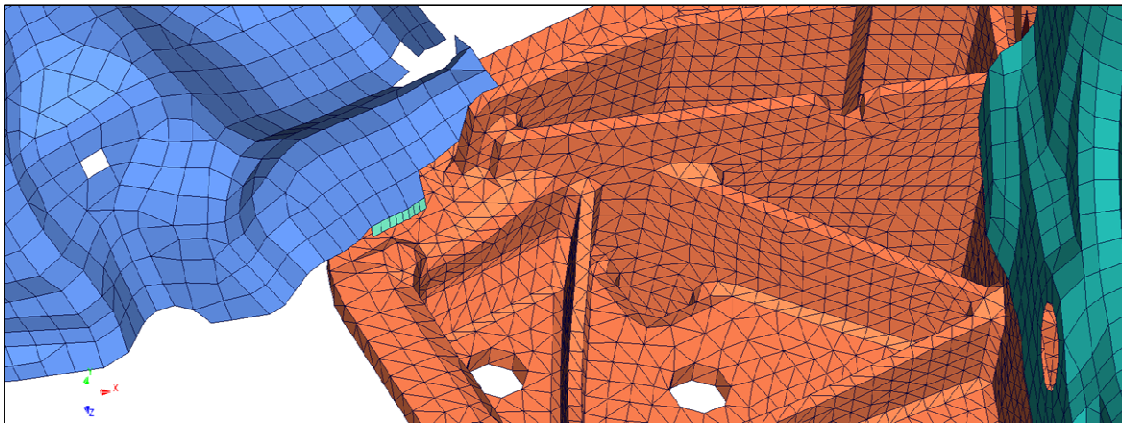


Abbildung 10: Netzunabhängige Realisierung der Schweißnähte zwischen Gussknoten und Schalenstrukturen

Auf diese Weise kann auch eine große Anzahl von Schweißnähten in kurzer Zeit eingebaut werden. Die Realisierung der Verbindungselemente erfolgt dabei adaptiv und passt sich der Feinheit der Grundnetze an. Zugrundeliegende Netze werden nicht verändert und behalten damit die ursprüngliche Qualität. Die ersten Ergebnisse bei der Steifigkeitssimulation zeigen eine gute Anwendbarkeit der Methode.

2.1.5.2 Implementierung der Methode zur Modellierung von Schweißnähten an Solidbauteilen bzw. Hybridstrukturen in der Betriebsfestigkeitssoftware.

Die Umsetzung der Methode zur netzunabhängigen Schweißnahtmodellierung konnte bereits an einer realen Karosserie in Spaceframe-Bauweise erprobt werden. Dabei wurden die Deckschalen generiert und auch die entsprechenden Auswerteelemente zur Schweißnaht generiert.

2.1.5.3 Berücksichtigung des FE-Solvers NASTRAN bei der Schweißnaht Generierung, Test der Prozessimplementation für die erarbeiteten Methoden und Prototypen

Die automatisierte Schweißnaht-Generierung in der Software zwischen definierten Fügepartnern ist jetzt sowohl im NASTRAN- als auch im ABAQUS-Format möglich. Die Koppelung der Schalenelemente der Schweißnähte an die zu verbindenden Bauteile erfolgt statt mit RBE-Elementen in NASTRAN über TIE Constraints.

2.1.5.4 Methode zur Lebensdauersimulation von Schweißnähten an Hybridstrukturen

Der Ablauf der Schädigungsrechnung ist bereits umgesetzt. Die Anwendung konnte bereits an einer Karosserie in Spaceframe-Bauweise angewendet werden. Mit der programmtechnischen Umsetzung ist es möglich, sehr rasch eine Hot Spot Analyse für Schweißnähte zu generieren. Zwei Nachteile an der bestehenden Methodik sind aber auch zu vermerken. Zum einen schwanken die Spannungen

insbesondere an Schweißnahtenden durch die ungleiche Abgrenzung von Elementen der Wärmeeinflusszonen bei der netzunabhängigen Modellierung. Zum anderen ist die Kopplung über die Deckschalen ein ständiger Kompromiss zwischen zu weicher Ankopplung und Versteifung der verschweißten Bauteile. Aus jetziger Sicht kann die netzunabhängige Modellierung sehr gut für eine Hot Spot Analyse verwendet werden, für detaillierte Aussagen bzw. Optimierungen von lokalen Verbesserungen wird derzeit die netzabhängige Modellierung durch leistungsfähige Präprozessoren vorangetrieben.

2.1.5.5 Umsetzung der Methode zur Lebensdauersimulation von Schweißnähten an Hybridstrukturen in der Betriebsfestigkeitssoftware

Entscheidend bei der Lebensdauerabschätzung von Schweißnähten an Hybridstrukturen sind die Spannungen, welche aus der lokalen Beanspruchung und somit auch sehr wesentlich von der lokalen Geometrie der Verbindung bestimmt werden. Gelingt eine hinreichend gute Abbildung dieser lokalen Geometrie, funktioniert die Methodik der Schädigungsrechnung sehr gut. Wesentlichen Einfluss hat neben der Feinheit der Modellierung auch die Beurteilung des resultierenden Spannungsgradienten. In der Darstellung zeigt die Verbindung eines Gussknoten (Solidmodellierung) mit einem Strangpressprofil (Schalenmodellierung) links mit der Modellierung der Schweißnaht mit Deckschalen am Solid und rechts die entsprechenden Schädigungswerte nach Anwendung des Last-Zeit-Verlaufes aus MKS-Rechnung.

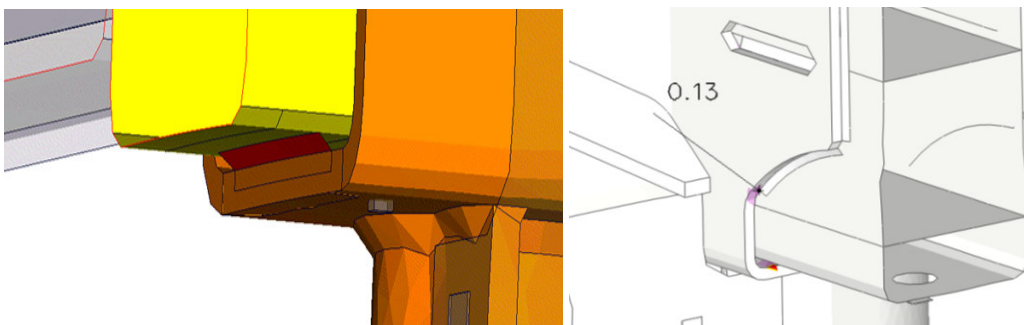


Abbildung 11: Realisierung der Schweißnähte zwischen Gussknoten und Schalenstrukturen bzw. Schädigungsergebnisse

Damit ist auch die Verbindung von Solid- mit Schalenstrukturen zuverlässig möglich und auch die Methodik für die Schädigungsrechnung liegt im Software-Code vollständig vor.

2.1.5.6 Erste Validierung der Lebensdauersimulation für die Schweißnähte an Solid- und Hybridstrukturen

Die Anwendung erfolgte bereits an gesamten Karosserien in Spaceframe-Bauweise. Die Analyse der Hot Spots ergab plausible Ergebnisse, welche in der Projektanwendung in einer frühen Phase konkrete Hinweise ergab, an welchen Stellen die Bauteilfestigkeit bzw. die Verbindung verbessert werden musste.

2.1.6 Beurteilung der Fügetechnik hinsichtlich Kurzzeitfestigkeit

2.1.6.1 Entwicklung der Methode zur Berücksichtigung von Lastfällen im Bereich der Kurzzeitfestigkeit bei der Simulation der Verbindungstechnik

Ein weiterer Schwerpunkt war die Entwicklung einer Methode zur Berücksichtigung von Lastfällen im Bereich der Kurzzeitfestigkeit bei der Simulation der Verbindungstechnik. Motivation dafür ist, dass komplexe und hochgradig nichtlineare Lastfälle, wie etwa die Hindernisüberfahrt derzeit nicht rein virtuell

beurteilt werden können, weil entsprechende Methoden, Abläufe und Werkstoffkennwerte, etc. nicht oder nur teilweise vorliegen. Insbesondere ist die Beurteilung der Festigkeit- und Lebensdauer der Verbindungstechnik im Bereich der Kurzzeitfestigkeit wie z.B. bei Missbrauchstests oder in Beanspruchungskollektiven mit dominanten Einzelereignissen (z.B. Schlagloch) derzeit nur ungenügend möglich. Die Entwicklung der Methode erfolgte anhand des Verbindungstyps Schweißpunkt und soll in weiterer Folge auch auf die anderen punktförmigen Verbindungstypen übertragen werden. Dabei wird für jede Verbindung eine Sicherheit gegen Streckgrenze berechnet, wobei zur Berechnung der jeweils für die Verbindung kritischste Beanspruchungszustand aus einem Beanspruchungskollektiv ermittelt wird. Dazu werden zu jedem Zeitpunkt die auf Verbindung wirkenden äußeren Kräfte auf ein Parametermodell der Verbindung übertragen und in jedem Kerbknoten ein Beanspruchungs-Zeitverlauf unter Berücksichtigung des Effekts der Mikrostützwirkung ermittelt. Im weiteren Ablauf (Abbildung 12) wird aus den Extremwerten im Beanspruchungs-Zeitverlauf ein kritisches Mittelspannungsniveau bestimmt und daraus unter Berücksichtigung des elasto-plastischen Materialverhaltens mittels der Makrostützfähigkeit die Sicherheit gegen Streckgrenze ermittelt. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass nach der Implementation in der Software für alle Verbindungen im Modell der jeweils kritischste Zustand für das gesamte Beanspruchungskollektiv automatisiert beurteilt wird.

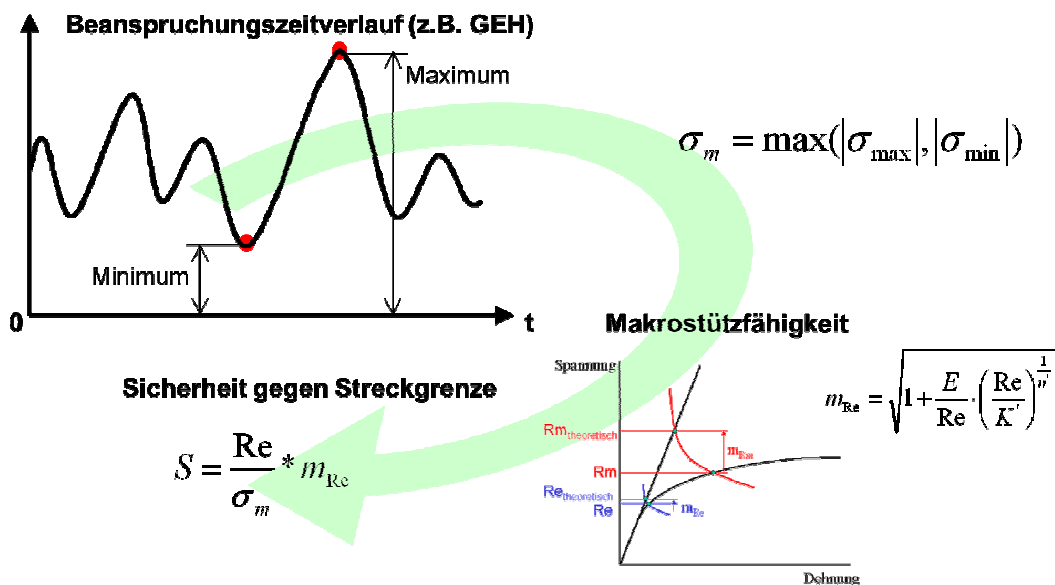


Abbildung 12: Ablauf der Methode zur Berücksichtigung von Lastfällen im Bereich der Kurzzeitfestigkeit bei der Simulation der Verbindungstechnik

2.1.6.2 Implementierung der Methode zur Berücksichtigung von Lastfällen im Bereich der Kurzzeitfestigkeit bei der Simulation der Verbindungstechnik für Schweißpunkte als Prototyp in der Betriebsfestigkeitssoftware

Da Schädigungsrechnungen mit üblicher Definition der Dehnungswöhlerlinie den Bereich der Kurzzeitfestigkeit deutlich unterschätzen, wurde zunächst die Methodik zur Beurteilung erarbeitet. Im nächsten Schritt konnte die programmtechnische Umsetzung realisiert werden, es sind keinerlei zusätzlichen Eingaben des Anwenders erforderlich. Als Ausgabe erhält man neben einem Schädigungswert für die punktförmige Verbindung nun auch einen Sicherheitswert gegen Plastifizieren der Verbindung.

2.1.6.3 Validierung der Methode zur Berücksichtigung von Lastfällen im Bereich der Kurzzeitfestigkeit bei der Simulation der Verbindungstechnik an Bauteilen und Modulen

Mittlerweile läuft auch in der üblichen Projektarbeit die Bewertung von Schweißpunkten hinsichtlich Kurzzeitfestigkeit bzw. Einzelereignissen bei jeder Schädigungsrechnung mit. In der Projektanwendung konnten durch diese Vorgehensweise problematische Stellen aus der Vergangenheit bereits erklärt werden. Mit der vorliegenden Methode kann nun auch das Versagen der Verbindungstechnik im Falle von dominanten Einzelereignissen gut vorhergesagt werden.

2.2 Methoden und Werkzeuge für Festigkeit, Steifigkeit, Ermüdung, Lebensdauerabschätzung für die virtuelle Entwicklung Betriebsfestigkeit aufgrund der Anforderungen des Multimaterial Leichtbaus (AP2)

2.2.1 Bestimmung des Potenzials für anisotropen Materialeinsatz

2.2.1.1 Erstellung einer Methode zur Bestimmung des Potenzialbereichs von Werkstoffen mit anisotropem Werkstoffverhalten auf Basis der Erkennung von unidirektional belasteten Bereichen

Das Hauptaugenmerk bei der Erarbeitung einer Vorgehensweise wurde dabei auf die Lastpfadanalyse und auf dieser Basis durchgeführte Erkennung von unidirektional belasteten Bereichen gelegt. Dies ist die Grundlage zur Erkennung jener Bereiche, für die es sinnvoll ist, die Eigenschaften der anisotropen Werkstoffe wie z.B. FVK so zu legen bzw. einzusetzen, um die Belastungen möglichst optimal aufzunehmen. Ebenso wesentlich ist die Erkennung von Bereichen mit multidimensionaler Belastung, wo der Einsatz von anisotropen Werkstoffen wenig bzw. nicht zielführend und die Verwendung von Werkstoffen mit isotropem Verhalten effizienter ist.

Endziel dabei ist es, vorab für eine konzipierte Gesamtstruktur zu bestimmen, welcher Werkstofftyp im Multimaterialverbund für die einzelnen Bauteile am geeignetsten mit Hinblick auf Steifigkeit, Festigkeit und Gewicht ist. Bei der Entwicklung der Methode wurde von Schalenstrukturen ausgegangen, weil diese das Haupteinsatzgebiet darstellen. Im Weiteren werden auf Basis eines isotropen Materialverhaltens in einer linearen FE-Rechnung die Spannungstensoren in den Knoten der Schalenelemente für die betrachteten Grundlastfälle berechnet und gemittelt. Bei einem gegebenen Beanspruchungskollektiv werden nachfolgend die gemittelten Spannungstensoren gemäß den äußeren Belastungen auf die Struktur superponiert, wodurch sich in jedem Knoten ein Zeitverlauf des Spannungstensors ergibt. Die Betrachtung von Beanspruchungskollektiven ist dabei wichtig, weil diese das Ausmaß der unidirektional beanspruchten Bereiche am Bauteil gegenüber Grundlastfällen wesentlich beeinflussen können.

Die Spannungstensor-Zeitverläufe in jedem Knoten werden nun im Folgenden nach speziellen Kriterien analysiert. Zunächst werden jedoch in einer Vorfilterung auf Basis der von Mises-Vergleichsspannung jene Stellen herausgefiltert, die aufgrund ihres niedrigen Spannungsniveaus gegenüber einem absoluten Grenzwert nicht relevant für die Beurteilung sind. Weiter werden an den Stellen nur Zeitschritte in die Beurteilung aufgenommen, die gegenüber den restlichen Zeitschritten eine hohe Beanspruchung an der Stelle verursachen. Danach kommen als Hauptkriterien die zeitlichen

Verläufe der Richtung der Hauptnormalspannung und der Mehrachsigkeit zur Anwendung. Mit der Betrachtung der Größe der Abweichung der Richtung der Hauptnormalspannung von der zeitlich gemittelten Richtung wird beurteilt, ob die Ausrichtung der Belastung im zeitlichen Verlauf an einer Stelle zu stark streut. In diesem Fall wird die Stelle aufgrund inhomogener Beanspruchungsrichtungen als nicht geeignet bewertet. Für die Stellen mit homogener Beanspruchungsrichtung wird eine Bewertung der Mehrachsigkeit vorgenommen. Ein im Bauteil auftretender Spannungszustand ist grundsätzlich mehrachsig (dreiaxsig). Zur Ermittlung der Mehrachsigkeit des Spannungszustandes an den Knoten der Schalenelemente wird der sogenannte Mehrachsigkeitsgrad (MAG) in der Form

$$MAG = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{3} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}}$$

verwendet, wobei σ_1 , σ_2 und σ_3 die Hauptspannungen des Spannungstensors darstellen. Mit Hilfe des Mehrachsigkeitsgrades können nun unidirektionale Spannungszustände ($MAG=-0,577$ und $MAG=0,577$) aber auch Mischzustände erkannt werden. An den Stellen wird nun der zeitliche Verlauf des Mehrachsigkeitsgrades klassiert, und die entsprechenden Häufigkeiten in den Klassen ermittelt. Damit können nun dominierende Spannungszustände erkannt und gemäß Ihrer Eignung für anisotrope Werkstoffe bewertet werden. Zusammengefasst können so alle Stellen am Bauteil mit einer Maßzahl bewertet werden, wobei die Maßzahlen 2-4 hinsichtlich Beanspruchung eine definitive Eignung für Composite-Werkstoffe mit UD-Lagen anzeigen (Tabelle 1).

Aussage	Bewertung
Das Element wurde nicht zur Bewertung zugelassen	0
Stelle nicht stark beansprucht	1
Stelle UD geeignet, Zug	2
Stelle UD geeignet, Belastung wechselnd zwischen Zug und Druck	3
Stelle UD geeignet, Druck	4
Stelle rein auf Schub belastet	5
Mischzustände, zuglastiger Schub, drucklastiger Schub, ...	6
Stelle zweiachsig Druck-Druck belastet	7
Stelle zweiachsig Zug-Zug belastet	8
Stelle aufgrund inhomogener Beanspruchungsrichtungen nicht geeignet	9

Tabelle 1: Bewertungsschema für alle Stellen am Bauteil hinsichtlich der Eignung für Composite-Werkstoffe mit UD-Lagen

Die entwickelte Methode wurde bereits an einfachen bauteilähnlichen Proben für einzelne Lastfälle angewendet und zeigt dort nachvollziehbare Ergebnisse. Im nächsten Schritt wird die erarbeitete Methode in der Software implementiert und an Bauteilen angewendet.

2.2.1.2 Methode zur Bestimmung des Potenzialbereichs von Werkstoffen mit anisotropem Werkstoffverhalten als Prototyp in der Lebensdauersoftware

Die Umsetzung als Prototyp wurde erfolgreich abgeschlossen. Somit können nicht nur einzelne Bauteile für Einzelbelastungen beurteilt werden, sondern ganze Fahrzeugmodule und auch Fahrzeugkarosserien gewichtet über die lokale Beanspruchungshöhe sogar mit gesamten Belastungs-Zeitreihen.

2.2.1.3 Erste Validierung des Prototyps zur Bestimmung des Potenzialbereichs von Werkstoffen mit anisotropem Werkstoffverhalten an Modulen und Karosserien

Die Methode der Potenzialabschätzung wurde anhand einer Cabrio-Struktur angewandt. Die zur Bewertung herangezogenen Kriterien umfassen die Belastungshöhe, den Belastungszeitpunkt, die Streuung der Belastungsrichtung und die Art der Belastung. Die bewerteten Lastfälle sind Schlagloch 3g, Kurvenfahrt rechts, wechselnde Kurvenfahrt, Bremsung und Beschleunigung. Dem Modell wurde ein isotropes Materialverhalten zu Grunde gelegt. In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse über den Einsatz von unidirektional verstärkten Lagen bzw. Gewebelagen für den gesamten Body in White dargestellt.

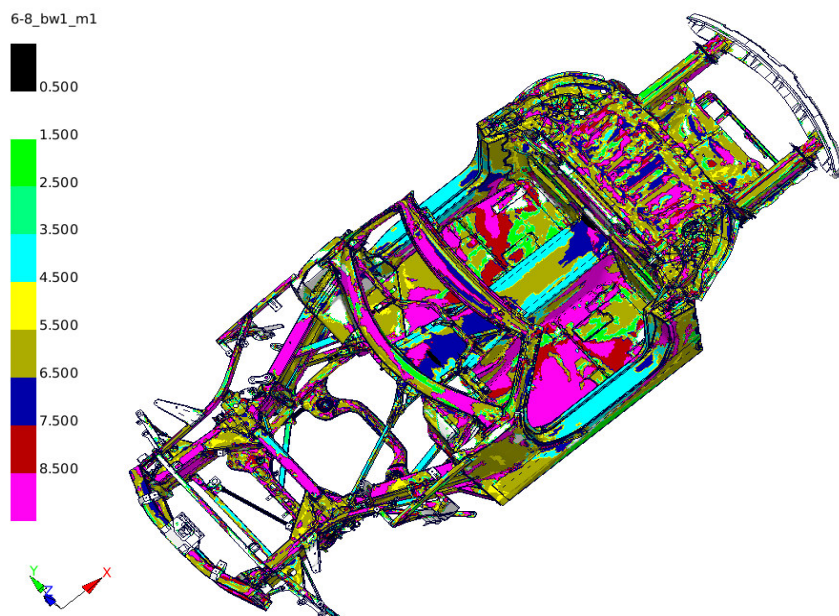


Abbildung 13: Darstellung des Potenzials für Einsatz von anisotropem Werkstoff

Es wird als sinnvoll erachtet, die Zahl der Lastfälle auf zwei bis drei Lastfälle zu reduzieren, um die Ergebnisqualität zu steigern und um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern.

2.2.1.4 Verfeinerung der Methode zur Bestimmung des Potenzialbereichs von Werkstoffen mit anisotropem Werkstoffverhalten und Umsetzung in der Betriebsfestigkeitssoftware

Um zu eindeutigen Ergebnissen hinsichtlich der Beurteilung von veränderlichen Beanspruchungen auch im zeitlichen Verlauf zu kommen, wurden zusätzlich 2 Kriterien eingefügt. Dafür wird zunächst ermittelt, ob der jeweilige auftretende Zustand überhaupt zu festigkeitsrelevanten Beanspruchungen führt. Wird ein festgelegter Beanspruchungswert überschritten, so wird dieser Zustand bewertet, andernfalls erfolgt eine sogenannte Filterung. Alle relevanten Zustände werden schließlich klassiert.

Die Veränderung des Beanspruchungszustandes wird durch die Drehung der Richtung der Hauptnormalspannung (φ) identifiziert. Potenzial für gerichtetes Materialverhalten besteht natürlich umso mehr, je weniger sich der Beanspruchungszustand ändert bzw. ob der Winkel φ nur wenig variiert. Somit kann auch ein gesamter zeitlicher Beanspruchungsverlauf der Systematik zugeführt werden um zu erkennen, ob Potenzial für einen anisotropen Werkstoff bzw. Composite gegeben ist.

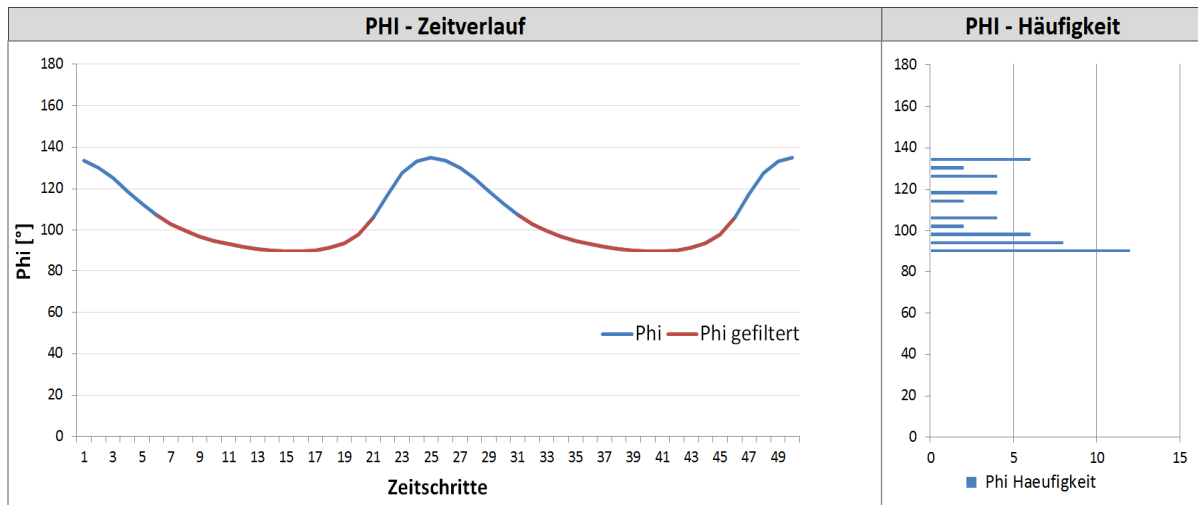


Abbildung 14: Veränderung des Winkels ϕ der Hauptnormalspannungsrichtung im zeitlichen Verlauf

2.2.1.5 Weitere Validierung der Methode zur Bestimmung des Potenzialbereichs von Werkstoffen mit anisotropem Werkstoffverhalten

Die Anwendung der Methodik zeigt in der Praxis in der Nähe von Lasteinleitungen und Streben geringe Änderungen der Belastungsrichtung und somit eine gute Eignung zum Einsatz für Composites. Besonders interessant wäre noch die Ermittlung eindeutiger Lastpfade bei Bauraummodellen. Allerdings ist die Methodik derzeit auf Schalenelemente limitiert, Solidstrukturen können in der Form noch nicht beurteilt werden.

2.2.2 Erweiterung des PUCK-Kriteriums basierend auf der FEM-Analyse von Composites

2.2.2.1 Umsetzung der Versagenskriterien zur Festigkeitsbeurteilung von Compositewerkstoffen als User Subroutine auf Basis einzelner Lastfälle

ABAQUS bietet für die Anstrengung nach PUCK das entsprechende Formelwerk für 2D-Strukturen. Die Erweiterung auf 3D-Strukturen konnte als Subroutine ergänzt werden. Als weiteres Phänomen konnte das Degradationsverhalten durch Zwischenfaserbrüche mit erfasst werden, was sich schließlich in reduzierten Steifigkeitseigenschaften äußert. Dafür wurden entsprechende Kennlinien (ZFB-Anstrengung vs. Steifigkeitsverlust) definiert.

2.2.2.2 Erstellung einer Methode zur Anwendung des Puck-Kriteriums für den zeitlichen Verlauf der Beanspruchungen

Als weiterer Punkt wurde eine Methode entwickelt, mit der das PUCK-Versagenskriterium 2D zur Festigkeitsbeurteilung von Composites auf Basis UD-Schichten auch für den zeitlichen Verlauf der Belastungen möglich wird. Dies hat den Vorteil, dass nicht nur einzelne Lastfälle manuell ausgewählt und nachfolgend beurteilt werden können, sondern es damit auch möglich ist, aus einem Belastungskollektiv automatisiert die kritischen Kombinationen von Zuständen herauszufiltern und zu beurteilen. Abbildung 15 zeigt den Ablauf der entwickelten Methode.

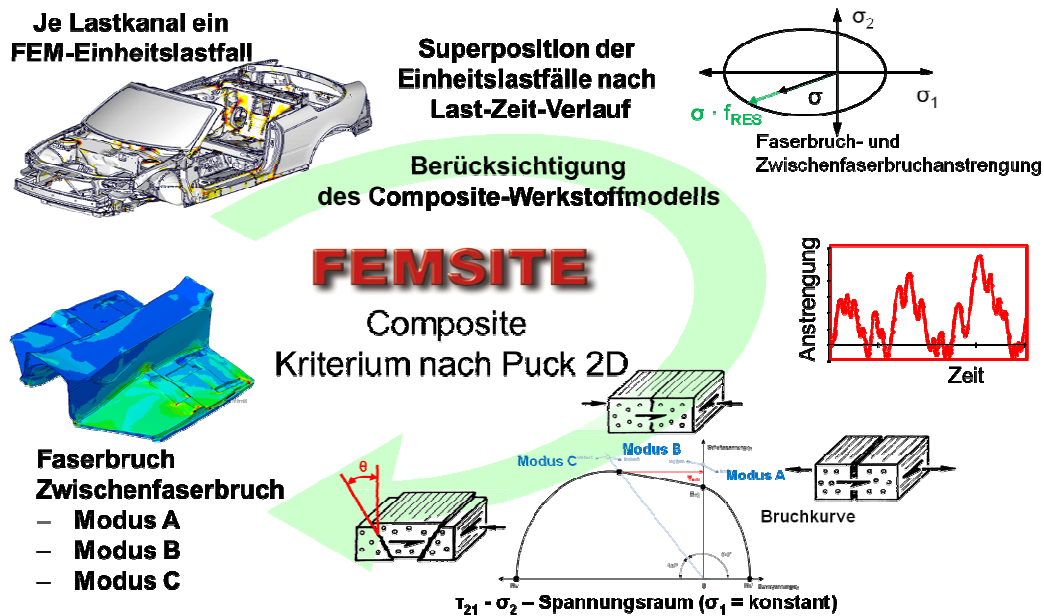


Abbildung 15: Ablauf der Methode zur Festigkeitsbeurteilung auf Basis des Puck-Kriteriums für gesamte Kollektive

Basis für die Anwendung des Verfahrens ist eine quasistatische FE-Rechnung für eine Schalenstruktur bestehend aus Composite Schalen mit entsprechender Definition des Laminataufbaus für definierte FEM-Einheitslastfälle. Dabei werden die Spannungstensoren in den einzelnen Lagen für die berechneten FEM-Einheitslastfälle übernommen und gemäß dem Kollektiv der äußeren Belastungen superponiert. Momentan wird die FE-Rechnung mit dem Solver ABAQUS durchgeführt, eine Erweiterung auf den FE-Solver NASTRAN ist vorgesehen. Die Definition der Schnittstelle zur Übernahme der Spannungsdaten auf Basis eines NASTRAN op2-Files wurde bereits durchgeführt und wird im Weiteren in der Software umgesetzt. Nach der Superposition ergibt sich für jeden Zeitschritt an den einzelnen Stellen in den Laminatlagen der Schalenstruktur ein Spannungstensor-Zeitverlauf, aus dem für jeden Zeitpunkt eine Anstrengung berechnet wird. In der Beurteilung wird zwischen Faserbruch und einem Versagen der Matrix differenziert. Das Brechen der Matrix wird als Zwischenfaserbruch bezeichnet. Der Zwischenfaserbruch ist dadurch charakterisiert, dass zuerst nur ein Riss in der betroffenen Lage entsteht und diese betroffene Schicht weiterhin mit dem Laminat verbunden bleibt. Beim Zwischenfaserbruch wird zudem zwischen Modus A, B und C unterschieden. Ein Zwischenfaserbruch des Modus A wird durch das gleichzeitige Einwirken einer positiven Querspannung und einer Quer/Längs-Schubspannung bewirkt. Gleich wie beim Bruchmodus A, wird dieser Zwischenfaserbruch durch ein gemeinsames Wirken einer Querspannung und Quer/Längs-Schubspannung bewirkt. Jedoch handelt es sich bei der Querspannung um eine Querdruckbeanspruchung wodurch sich die Rissufer nicht öffnen können. Diese Spannung behindert durch eine Art innere Reibung auch den Bruch. Bei einem mehrachsigen Spannungszustand mit den Querdruckspannungen und Quer/Längs-Schubspannung im Fall einer ebenen Betrachtung oder einer zusätzlichen Quer/Quer-Schubspannung im räumlichen Spannungsraum tritt ein Versagen nach dem Modus C ein. Die Bedingung hierfür ist eine größere Querdruckspannung als im Vergleich zu der zu einem Bruch führenden Querdruckspannung in Modus B. Bei der Betrachtung von Laminaten kann noch eine zusätzliche Versagensart auftreten, das Zwischenschichtversagen (Delamination), das aber zu diesem Zeitpunkt der Projektbearbeitung noch

nicht betrachtet wird. Im Verfahren wird nun für jede Stelle und jede Lage der Zeitpunkt mit der maximalen Anstrengung ermittelt. Die zugeordnete Anstrengung (Faserbruch, Zwischenfaserbruch inkl. Modus) wird anschließend für jede Stelle am Bauteil ermittelt und kann im Postprocessing dargestellt werden.

2.2.2.3 Implementierung der Methode zur Anwendung des Puck-Kriteriums zur Festigkeitsanalyse für den zeitlichen Verlauf der Beanspruchungen auf der Basis superponierter Spannungen als Prototyp in der Betriebsfestigkeitssoftware

Die Implementierung in der Betriebsfestigkeitssoftware erfolgte ganz analog zu den in ABAQUS als Subroutine vorliegenden Formelsätzen und kann so sehr effizient komplette Karosseriestrukturen bewerten.

2.2.2.4 Erste Validierung des Prototyps zur Anwendung des Puck-Kriteriums zur Festigkeitsanalyse für den zeitlichen Verlauf der Beanspruchungen

Die Berechnung der Anstrengung im transienten Verlauf (dynamische Berechnung) ist durch eine ABAQUS Subroutine umgesetzt. Es zeigte sich bei den Hardware-Experimenten vor allem bei Erhöhung der Lasten eine gewisse Degradation mit einem damit verbundenen Steifigkeitsverlust, während das ursprüngliche Werkstoffmodell der UD-Schichten linear ist.

2.2.2.5 Anpassung des Prototyps zur Anwendung des Puck-Kriteriums zur Festigkeitsanalyse für den zeitlichen Verlauf der Beanspruchungen aufgrund der bisherigen Validierungsergebnisse

Der beschriebene Ansatz zur Bewertung von transienten Berechnungen wurde angepasst. Ziel war es, den durch das Versagen einzelner Bereiche hervorgerufenen Steifigkeitsabfall nachzubilden und das maximal ertragbare Kraftniveau abschätzen zu können. Hierfür war es notwendig geeignete Ansätze für die Abminderung der einzelnen Steifigkeitskennwerte festzulegen.

2.2.2.6 Abschließende Validierung des Prototyps zur Anwendung des Puck-Kriteriums zur Festigkeitsanalyse für den zeitlichen Verlauf der Beanspruchungen

In der folgenden Abbildung 16 ist die Gegenüberstellung zwischen Simulations- und Versuchsergebnissen für eine 3-Punkt Biegung einer Hutprofilprobe dargestellt.

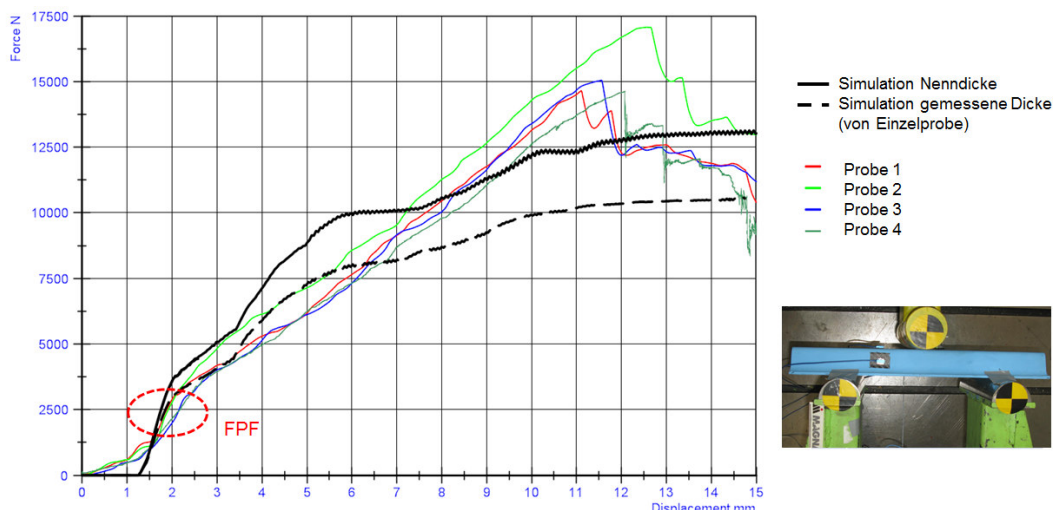


Abbildung 16: Kraft-Weg-Diagramm eines 3-Punkt Biege-Versuchs

Die modelltechnische Abbildung des Steifigkeitsabfalls nach Eintritt des First Ply Failures ist gut ersichtlich. Bei Voranschreiten des Bauteilversagens klaffen die Kurven zwischen Simulation und Versuch weiter auseinander. Grund dafür ist unter anderem ein mit dieser Modellierung einhergehendes nicht abbildbares lokales Versagensbild.

2.2.3 Composite-Bewertung Gesamtprozess: Steifigkeit, Festigkeit und Lebensdauer

2.2.3.1 Erste Methode für die Bewertung von Compositewerkstoffen auf Basis von UD-Schichten (Steifigkeit, Festigkeit und Lebensdauerabschätzung) vor inkl. benötigter FE-Modellierungen bzw. Werkstoffmodelle

FE-Modellierung der FVK Strukturen mit UD-Schichten wurde in erster Linie für den FE-Solver NASTRAN für Schalenstrukturen entwickelt, wobei die Elementtypen S4 und S3 mit entsprechendem Lagenaufbau zur Anwendung kommen. Ein wesentlicher Punkt dabei ist es, für allgemeine komplexe Bauteilformen die durch die Fertigung festgelegte Faserorientierung in die CAD-Geometrie bzw. in das FE-Modell zu übertragen. Die rein manuelle Definition des Lagenaufbaus im CAD-Modell und in weiterer Folge dessen Abbildung im FE-Modell ist bei komplexeren Bauteilen sehr zeitaufwändig und ungenau. Aus diesem Grund kommt eine Drapiersimulation auf Basis des Werkzeuges FIBERSIM zur Anwendung. Als Drapieren wird die Ausrichtung von ebenen Verbunden (Halbzeuge) auf gekrümmten Flächen bezeichnet. Die durch die Fertigung entstehenden Krümmungen der ebenen Halbzeuge bewirken eine lokale Winkeländerung der Faser, es entsteht eine Verteilung über das gesamte Bauteil. Diese Winkeländerung wird durch eine Drapiersimulation nachgestellt. Speziell beim Nasspressen und Injektionsverfahren liefert diese Simulation realitätsnahe Ergebnisse. Nachfolgend können die Lagenaufbauten mit Hilfe des Preprocessors Hypermesh in das FE-Modell übertragen werden. Dabei gibt es noch einige Schwierigkeiten mit der Schnittstelle, deren Lösung in der weiteren Projektbearbeitung vorangetrieben wird. Die ersten Ergebnisse an Bauteilen und Modulen zeigen bereits eine gute Abbildung der Steifigkeit. Die Methode zur Lebensdauerabschätzung basiert auf dem im Vorgängerprojekt entwickelten Prototyp zur Ermittlung der Beanspruchungssituation in den einzelnen UD-Lagen aufgrund von Beanspruchungskollektiven in der Betriebsfestigkeitssoftware dar.

Als Beanspruchungskriterium wurde das Kriterium der maximalen Spannung herangezogen, wobei die ermittelten Spannungskomponenten quer zur Faser und in Faserrichtung sowie für Schub in der Laminebene separat an Wöhlerlinien bewertet werden. Ein wichtiger Punkt war dabei die Entwicklung eines geeigneten Mittelspannungsmodells zur Abbildung des Mittelspannungseinflusses, der eine wesentliche Rolle spielt. Untersucht wurden neben der linearen Rückrechnung auf ein Beanspruchungskollektiv der Ansatz über ein Polynom höherer Ordnung, in das die statischen Zug- und Druckfestigkeiten in Faserlängs- und Faserquerrichtung sowie die statische Schubfestigkeit des für die Lagen verwendeten Werkstoffes eingehen. Basis für die Entwicklung und die weiterführende Validierung sind Probenversuche an UD-Proben für mehrere Winkel des Lagenaufbaus (0° , 45° , 90°) in Bezug auf die Beanspruchungsrichtung und verschiedene Lastfälle (Zug, Biegung). Bei den Compositewerkstoffen mit unidirektionalen Schichten (UD-Schichten) auf Basis von Kohlenstofffasern und Matrizen aus Epoxidharz wird der Werkstoff T620 und nachfolgend der Werkstoff T700 betrachtet. Bei den Wöhlerlinien kommt ein Mastersteigungskonzept zur Anwendung, da sich aus den Versuchsergebnissen für die betrachteten Werkstoffe ähnliche gemittelte Neigungen ablesen lassen. Erste manuelle Durchführungen der entwickelten Methode zeigen bereits eine gute Ergebnisqualität (Abbildung 17).

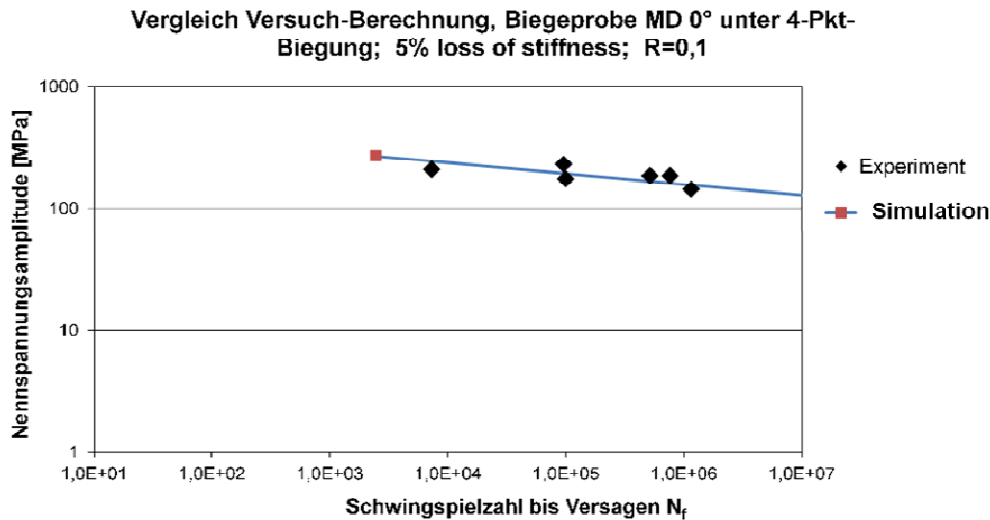


Abbildung 17: Vergleich der Ergebnisse zwischen Versuch und Berechnung an der Biegeprobe für den Werkstoff T620

Darüber hinaus wird auch die Erweiterung der Schnittstelle zur Übernahme der Spannungsdaten im Composite auf den FE-Solver NASTRAN (Unterstützung der PCOMP und PCOMPG Karten) durchgeführt, der im Standard- Betriebsfestigkeitsprozess zur Anwendung kommt.

2.2.3.2 Validierung von Simulations- und Erprobungsmethoden für die Steifigkeitsbeurteilung an Modulen und Gesamtfahrzeugen

Die Validierung der Steifigkeit wurde auf Ebene des Seitenwandmoduls durchgeführt. Hierfür wurde das Bauteil einer quasistatischen Prüfung unterzogen. Der Abgleich zwischen Simulation und Realversuch erfolgte anhand einer Kraft-Weg Kurve. Grundsätzlich zeigen Simulation und Realversuch eine gute Übereinstimmung für die Anfangssteifigkeit. Der leichte Steifigkeitsabfall kann durch die lineare Berechnung nicht nachgestellt werden.

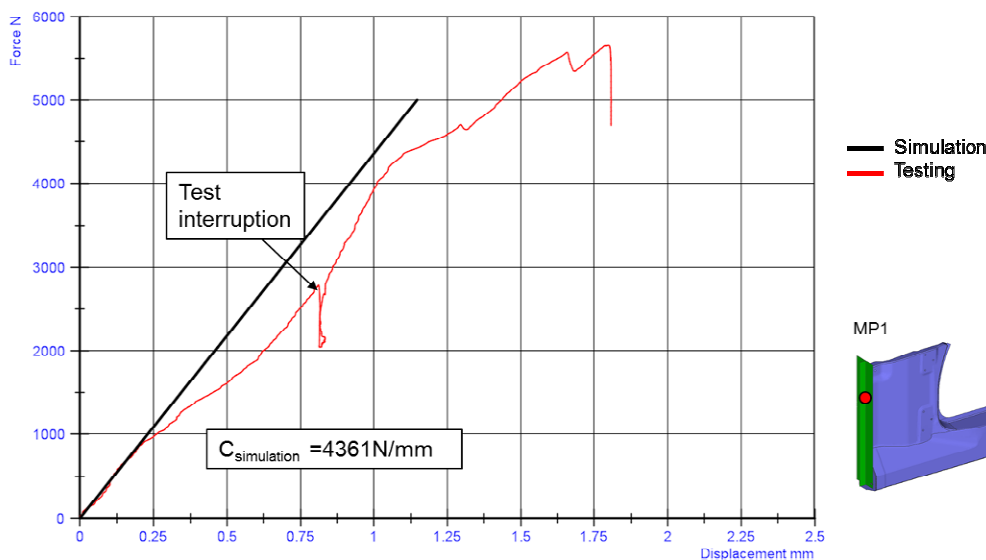


Abbildung 18: Vergleich der Ergebnisse zwischen Versuch und Berechnung an unterem Seitenwandmodul

2.2.3.3 Validierung der Festigkeit auf Basis von Versagenskriterien für einzelne Lastfälle und Bauteile

Die Validierung der Festigkeit wurde anhand einiger Lastfälle an Hutprofilproben durchgeführt. Die Bewertung der Festigkeit erfolgt in der Simulation nach dem PUCK Kriterium, im Realversuch wird das Auftreten des First Ply Failures (FPF) durch Beschleunigungssensoren aufgezeichnet. Der Abgleich der Festigkeit zwischen Simulation und Realversuch wurde durch Vergleich des FPF (Kraftniveau bei Versagen der ersten Faserbündeln) durchgeführt. Die verwendete Geometrie ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

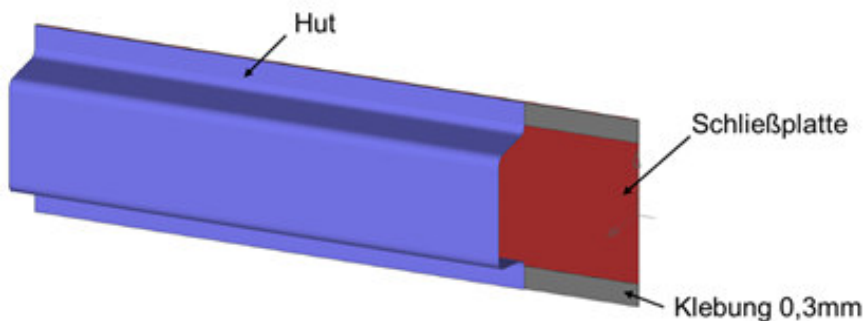


Abbildung 19: Hutprofil aus Composite

Für alle Lastfälle wurden zwei unterschiedliche Lagenaufbauten validiert. Layup A: Gewebe $\pm 45^\circ$ und $0/90^\circ$ mit zusätzlichen UD-Lagen und Layup B: nur Gewebe mit $0/90^\circ$. Die Anzahl der geprüften Proben ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Anzahl Realversuche	2-Punkt Biegung	3-Punkt Biegung	Torsion
Layup A	3	4	3
Layup B	3	4	3

Tabelle 2: Versuchsmatrix Composite-Hutprofil

Die Lasthöhe des FPF in der Simulation ist mit einer einzigen Ausnahme (3-Punkt Biegung Layup A, Versuch Nr.4) stets unter jener aus dem Realversuch. Exemplarisch ist das Ergebnis für die 3-Punkt Biegung mit Layup B dargestellt.

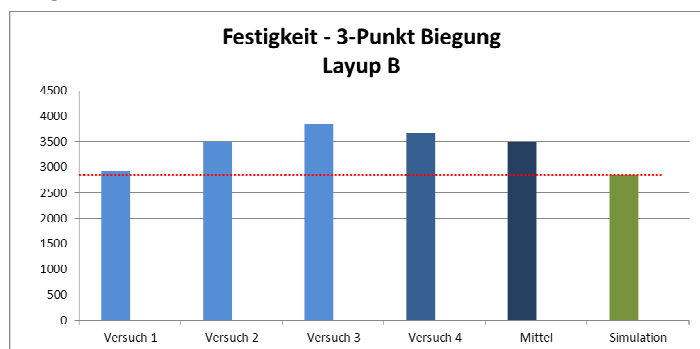


Abbildung 20: Vergleich des First Ply Failures an dem Hutprofil zwischen Versuchen und Simulation

2.2.3.4 Methode zur Lebensdauerabschätzung von Compositewerkstoffen in der Betriebsfestigkeitssoftware (inkl. User Interface und Schnittstelle zu den FE-Solvern NASTRAN und ABAQUS)

Das Paket Umsetzung der Lebensdauerabschätzung für Composites inklusive der Schnittstellen für beide FEM-Solver konnte positiv abgeschlossen werden. Auch hier ist es nun möglich, große Strukturen unter Einwirkung realer Last-Zeit-Reihen zu bewerten.

2.2.3.5 Erste Validierung der Lebensdauerabschätzung für Compositewerkstoffe an Proben und bauteilähnlichen Proben mit dem erstellten Prototyp

Die Berechnung der Lebensdauer für Proben und bauteilähnliche Proben wurde mit dem entwickelten Prototyp durchgeführt. Die höchstbeanspruchten Bereiche decken sich mit den Ergebnissen aus der Einheitslastfallberechnung. Der größte Einfluss auf die Ergebnisqualität ist durch die Wahl der Werkstoffdaten gegeben. Eine versuchstechnische Ermittlung der Dauerfestigkeitskennwerte für die unterschiedlichen Richtungen (Faserlängsrichtung, quer zur Faser und Schub) anhand von Proben wird die Aussagequalität erhöhen.

2.2.3.6 Verbesserung der Methode basierend auf den Validierungsergebnissen

Bereits bei den statischen Festigkeiten ergibt sich gegenüber metallischen bzw. isotropen Werkstoffen eine sehr große Streuung in der Fertigung. Sowohl gewickelten Composites aber insbesondere bei Geweben als auch bei Gelegen ergeben sich sehr unterschiedliche Ergebnisse in der Maßhaltigkeit der Bauteile. Eine Berücksichtigung der realen Dicken führt zu deutlich veränderten Ergebnissen. Als Beispiel sei hier die Festigkeit von Hutprofilen angeführt.

Eine weitere Verbesserung der Methode würde sich natürlich durch versuchstechnische Ermittlung von Werkstoffparametern in Form von Wöhlerlinien ergeben, welche aber derzeit noch unzureichend vorliegen.

2.2.3.7 Überarbeitung der Methode zur Lebensdauerabschätzung von Compositewerkstoffen auf Basis von UD-Schichten aufgrund der Validierungsergebnisse und Umsetzung in der Betriebsfestigkeitssoftware

Der entwickelte Prototyp in der Betriebsfestigkeitssoftware wurde in Folge an einer Reihe von Elementarproben und einem Hutprofil als Prinzipbauteil validiert, für die entsprechende Versuchsergebnisse zugänglich waren. Bei den Elementarproben wurden Konstellationen simuliert, bei denen 10-lagige Substanzproben aus dem Werkstoff T700 mit ACE Standardharz und einer Schichtdicke von 0,2 mm und Faserrichtungen 0°, 45°, 90°, -45° entnommen und einer Zug- bzw. Biegebelastung unterworfen wurden. Weiters wurden dabei Konstellationen für zwei verschiedene Entnahmewinkel (45° und 90°) simuliert, um den Effekt von unterschiedlichen Krafrichtungen in Bezug auf den Compositewerkstoff zu berücksichtigen.

T700/ACE-Std.-Harz	Elementarproben	MD 45°; Zug
		MD 90°; Zug
		MD 45°; Biegung
		MD 90°; Biegung
	Prinzipbauteil (Hutprofil)	MD; 4-Pkt-Biegung

Tabelle 3: Probenkonstellationen zur Validierung des Softwareprototyps zur Lebensdauerabschätzung von Compositewerkstoffen auf Basis von UD-Schichten

Aufgrund der ersten Gegenüberstellungen Versuch zu Simulation wurden die werkstoffbezogenen Parameter für die Wöhlerlinien in Faserrichtung, quer zur Faser und in Schubrichtung angepasst. Weiter wurde die Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses in der Software überarbeitet und neben der Berücksichtigung auf Basis eines Polynoms 2. Ordnung auch die Möglichkeit einer linearen Rückrechnung implementiert. Die Validierung zeigte für alle Konstellationen von Elementarproben eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung, lediglich für den Fall Biegung 45° traten größere Abweichungen auf. Vermutlich sind dafür Interaktionseffekte zwischen den einzelnen Lagen verantwortlich, die im eingesetzten Simulationsmodell (lineare FE-Rechnung mit Composite Elementen) noch ungenügend abgebildet sind. Mit dem angepassten Prototyp und den überarbeiteten Werkstoffkennwerten wurde anschließend eine Validierung am Prinzipbauteil Hutprofil unter einer 4-Punkte Biegebeanspruchung vorgenommen.

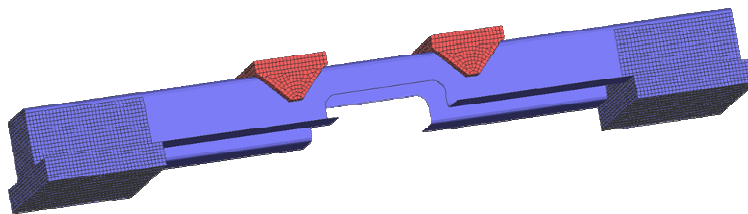


Abbildung 21: Hutprofil 4-Punkte Biegebeanspruchung

Die durchgeführte Gegenüberstellung am Prinzipbauteil zeigte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung, sowohl in Hinblick auf Erkennung der kritischen Stellen als auch in Bezug auf die Schädigungshöhe.

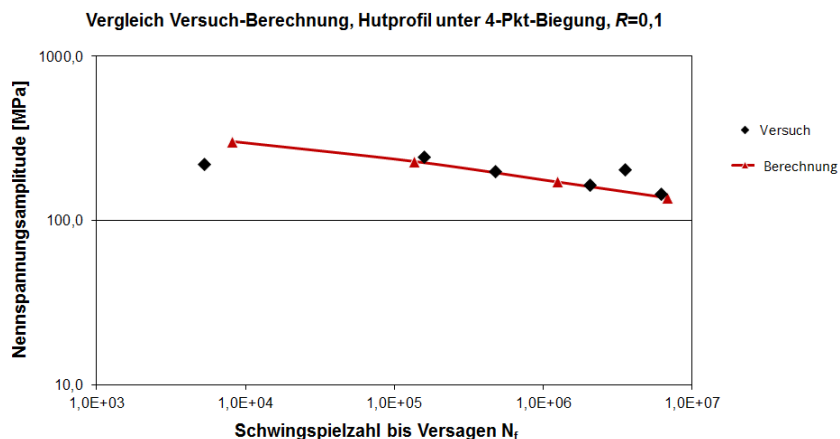


Abbildung 22: Validierung Versuch-Berechnung am Prinzipbauteil Hutprofil

2.2.3.8 Methode zur Berücksichtigung der Delamination liegt vor.

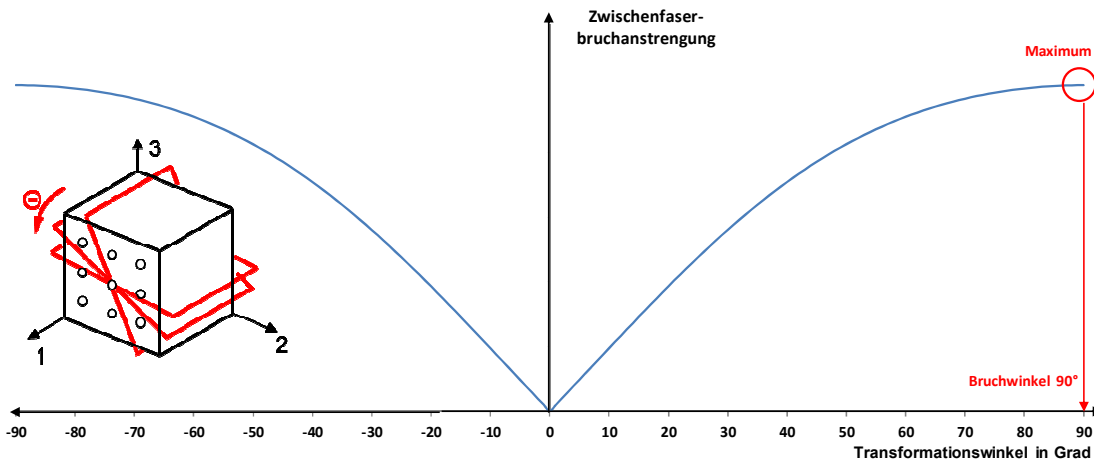


Abbildung 23: Darstellung: Neigung zu Delamination

Die Methode zur Detektion einer Delamination in einem Faserverbundbauteil wird durch Anwendung des PUCK 3D-Kriteriums abgedeckt. Hierfür wird jener Winkel ermittelt, mit dem die Zwischenfaserbruchanstrengung ein Maximum erreicht. Sollte die maximale Zwischenfaserbruchanstrengung bei einem Transformationswinkel von -90° oder $+90^\circ$ auftreten, also senkrecht zur Ebene der UD-Schicht, so ist dies ein Indiz für eine mögliche Delamination.

2.2.3.9 Umsetzung des Prototyps zur Berücksichtigung der Delaminationseffekte von Composite Werkstoffen auf Basis von UD-Schichten

Die Umsetzung erfolgte über eine NASTRAN Subroutine, welche eine Berechnung der Zwischenfaserbruchanstrengung im dreidimensionalen Raum (PUCK 3D) ermöglicht. Um die Berechnung durchführen zu können, mussten die entsprechenden Spannungskomponenten (Normal- und Schubspannungen in Dickenrichtung) mit Hilfe der Finiten Element Methode berechnet werden. Dies erforderte die Verwendung von Kontinuumsselementen (Kontinuumschalen oder Volumenelemente), wodurch jedoch die Rechenzeiten stark ansteigen und die Anwendbarkeit auf Detailmodelle beschränkt wird. Die Umsetzung zur Berücksichtigung von Delamination von unidirektional verstärkten Schichten erfolgt mit der in 2.2.3.8 beschriebenen Methode. Hierfür erfolgt eine entsprechende Abminderung der Steifigkeiten in Dickenrichtung.

2.2.3.10 Validierung des Prototyps zur Berücksichtigung der Delaminationseffekte von Composite Werkstoffen an Proben

Die Validierung der Methode zur Berücksichtigung von Delaminationseffekten wurde nicht durchgeführt, da die notwendigen Versuche aufgrund von zu langen Beschaffungszeiten geeigneter Probekörper nicht durchgeführt wurden. Ebenso ist das Verhältnis von Kosten und Aufwand zu Kompetenzsteigerung und Erhöhung der Aussagequalität nicht zufriedenstellend. Aus diesem Grund wurden hierfür geplante Ressourcen in die Validierung von Versagenskriterien investiert.

2.2.3.11 Erweiterung der Methode von Gelege auf Gewebe

Weiterführend wurde die entwickelte Methode zur Lebensdauerabschätzung von Compositewerkstoffen auf Basis von UD-Schichten von Gelege auf Gewebe erweitert. Da der gewählte Ansatz zur Abbildung von Gelegestrukturen im FE-Modell durch Composite-Schalen mit unterschiedlichen Plies in

Kombination zusammen mit dem in der Software umgesetzten Versagenskriterium erfolgreich war, wurde derselbe Ansatz in einem ersten Schritt auch für die Simulation von Gewebestrukturen herangezogen. Dabei werden die unterschiedlichen Ausrichtungen der Fasern im Gewebe im FE-Modell durch Composite-Elemente mit mehreren Plies mit unterschiedlichen Faserrichtungen abgebildet und die spezifischen Eigenschaften des Gewebes durch modifizierte Werkstoffkennwerte berücksichtigt. In der erstellten Lebensdauersoftware wurden die relevanten Effekte (z.B. Ondulation) ebenfalls durch angepasste Wöhlerlinien für die verschiedenen Beanspruchungsrichtungen abgebildet. Die Wöhlerlinien wurden anhand von Versuchsergebnissen für Elementarproben (Substanzproben) für die Lastfälle Zug und Biegung abgeleitet.

2.2.3.12 Erweiterung der Methode von Gelege auf Gewebe in Software

Da sich die Anpassungen bei der Übertragung der Methode der Lebensdauerabschätzung von Compositewerkstoffen auf Basis von Gelege auf die Anwendung auf Gewebestrukturen beschränkten, musste der Softwareprototyp dahingehend nicht modifiziert werden. Allerdings war es notwendig, eine spezielle Werkstoffdatei für den betrachteten Werkstoff T700 mit ACE Standardharz auf Basis Gewebe anhand von Versuchsergebnissen an Elementarproben (Substanzproben) zu erstellen, die die speziellen Effekte des Gewebes berücksichtigt.

2.2.3.13 Validierung des weiterentwickelten Prototyps zur Lebensdauerabschätzung von Compositewerkstoffen anhand von Proben, bauteilähnlichen Proben bzw. an gesamten Modulen

Die Praxis in der Schädigungsrechnung an real vernetzten größeren Strukturen zeigte kaum relevante Schädigungen im Sinne von Laufzeitvielfachen. Lediglich in den Bereichen der Verbindungen treten häufiger höhere Werte auf. Dies liegt auch an den relativ flachen Werkstoffwöhlerlinien. Die derzeitige Abhilfe ist die Darstellung anhand von Einzellastfällen und einzelnen Belastungszuständen aus den Last-Zeit-Reihen.

2.2.3.14 Validierung des erweiterten Prototyps für Gewebe anhand von Proben und bauteilähnlichen Proben

Mit dem entwickelten Prototyp und den abgeleiteten Werkstoffkennwerten wurden die Lebensdauersimulationen für eine Reihe von Substanzproben auf Basis Gewebe für den Werkstoff T700 mit ACE Standardharz durchgeführt und die ermittelten Bauteilwöhlerlinien den Versuchsergebnissen (Kriterium Bruch) gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung ergab eine gute Übereinstimmung zum Versuch. In weiterer Folge wurde analog zum Gelege auch eine Validierung am Prinzipbauteil Hutprofil unter einer 4-Punkt-Biegungbelastung vorgenommen. Die Gegenüberstellung Simulation-Versuch zeigt eine sehr gute Übereinstimmung am Prinzipbauteil, obwohl die Werkstoffkennwerte an Substanzproben abgeglichen wurden. Dies zeigt, dass das entwickelte Verfahren auch an Bauteilen eingesetzt werden kann.

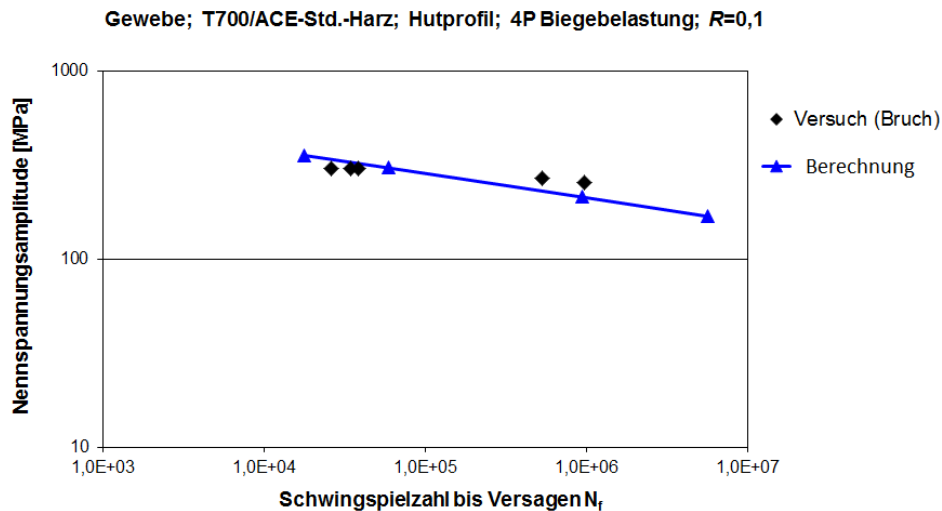


Abbildung 24: Abbildung: Vergleich Simulation-Versuch am Prinzipbauteil Hutprofil auf Basis Gewebe

2.2.3.15 Test der Prozessimplementation für die erarbeiteten Methoden und Prototypen

Im Umgang mit Bauteilen aus anisotropen Materialien ist die bisherige Methodik nicht mehr ausreichend. Die Information über die Orientierung der unidirektional verstärkten Einzellagen oder Gewebelagen muss vom Konstrukteur definiert und an die Berechnung übergeben werden. Das verwendete Werkzeug ermöglicht mit Hilfe einer Drapiersimulation die Information der tatsächlich in der Fertigung zu erwartenden Faserorientierung und Einzellagendicke verteilt über das Bauteil zu ermitteln.

2.2.4 Simulations- und Erprobungsmethoden für hochfeste Stahlwerkstoffe und innovative Aluminiumwerkstoffe

2.2.4.1 Weiterentwicklung der Simulations- und Erprobungsmethoden für die Steifigkeitsbeurteilung und Erweiterung bestehender Materialmodelle auf hochfeste Stahlwerkstoffe und innovative Aluminiumwerkstoffe

Ein weiterer durchgeführter Punkt war die Anpassung der in der Betriebsfestigkeitssoftware vorhandenen Materialmodelle mit Hinblick auf hochfeste Stahlwerkstoffe und innovative Aluminiumwerkstoffe. Im Fokus standen dabei für Stahl vor allem die Werkstoffe 22 MnB5; HCT780X; HCT980X; 42CrMo4 und für Aluminium die Werkstoffe AW-6082 T4; AW-6014 T4, T6, T7; AW-6060 T4, T6; AW-5083; AC-46000. Basierend auf Versuchsergebnissen wurden dabei die in den Materialmodellen verwendeten Werkstoffparameter zur Berücksichtigung von Mikro- und Makrostützwirkungseffekt sowie des Mittelspannungseinflusses entsprechend berücksichtigt. Wesentlich für die Anwendbarkeit in nichtlinearen FE-Simulationen war die Implementation einer Methode zur Erstellung der korrespondierenden Fließkurven. Dabei werden drei Stützstellen der Fließkurve auf Basis der Werkstoffparameter Streckgrenze, Bruchdehnung, Bruchfestigkeit ermittelt und daraus über ein spezielles Optimierungsverfahren ein Vorschlag für den Verlauf der Fließkurve erstellt. Das Verfahren wurde als neue Funktion in der Materialdatenbank der Betriebsfestigkeitssoftware implementiert. Der Anwender kann nachfolgend die Endkorrektur der ermittelten Fließkurven vornehmen und die Fließkurven direkt im ABAQUS Format exportieren.

2.2.4.2 Validierung der Werkstoffmodelle und Werkstoffparameter für hochfeste Stahlwerkstoffe und innovative Aluminiumwerkstoffe an Proben und Bauteilen

Die bereits im ersten Zwischenbericht durchgeführte Erweiterung auf hochfeste Stahlwerkstoffe (22MnB5; HCT780X; HCT980X; 42CrMo4) sowie innovativer Aluminiumwerkstoffe AW-6082 T4; AW-6014-T4, -T6, -T7; AW-6060-T4, -T6; AW-5083; und AC-46000 konnte bereits vielfach in der Praxis angewendet werden. Im Sinne der besseren Anwendbarkeit für duktile und spröde Werkstoffe wurde in der Software auch noch die Steuerung der Schädigungsrechnung durch den Werkstoff realisiert – so wird automatisiert durch die Werkstoffkategorie gleich die passende Anstrengungshypothese gewählt und in einem einzigen Berechnungsdurchlauf können auch unterschiedliche Werkstofftypen adäquat beurteilt werden.

2.2.5 Schädigungsrechnung unter Berücksichtigung von nichtlinearem Strukturverhalten durch Kontakte

2.2.5.1 Methode zur Berücksichtigung von Kontakten bei der Lebensdauersimulation für Beanspruchungskollektive

Als weiterer Schwerpunkt wurde in der aktuellen Berichtsperiode eine Methode zur Berücksichtigung von Kontakten bei der Lebensdauersimulation für Beanspruchungskollektive erarbeitet. Ziel der Methode ist es, die Ergebnisqualität der Lebensdauerabschätzung in Bereichen von Fahrzeugstrukturen, bei denen Kontakte zwischen den Bauteilen infolge des Belastungskollektivs auftreten und einen großen Einfluss auf die örtlich wirkenden Beanspruchungen besitzen, zu erhöhen. Typische relevante Stellen in der Fahrzeugkarosserie sind dafür Dämpferdome und Achsanbindungen. Bislang konnten diese Effekte nur punktuell für einzelne Lastfälle mit rein nichtlinearen FEM-Simulationen abgebildet werden, nicht aber in der Lebensdauersimulation für gesamte Beanspruchungskollektive aufgrund der überaus zeitintensiven Berechnungen insbesondere für Gesamtfahrzeuge.

Die entwickelte Methode basiert auf einer Aufspaltung (Splittung) der Belastungen in Zug- und Druckbeanspruchungen an den relevanten Krafteinleitungspunkten, sowie die Berücksichtigung der Kontaktnichtlinearität im FEM-Solver in den betrachteten Bereichen. Abbildung 25 zeigt den entwickelten Ablauf des Prozesses auf Basis des FEM-Solvers NASTRAN. Analog dazu wird der Prozess auch für den FEM-Solver ABAQUS umgesetzt. Bei der Übernahme der Belastungsdaten aus der MKS-Simulation gibt der Anwender im Modul Transformation der MKS-Ausgabe in der Betriebsfestigkeitssoftware die Kraftangriffspunkte (z.B. Dämpferdom) der Struktur an, an denen die Kraftkomponenten in den Zug- und Druckanteil aufgespalten werden sollen.

In weiterer Folge werden automatisiert die Inputdecks für den FE-Solver für die Definition der Einheitslastfälle an der Struktur und zur Lastfallsteuerung generiert, wobei für die gesplitteten Kraftkomponenten jeweils ein eigener Einheitslastfall für den Zug- und Druckanteil gebildet wird, bei den auch die Kontaktdefinitionen für die jeweilige Stelle angezogen werden. Die Kontaktdefinitionen werden dabei vom Anwender im Preprocessor und in das Inputdeck des FEM-Solvers inkludiert. Die Berechnung der Einheitslastfälle erfolgt für die aufgespaltenen Belastungskanäle unter Berücksichtigung eines „linearen Surface to Surface“ Kontakts, für die restlichen Beanspruchungskanäle rein linear, wodurch auch die Rechenzeit im FE-Solver reduziert werden kann.

Die Information über die aufgespaltenen Kanäle wird über die Zuordnungstabelle an das Modul Schädigungsrechnung der Betriebsfestigkeitssoftware übergeben und dort die Schädigungen berechnet, wobei Zug- und Druckanteil separat superponiert werden.

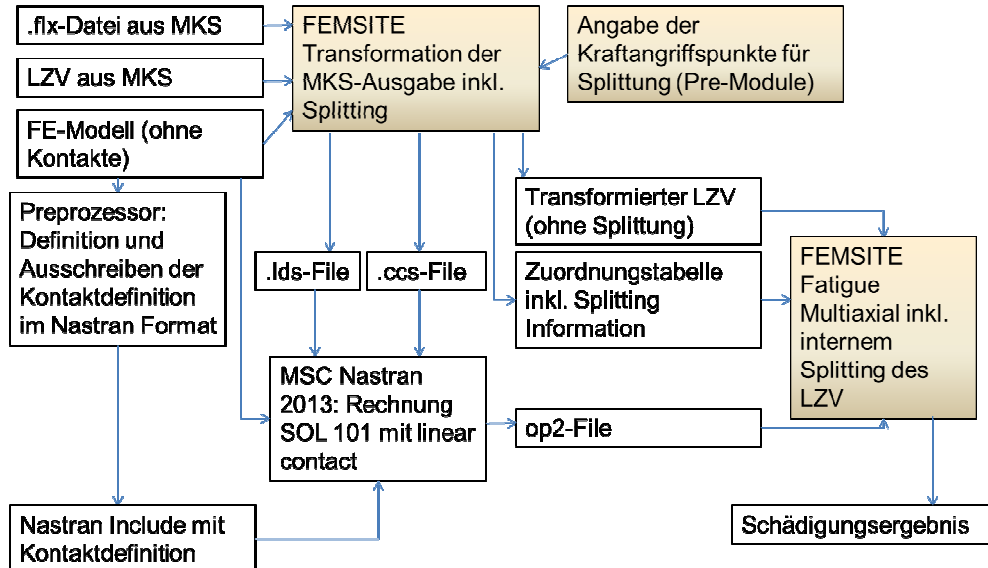


Abbildung 25: Prozess zur Berücksichtigung von Kontakten bei der Lebensdauersimulation

2.2.5.2 Prototyp zur Berücksichtigung von Kontakten bei der Lebensdauersimulation in relevanten Bereichen

In weiter Folge wurde die oben beschriebene Methodik in einem ersten Prototypen umgesetzt. Die Anwendung an realen Fahrzeugstrukturen konnte bereits exemplarisch dargestellt werden.

2.2.5.3 Validierung des Prototyps zur Berücksichtigung von Kontakten bei der Lebensdauersimulation in relevanten Bereichen für Beanspruchungskollektive an Modulen und Gesamtfahrzeugen

Die umgesetzte Methodik erkennt jetzt aufgrund eines Markers „Kanal wird gesplittet / wird nicht gesplittet“, ob für die Lastrichtung an einem Lastangriffspunkt 2 Kanäle oder wie üblich 1 Kanal herangezogen wird. Dementsprechend sind zur Vorbereitung die Lastrichtungen 1x positiv und 1x negativ, mit jeweils einer repräsentativen Last mittels FEM zu berechnen. In der Lebensdauerabschätzung wird dann, je nach Vorzeichen, der jeweilige Kanal entsprechend der Kraft skaliert. Augenmerk ist auf die Größe der Kraft, mit der der nichtlineare Kanal berechnet wird, da sich damit auch die Kontaktsituation und die Abstützung und somit der Kraftfluss ändert.

2.2.5.4 Weiterentwicklung des Prototyps zur Berücksichtigung von Kontakten bei der Lebensdauersimulation für Beanspruchungskollektive

In einem abschließenden Test gelang es auch, mit einem komplexen Lastkollektiv eines Fahrzeuges die Anwendung umzusetzen und zu validieren. Im vorliegenden Beispiel wurde eine Flanschplatte zur Lasteinleitung der Kräfte eines Fahrwerkslenkers in die Karosserie simuliert. In der Realität liegt die Platte auf Druck vollflächig an, bzw. ist auf Zug nur über die Schweißpunkte gekoppelt. Die Wichtigkeit konnte wie hier dargestellt, auch in der Projektanwendung unter Beweis gestellt werden. Die Abstützung entlastet die Schweißpunkte und reduziert so die Schädigungen deutlich.

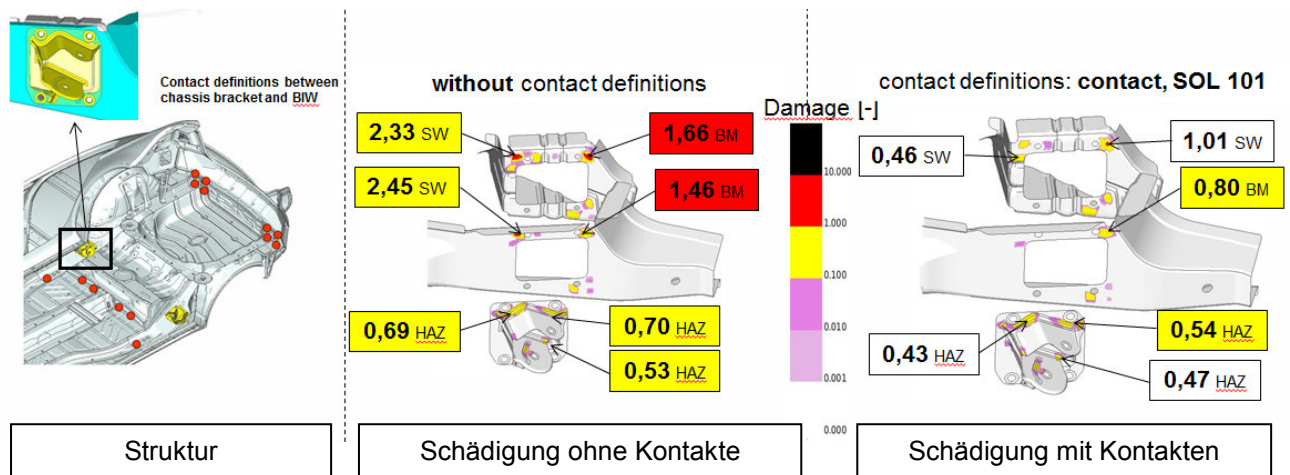


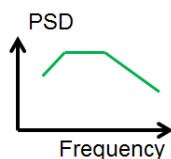
Abbildung 26: Einfluss auf die Schädigungsergebnisse bei Berücksichtigung von Kontakten in der Schädigungsrechnung

2.2.6 Schädigungsrechnung auf der Basis spektraler Leistungsdichte (PSD)

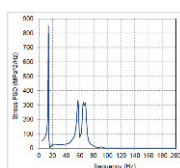
2.2.6.1 Konzept zur Berücksichtigung von Verteilungen der spektralen Leistungsdichte als Belastung

An dieser Stelle soll die Entwicklung eines Konzepts zur Erzeugung von Belastungskollektiven bzw. eine direkte Lebensdauerabschätzung mit modalen Spannungen auf Basis einer gegebenen Verteilung der spektralen Leistungsdichte (PSD) durchgeführt werden. Der Hintergrund dieser Anforderung ist, dass Verteilungen der spektralen Leistungsdichte (PSD) häufig als Input für Schwingtischerproben in der physischen Erprobung eingesetzt werden. In der virtuellen Entwicklung ist es daher zur Validierung von Versuchen bzw. in weiterer Folge als Versuchersatz notwendig, für eine Struktur bei gegebener PSD die Lebensdauersimulation durchzuführen bzw. ein Belastungskollektiv abzuleiten, um dieses z.B. anderen Belastungen gegenüberstellen zu können. Als Methodik wurde schließlich folgende Prozesskette definiert:

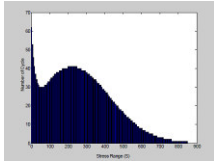
- a) Lineare FEM-Berechnung mit PSD Input



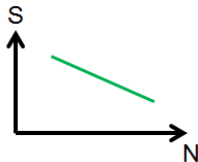
- b) Ermittlung der PSD der Spannungstensoren



- c) Ermittlung der Schwingenspiele nach DIRLIK-Ansatz



- d) Berechnung der Schädigung anhand der PSWT-Wöhlerlinie



2.2.6.2 Entwicklung der Methode zur Berücksichtigung von Verteilungen der spektralen Leistungsdichte als Belastung

In der erforderlichen FEM-Berechnung können jetzt unter Zuhilfenahme von der an dieser Stelle erzeugten Schnittstellen-Tools sowohl für NASTRAN als auch für ABAQUS direkt die Beschleunigungsdichten über die Frequenz in die Berechnung eingebracht werden. Als Output aus der FEM-Berechnung ergibt sich an jedem Knoten eines Elements der Spannungstensor in Form einer sogenannten „Spannungs-PSD“.

2.2.6.3 Methode zur Berücksichtigung von Verteilungen der spektralen Leistungsdichte als Belastung in der Betriebsfestigkeitssoftware

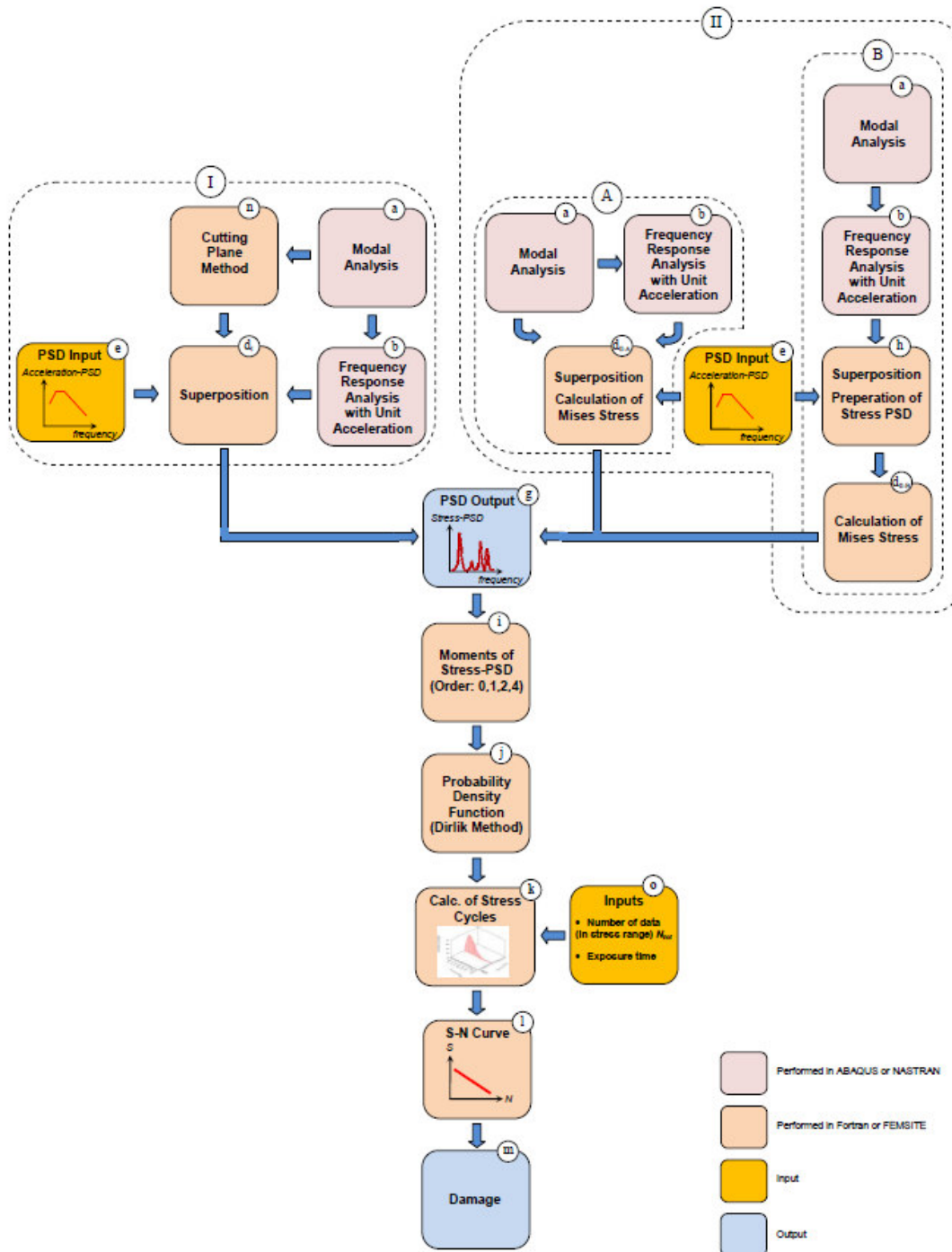


Abbildung 27: Gesamtablauf in der Bewertung hinsichtlich Betriebsfestigkeit auf Basis einer PSD

Die Anwendung der Berechnungsmethodik mit dem genauen Ablauf nach Abbildung 27 wurde bereits für schwingbruchgefährdete Halter und Module in die Projektanwendung erprobt. Auf eine Berechnung im Zeitbereich kann für Variantenberechnungen verzichtet werden. Die Abweichung in der Genauigkeit der Schädigungsergebnisse liegen in der Größenordnung von 5%, die qualitative Verteilung der Schädigung ist sehr zufriedenstellend, bislang blieben keine Hot Spots durch die Berechnung im Frequenzbereich unentdeckt.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die angeführten Umfänge zu den beiden Arbeitspaketen AP1 und AP2 ergaben essenzielle Verbesserungen in den Möglichkeiten zur Simulation der Betriebsfestigkeit im Rahmen der virtuellen Entwicklung. Unter den Rahmenbedingungen des Leichtbaus können nunmehr unter anderem folgende Umfänge im Rahmen von Fahrzeugentwicklungen simuliert werden:

- Verbindungstechniken der Multimaterialbauweise (Verschraubungen, Klebungen aus Epoxid und PUR bzw. Verschraubungen)
- Spaceframe-Strukturen (hybride Modelle: Solid-Schalenmodellierungen)
- Bewertung von Bauteilen aus Composite-Werkstoffen
- Anforderungen hinsichtlich Schwingbruch
- Berücksichtigung von Kontaktnichtlinearitäten für gesamte Karosseriemodelle

Somit können nunmehr auch Projekte und Entwicklungsumfänge bearbeitet werden, welche zum Zeitpunkt der Antragstellung noch gar nicht bzw. mit stark eingeschränkter Ergebnisqualität möglich gewesen wären. Auch der wirtschaftliche Einsatz des Betriebsfestigkeits-Softwarepaketes ist nun für Kunden der Automobilbranche wesentlich attraktiver (technologisch, qualitativ und auch hinsichtlich Handhabung) möglich.

4 Ausblick und Empfehlungen

Das Thema Fügetechnik konnte mit den erzielten Ergebnissen für die betrachteten Verbindungsformen (Epoxid-Kleber, PUR-Kleber sowie Verschraubungen) auf einen höheren Level gebracht werden. Sogenannte Hot Spots können systematisch erkannt werden. Die Anforderungen an das Thema Fügetechnik werden sich auch durch den starken Trend zur Multimaterial- bzw. Spaceframe-Bauweise weiter erhöhen. Zum einen ist die Qualität der Aussagen hinsichtlich Festigkeit und vor allem Lebensdauer auch zufolge der Prozesssicherheit der in der Herstellung sowie die Erfassung aller festigkeitsrelevanten Parameter (z.B. Kleberspalthöhe mit entsprechender Fugenfüllung, Verformung der Geometrie beim Fügen,...) sehr aufwändig und oft nicht verfügbar. Daher muss oft auch konservativ ausgelegt werden.

Zum anderen werden gerade jetzt auch sehr viele neue Verbindungstechniken erforscht und entwickelt (z.B. Punktschweißungen aus Aluminium, Laserschweißverfahren, selbstfurchende Schrauben...) und die Vielfältigkeit der Verbindungen nimmt weiter zu. Daher sind auch in Zukunft hinsichtlich Verbindungstechnik große Anstrengungen zur Umsetzung in effiziente Simulationsmodelle erforderlich, sodass in der Projektanwendung zumindest gute Aussagen hinsichtlich Hotspots getroffen werden können gezielte Optimierungsabläufe möglich sind.

Die Bewertung von Composites gelingt hinsichtlich Steifigkeit und statischer Festigkeit mit guter Aussagequalität auch im Projekteinsatz. Im Allgemeinen sind die Mehrschichtverbunde aus Glasfaser bzw. Kohlefaser vom Werkstoffverhalten her weniger steif, höhere Leichtbauquerschnitte sind zur Erreichung der Steifigkeitsziele erforderlich. Das bringt mit sich, dass das Grundmaterial hinsichtlich Festigkeit noch deutliche Reserven hat, festigkeitslimitierend sind aus den bisherigen Erfahrungen wiederum die bei Composites sehr komplexen Fügestellen.

Die mit dem Leichtbau einhergehende Reduktion des Werkstoffeinsatzes bzw. die Optimierung entsprechend der auftretenden Lasten, erhöht auch die Neigung zu schwingender Beanspruchung durch Frequenzanregung. Die umgesetzte Methodik zur Schwingbruchbewertung über PSD's liefert hier einen großen Beitrag zur Berücksichtigung dieses Effekts, sodass auch kritische Frequenzen im Fahrzeug im Bereich von 30Hz und darunter sehr effektiv bewertet werden können.

Folgende Stoßrichtungen sind für weitere Methodenentwicklungen essenziell:

- Bewertung neuer Verbindungstechniken und deren unterschiedliche Versagensformen
- Effiziente Gewinnung von Festigkeitskennwerten hinsichtlich (Composite-) Werkstoff- bzw. Fügeelemente
- Effiziente Möglichkeiten der Modellgenerierung
- Methodik der Optimierung von Composites (Vielzahl an Parametern)
- In der Bewertung ist der Übergang von Kurzzeitfestigkeit bis zum dynamischen Einmalereignis noch eine große Herausforderung und muss ebenfalls verbessert im Simulationsprozess erfasst werden (zyklisches Plastifizieren der Werkstoffe und / oder hohe Dehnraten)

5 Literaturverzeichnis

- [Bor2005] Bornemann, I.; Brede, M.; Häberle, J.; Hahn, O.; Handing, C.; Hennemann, O.D.; Hesebeck, O.; Jendry, J.; Schlimmer, M., Methodenentwicklung zur Berechnung und Auslegung geklebter Stahlbauteile für den Fahrzeugbau, AiF-Bericht ZN76, FOSTA P 593, 2005
- [Bre2007] Brede, M.; Hahn, O.; Hennemann, O.D.; Jendry, J.; Mihm, K.-M.; Nagel, C.; Schlimmer, M., Methodenentwicklung zur Berechnung und Auslegung geklebter Stahlbauteile im Fahrzeugbau bei schwingender Beanspruchung, AiF-Bericht ZN141, FOSTA P 653, 2007
- [Sch2012] B. Schneider, C. Nagel, M. Brede, H. Schmidt, T. Bruder, B. Kurnatowski, A. Matzenmiller: Schwingfestigkeitsauslegung von geklebten Stahlbauteilen des Fahrzeugbaus unter Belastung mit variablen Amplituden, AiF-Zutech-Projekt ZN307, FOSTA P 796, Düsseldorf, 2012
- [Bro1999] Broughton, W.R., Mera, R.D. and Hinopoulos, G., "Cyclic Fatigue Testing of Adhesive Joints Test Method Assessment", NPL PAJ3 Report 8 CMMT(A) 191, 1999
- [Rup2012] Ruprecht, F.; Ruf, A.; Barenbrock, D.; Kepplinger, G.; Hofer, M.; Nieß, D.: Vorgehensweise zur Lebensdauerabschätzung struktureller Klebeverbindungen im Automobilbau, Vortrag und Veröffentlichung im Rahmen der internationalen Kongresses „DVM-Tagung - Werkstoffe und Fügeverfahren – Neue Herausforderungen für die Betriebsfestigkeit“, 10. - 11. Oktober 2012, Paderborn, Deutschland.
- [Rup2010] Ruprecht, F.; Martin, M.; Ruf, A.; Weisner, R.; Kepplinger, G.; Hofer, M.; Steiner, J.: Fatigue life estimation of joints in vehicle body development based on a local approach and mesh-independent modeling, Vortrag und Veröffentlichung im Rahmen des FISITA World Automotive Congress 2010, 30. Mai – 4. Juni, Budapest, Ungarn.

6 Kontaktdaten

ProjektleiterIn:

- Dr. Anton Falkner

Institut/Unternehmen:

- MAGNA STEYR Engineering AG&CoKG

Kontaktadresse:

- Liebenauer Hauptstr. 317, 8041 Graz, Tel +43 664 8840 5224,
anton.falkner@magna.com; www.magnasteyr.com)

Auflistung der weiteren Projekt- bzw. Kooperationspartner Name / Institut oder Unternehmen

MAGNA STEYR Engineering AG&CoKG :

- Dr. Michael Hofer
- Alfred Dunst
- Dietmar Nieß
- Andriy Rybakov
- Gerhard Kepplinger
- Florian Schmalhofer
- Stefan Mohorko

M.J.L. Technische Software GmbH:

- Michael Johann Leipold
- Uwe Hezel
- Thomas Ringhofer

IMPRESSUM

Verfasser

MAGNA STEYR Engineering AG&CoKG
Liebenauer Hauptstr. 317, 8041 Graz
Tel +43 664 8840 5224
E-Mail: anton.falkner@magna.com
Web: www.magnasteyr.com
Projektleiter: Anton Falkner

Autoren

Gerhard Kepplinger
Michael Hofer

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH