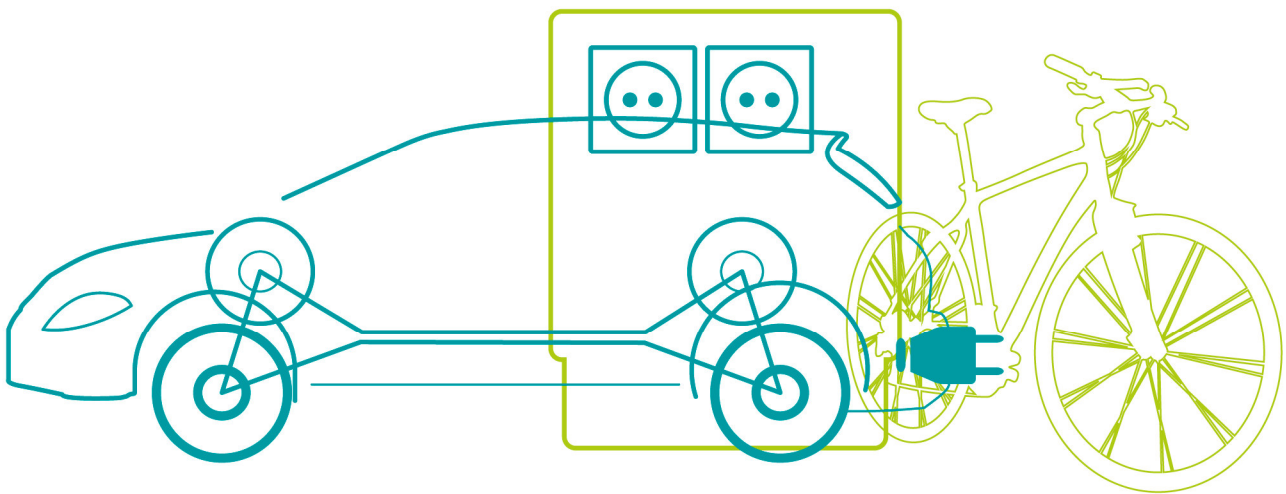




ABIL

Methoden und Softwareentwicklung zur
Absicherung der Betriebsfestigkeit und
Fügetechniken innovativer
Leichtbaukonzepte



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 „Neue Energien 2020“. 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 that reads 'Theresia Vogel' in a cursive script.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

NEUE ENERGIEEN 2020

Publizierbarer Endbericht – INDEX

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

1. Einleitung

Die Betriebsfestigkeitssimulation wird bei MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik seit vielen Jahren im Zuge der Entwicklung von Fahrzeugen neben der NVH- und Crashesimulation erfolgreich eingesetzt. Ziel der virtuellen Entwicklung ist es, Fahrzeuge bis zu einem hohen Reifegrad vor der Fertigung von physischen Prototypen rechnerbasiert zu entwickeln und auf simulatorischem Weg abzusichern. Dies bietet die Möglichkeit, auftretende Probleme frühzeitig im Entwicklungsprozess zu erkennen und zu beheben, ohne dass teure Änderungen an physischen Prototypen und Werkzeugen vorgenommen werden müssen, deren Wirksamkeit mit aufwendigen und zeitintensiven Versuchen anschließend sichergestellt werden muss.

Bei der Entwicklung der Karosserie aber auch von Komponenten wird der Schwerpunkt immer mehr auf substantielle Massenreduktionen und umweltschonenden Materialeinsatz gelegt, um die Energieeffizienz der Fahrzeuge zu steigern. Erreicht wird dies durch den Einsatz von Leichtbaukonzepten (z.B. Space Frame Konzepte) und den damit verbundenen Fügetechnologien (z.B. Laserschweißen, Stanznieten, Kleben, etc.) und Leichtbauwerkstoffen (Aluminium, anisotrope Werkstoffe, etc.). Aufgrund der zur Verfügung stehenden Entwicklungszeit ergibt sich die Notwendigkeit Methoden und Prozesse zu entwickeln, um die Steifigkeit und Lebensdauer der Leichtbaustrukturen in der virtuellen Entwicklung aussagekräftig beurteilen zu können. Insbesondere müssen auch die vorkommenden Schweißnähte mit den auftretenden Schweißnahtformen und Nahttypen sowie die Schweißnahtenden, von denen häufig Schäden ausgehen, bei der Lebensdauerabschätzung berücksichtigt werden. Bei Space-Frame Strukturen muss die Verbindung von Blech mit Gussbauteilen durch z.B. Stanznieten, Klebung oder Schweißnähte in der Simulation richtig abgebildet und beurteilbar sein.

Aufgrund der verstärkt eingesetzten Klebeverbindungen an den Karosserieflanschen ist es notwendig, Konzepte zur Beschreibung des Versagens der Klebeverbindungen unter Schwingbeanspruchung und Betriebslasten zu entwickeln und in die Betriebsfestigkeitssimulation zu integrieren.

Ein limitierender Faktor bei der Durchführung der virtuellen Schleifen bei der Entwicklung stellt die Zeit zur Erstellung der Finite-Elemente-Modelle der betrachteten Strukturen für die Simulationen dar. Diese Zeit kann stark reduziert werden, indem die Einzelteile z.B. einer Rohkarosse unabhängig voneinander automatisiert vernetzt werden. Dieses Konzept erfordert es jedoch Methoden zu entwickeln, um alle eingesetzten Fügetechnologien mit ihren korrekten örtlichen Steifigkeiten in den Finite-Elemente-Modellen in der Form von Ersatzmodellen abbilden zu können, die nicht auf kongruenten Netzen basieren (netzunabhängige Verbindungstechnik). Bei der nachfolgenden

Lebensdauerabschätzung für die Fügestellen müssen die lokalen örtlichen Beanspruchungen an den Fügestellen ermittelt und beurteilt werden können.

Die bisher eingesetzten Konzepte und Methoden für die Lebensdauerabschätzung (Ermüdung, Verschleiß) müssen mit Hinblick auf die neuen Werkstoffe und Simulationsmethoden erweitert werden. Geeignete Verfahren zur Abbildung des Versagens für anisotrope Werkstoffe und Elastomerbauteile sind zu entwickeln und in den Prozess der Lebensdauerabschätzung aufzunehmen. Da die zugehörigen Finite-Elemente-Simulationen aufgrund der auftretenden Nichtlinearitäten (Werkstoffe, Kontakte etc.) zunehmend nichtlinear durchgeführt werden, ist es erforderlich, die Lebensdauerabschätzung basierend auf diesen nichtlinearen Ergebnissen aufzusetzen.

Aus diesen Erfordernissen heraus wurde das Projekt **Methoden und Softwareentwicklung zur Absicherung der Betriebsfestigkeit und Fügetechniken innovativer Leichtbaukonzepte** (Kurztitel: **ABIL**) aufgesetzt mit dem Ziel Methoden zur spezifischen rechnerischen Bewertung und optimierten Auslegung der tragenden Leichtbaustrukturen (z.B. Space-Frame Strukturen) hinsichtlich Steifigkeit und Betriebsfestigkeit zu entwickeln, zu validieren und nach erfolgreichem Projektabschluss in das bestehende, von der MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik entwickelte Betriebsfestigkeitssoftwarepaket FEMSITE [1] zu integrieren, um in weiterer Folge zur Bearbeitung der laufenden Entwicklungsprojekte eingesetzt werden zu können. Dies stellt einen wesentlichen Baustein zur Massen- bzw. Gewichtsreduktion sowie in weiterer Folge daraus resultierenden Energieeffizienz von Automobilen dar.

Das Projekt wurde gemäß der beschriebenen Inhalte in drei Arbeitspakete wie folgt gegliedert:

AP1 Virtuelle Betriebsfestigkeitsbeurteilung für punktförmige Verbindungen und Klebeverbindungen

AP2 Virtuelle Betriebsfestigkeitsbeurteilung für linienförmige Verbindungen

AP3 Weiterentwicklung der Konzepte und Methoden zur Lebensdauerabschätzung zur optimierten Auslegung der Bauteile

Die Basis für die Methodenentwicklungen bildeten die bisher umgesetzten Konzepte, Methoden, Abläufe und Vorgehensweisen bzw. bereits durchgeführte Voruntersuchungen ([2],[3]). Die Abarbeitung der Inhalte für die einzelnen Arbeitspakete des Projektes erfolgte jeweils in Phasen, die stufenweise umgesetzt und nachfolgend in den Entwicklungsablauf integriert werden. Damit verbunden war die Erstellung von entsprechenden Prototypen in der Software und Versionen, damit die erforderliche Funktionalität bereitgestellt werden kann. Einer Entwicklungsphase für die Methoden und Konzepte folgte eine erste Umsetzungsphase, damit die entwickelten Verfahren prototypisch angewandt werden konnten. Danach folgte eine erste Validierung mit Versuchsergebnissen zumeist an Proben oder bauteilähnlichen Proben bzw. der Anpassung der Methoden aufgrund der Validierung. Die Erkenntnisse aus dieser Phase flossen in die zweite Umsetzungsphase ein, der eine weitergehende Validierungsphase folgte. Weiterführend wird die Implementierung der entwickelten Verfahren in den Entwicklungsprozess bearbeitet.

2. Inhaltliche Darstellung

Den Arbeitspaketen wurden folgende Inhalte und Ziele zugeordnet:

AP1 Virtuelle Betriebsfestigkeitsbeurteilung für punktförmige Verbindungen und Klebeverbindungen

- Für die Verbindungsarten Schraubverbindungen, Stanznietverbindungen, Clinchen, etc. basierend auf Methoden und Konzepten für Schweißpunkte und kurze Laserstrichnähte:
 - Entwicklung von netzunabhängigen Ersatzmodellen zur Abbildung des lokalen Kraftflusses an der Fügestelle in den Finite-Elemente-Modellen der Leichtbaustrukturen.
 - Entwicklung von Verfahren zur Übertragung der Kräfte an der Fügstellung auf feine Parametermodelle zur Ableitung der örtlichen Beanspruchungen an der Fügestelle.
 - Entwicklung von geeigneten Parametermodellen der Fügstellen (bei Stanznieten z.B. durch Simulation des Fügevorganges).
 - Weiterentwicklung der bestehenden Methoden zur Lebensdauerabschätzung aufgrund der örtlichen Beanspruchungen an der Fügestelle.
- Methoden zur Abbildung von zwei- und mehrschnittigen Verbindungen für Stanznieten und Schrauben.
- Modellierung der Verbindung von Blech mit Gussbauteilen in Spaceframe-Strukturen und Lebensdauersimulation.
- Entwicklung eines Konzepts zur Beschreibung des Versagens von Klebeverbindungen unter Schwingbeanspruchung.
- Entwicklung eines praxistauglichen Verfahrens zur Lebensdauersimulation von Klebungen unter Betriebsbelastungen
- Untersuchung der Kombination von Klebeverbindungen mit punktförmigen Verbindungen (Punktschweißklebung, geklebte Stanznietflansche).
- Validierung mit Versuchsergebnissen und Integration in der Software.

AP2 Virtuelle Betriebsfestigkeitsbeurteilung für linienförmige Verbindungen

- Entwicklung von netzunabhängigen Ersatzmodellen für Schweißnähte und Schweißnahtenden in den Finite-Elemente-Simulationsmodellen für die auftretenden Stoß- und Nahtformen bei Strukturbauteilen im Automobilbau.
- Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung des lokalen Kraftflusses an der Schweißnaht mit Berücksichtigung der Schweißnahtenden und zur Übertragung auf feine Parametermodelle zur Bestimmung der örtlichen Beanspruchung an der Schweißnaht in der Lebensdauersimulation.
- Entwicklung von geeigneten Parametermodellen für die auftretenden Stoß- und Nahtformen.
- Weiterentwicklung der Konzepte zur Lebensdauerabschätzung. Berücksichtigung von Laserschweißnähten in der Simulation.
- Entwicklung einer Methode zur Berücksichtigung von Schweißnahtimperfektionen im Entwicklungsablauf.
- Validierung mit Versuchsergebnissen und Integration in die Software.

AP3 Weiterentwicklung der Konzepte und Methoden zur Lebensdauerabschätzung zur optimierten Auslegung der Bauteile

- Weiterentwicklung der Methoden und Verfahren zur geeigneten Abbildung des Versagens für die Hauptinhalte Ermüdung und Verschleiß.

- Dies beinhaltet die Lebensdauerabschätzung von anisotropen Werkstoffen und Leichtbauwerkstoffen ebenso wie die Lebensdauerabschätzung von Elastomerbauteilen und die Lebensdauerabschätzung auf Basis nichtlinearer FEM Simulationen.
- Entwicklung von Methoden und Verfahren zur Unterstützung der physischen Erprobung wie Erzeugung von Prüfstandsvorgaben und Schädigungskontrolle sowohl für den Prüfstand als auch bei der Dauerläuferprobung.
- Validierung mit Versuchsergebnissen und Integration in die Software

Die drei Arbeitspakete im Projekt ABIL wurden dabei weitgehend parallel abgearbeitet, sodass die Laufzeit von Oktober 2009 bis Ende März 2012 sehr gut genutzt werden konnte.

3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des **AP1** bildete die Simulation von Klebungen einen Schwerpunkt. Es wurde eine Methode für die Lebensdauervorhersage von geklebten Stahlbauteilen bei zyklischer Beanspruchung entwickelt und als Prototyp in der Software umgesetzt. Wesentliche Punkte dabei waren neben einer netzunabhängigen Modellierung die Entwicklung eines speziellen Lebensdauerkriteriums als auch die Entwicklung eines speziellen Mittelspannungsmodells. Die Ableitung der Methodik und Vorgehensweise erfolgte auf Basis einer Reihe von Versuchsergebnissen mit verschiedenen Probenformen und Belastungen. Aufbauend auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes P593 [4] zur Beschreibung der statischen Festigkeit wurde die Vergleichsspannung nach Schlimmer als Basis für das Versagenskriterium ausgewählt, um u.a. bei hohen schwingenden Beanspruchungen wieder den statischen Grenzwert zu erreichen. Validierungen an Proben und bauteilähnlichen Proben zeigten für relevante Belastungen eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch [5], wenngleich sich auch die Notwendigkeit weiterer Optimierung in Bezug auf die verwendete Vergleichs- bzw. Äquivalentspannung bzw. das eingesetzte Werkstoffmodell ergeben hat. Bild 1 zeigt die Gegenüberstellung an der geklebten bauteilähnlichen T-Profil Probe unter der Last „horizontal“. Es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch erreicht werden, es wurden auch die Stellen mit Versagen im Versuch in der Simulation als die Stellen mit der höchsten Schädigung identifiziert werden.

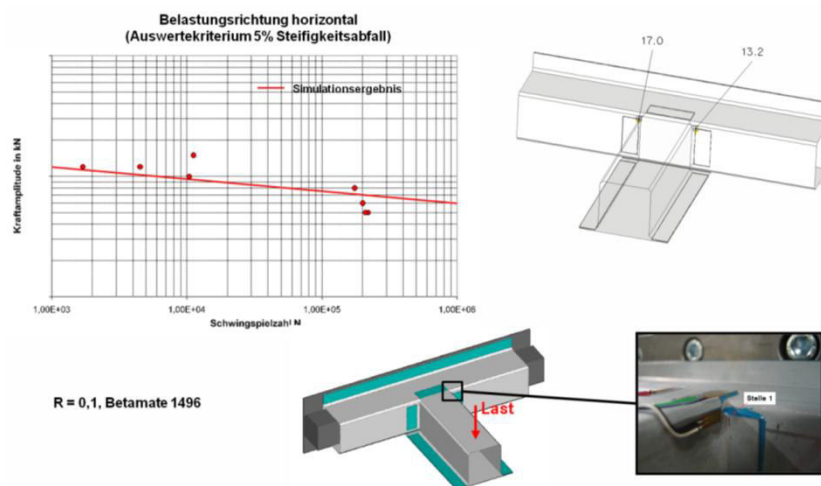


Bild 1 Validierung an bauteilähnlichen Proben, T-Profil Proben, Lastfall „horizontal“

Bei der Erweiterung der Methode auf Beanspruchungskollektive mit variablen Amplituden sowie weiteren Validierungen standen zunächst die Überprüfung der Gültigkeit des verwendeten Lebensdauerkriteriums und des entwickelten speziellen Mittelspannungsmodells zur Abbildung des spezifischen Werkstoffverhaltens des Klebers, sowie die Untersuchung der numerischen Einflüsse im entwickelten Verfahren (Stabilität) anhand lokal auftretender Effekte im Vordergrund. In diesem Zusammenhang wurde auch als Alternative zur bislang verwendeten Vergleichs- bzw. Äquivalentspannung nach Schlimmer die im FOSTA Arbeitskreis zur Berechnung geklebter Stahlbauteile für den Fahrzeugbau betrachtete NSH (Normalspannungshypothese) untersucht. Dabei spielt auch die Wechselwirkung zwischen Vergleichsspannungshypothese und Werkstoffeigenschaften des Klebers eine Rolle, um das Verhalten bei verschiedenen Grundbelastungen wie Zug, Schälung, Torsion, Scherung, etc. geeignet zu beschreiben. Neben der Vergleichsspannung und dem Mittelspannungsmodell wurde auch die Art der Modellierung der Klebung und der verbundenen Schalenstrukturen als wesentlicher Einfluss auf die Qualität der generierten FE-Spannungen an den Klebehexaedern identifiziert, auf denen die nachfolgende Lebensdauerabschätzung basiert.

Eine wesentliche Verbesserung gegenüber den bisher bestehenden netzunabhängigen Klebermodellierungen konnte durch den Ersatz der RBE3-Elemente zur Anbindung der Klebehexaeder an die Schalenstruktur durch eine speziell entwickelte MPC-Anbindung, wie sie auch zur Anbindung der punktförmigen Verbindungen verwendet wird, erreicht werden [6]. Dadurch ergeben sich verbesserte Spannungsverläufe über die Kleberbreite im Vergleich zu den Ergebnissen aus einer detaillierten Solidmodellierung (Bild 2).

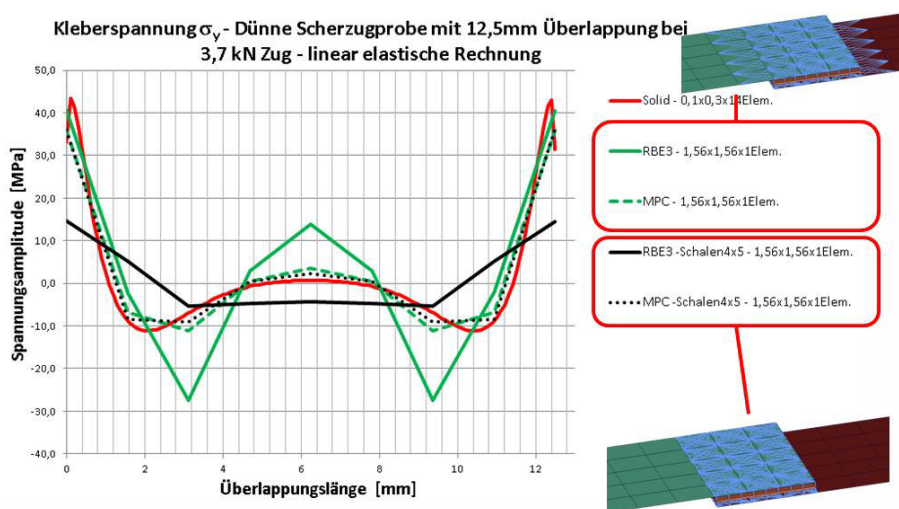


Bild 2: Einfluss der Art der Koppelung des FE-Modell des Klebers an die FE-Struktur der Bauteile

Die automatisierte Generierung der MPC-Anbindung für die Klebeverbindung wurde in der Software implementiert und eine verbesserte Modellierrichtlinie aufgrund aller untersuchter Einflussparameter sowie die Anwendung der entwickelten Methode auf Beanspruchungskollektive abgeleitet.

Im Bereich der virtuellen Betriebsfestigkeitsbeurteilung für punktförmige Verbindungen wurden bereits vorliegende netzunabhängige Vorgehensweisen optimiert, erweitert und validiert bzw. Methoden zur netzunabhängigen Abbildungen von neuen Verbindungstypen im Betriebsfestigkeitsprozess entwickelt. Insbesondere für einschnittige Stanzniet- und Schraubverbindungen wurden analog zu den Schweißpunkten netzunabhängige Ersatzmodelle entwickelt sowie ein Prototyp zur Lebensdauersimulation in der Software implementiert. Dabei werden die aus dem Schalenmodellen abgegriffenen Kräfte auf sehr detaillierte Parametermodelle

der Schraubverbindungen übertragen und daraus Kerbspannungen ermittelt, die in der Lebensdauerabschätzung bewertet werden. Bild 3 zeigt die ermittelte Kerbspannungsverteilung am Parametermodell für eine konkrete Schraubverbindung (links). Die ermittelte kritische Stelle deckt sich sehr gut mit dem Versagensort aus dem Versuch (rechts).

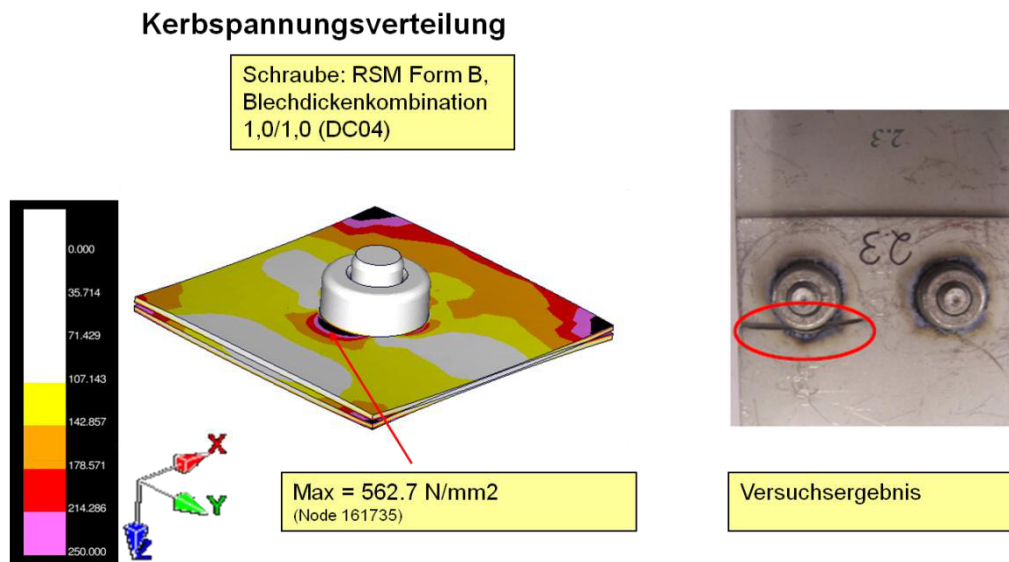


Bild 3 Kerbspannungsverteilung an der Schraubverbindung und Versagensort im Versuch

Für die Verbindungstechniken Stanznieten und Schrauben wurde zudem ein grundlegendes Konzept zur Erweiterung auf dreischnittige Konstellationen erstellt. Von besonderer Bedeutung sind hierbei Stanznietverbindungen, die häufig im Aluminium Leichtbau Verwendung finden. Zur Erstellung von geeigneten Parametermodellen zur Ermittlung der Kerbspannungen wurde hier für den Fügeprozess eine detaillierte Fügesimulation durchgeführt. Das Ergebnis der Fügesimulation ist eine detaillierte Abbildung der verformten Geometrie der Fügestelle. Bild 4 zeigt die verformte Geometrie am Ende des Fügeprozesses für eine 3-Blech Stanznietverbindung inklusive der aus dem Fügeprozess resultierenden Spannungen (links) und ein korrespondierendes Schliffbild aus dem Versuch (rechts). Die simulierte verformte Geometrie stimmt sehr gut mit dem Schliffbild überein.

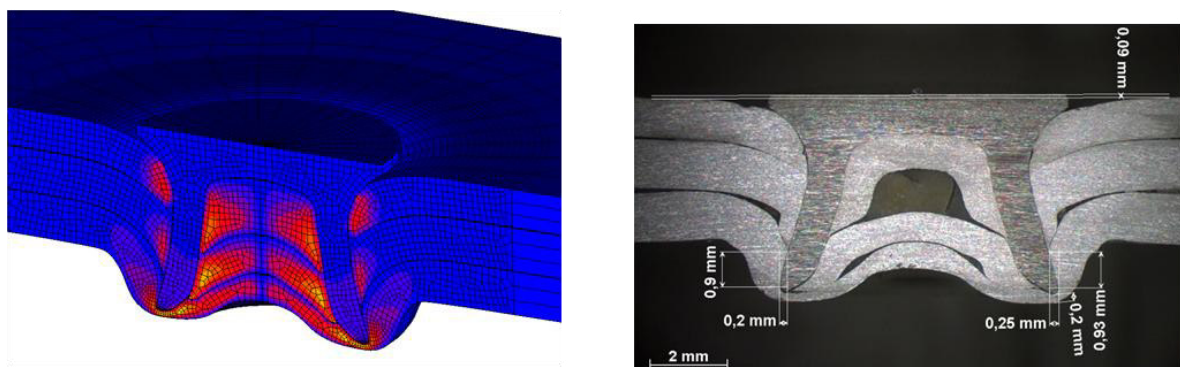


Bild 4 Spannungsverteilung an der verformten Geometrie einer 3-Blech Stanznietverbindung nach der Fügeprozesssimulation und korrespondierendes Schliffbild aus dem Versuch.

Ein weiterer Gegenstand der Untersuchungen war die Validierung der netzunabhängigen Vorgehensweise für die punktförmigen Verbindungen mit Bezug auf Steifigkeit und Lebensdauer ([7],[8]). Dazu war es auch erforderlich eine Reihe von notwendigen Parametermodellen zu erstellen und in die Datenbank für die punktförmigen Verbindungen zu integrieren. Mit den entwickelten Verfahren wurden weitere Validierungen an Proben und bauteilähnlichen Proben durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten größtenteils gute Übereinstimmung zu den Versuchsergebnissen. Die bisher erzielten Ergebnissen demonstrieren, dass zum derzeitigen Zeitpunkt Relativbetrachtungen innerhalb desselben Verbindungstyps erfolgreich durchgeführt werden können. Darüber hinaus wurden auch eine Methode zur Lebensdauerabschätzung von Kombinationen aus Klebeverbindungen und punktförmigen Verbindungen entwickelt. Einen weiteren Schwerpunkt bildete die Simulation der Verbindung von Blech- mit Gussbauteilen. Das entwickelte Verfahren wurde schon teilweise in den Entwicklungsprozess integriert, um erste Lebensdauerbeurteilungen an Gussknoten in der Projektanwendung bereitstellen zu können.

Die durchgeführten Arbeiten im Rahmen des **AP2** hatten Schwerpunkte auf der Entwicklung von netzunabhängigen Methoden zur Abbildung von MIG/MAG Schweißnähten und Lasernähten in den Finite-Elemente-Simulationsmodellen für Strukturbauteile im Automobilbau sowie die Entwicklung eines strukturunabhängigen Verfahrens zur Ermittlung der lokalen Beanspruchungen zur nachfolgenden Lebensdauerbewertung. Dabei wurden die relevanten Stoßformen Y-Naht, Bördelnaht, Stumpfstoß sowie die I-Naht und die Werkstoffgruppen Aluminium und Stahl berücksichtigt. In Kombination mit dem Preprozessor Medina konnte ein effizientes Verfahren zur Realisierung der korrespondierenden Ersatzmodelle in den FEM-Modellen der Bauteile sowie die Kerbspannungsermittlung als Prototyp in der Software implementiert werden.

Der Ablauf für den Anwender wird in Bild 5 am Beispiel einer Schweißnaht an einem Hinterachsträger schematisch dargestellt. Ausgangspunkt sind die unvernetzten, lagerichtig positionierten Geometrien der Einzelteile, aus denen der Hinterachsträger aufgebaut ist (Bereich A im Bild 5). Im Preprozessor werden diese Einzelteile unabhängig voneinander vernetzt. Die Lage und Ausdehnung der Schweißnaht wird aus der Konstruktion übernommen oder vom Anwender mittels einfach zu bedienender Tools im Preprozessor spezifiziert (B). Die Schweißnahtinformation wird anschließend über eine Datei im sogenannten Conn-Format an das entwickelte Einbaumodul in der Betriebsfestigkeitssoftware FEMSITE übergeben und die korrespondierenden netzunabhängigen Schweißnähte automatisiert erzeugt (C).

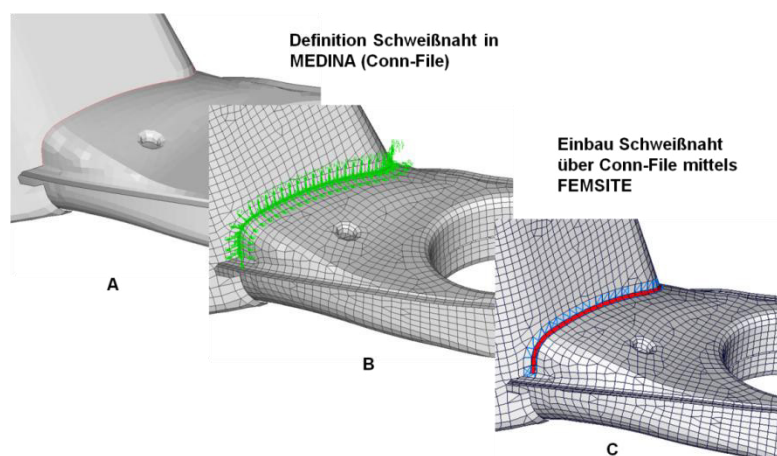


Bild 5 Automatisierter Schweißnahteinbau am Hinterachsträger

Dies ermöglicht nun eine Verkürzung des Prozesses zur Modellierung von Schweißnähten von mehreren Tagen auf einige Minuten. Dieser Prozess des Einbaus der netzunabhängigen Schweißnähte wurde an einer Reihe von Bauteilen umfassend getestet und zeigt sehr stabile, für die Anwendung in Entwicklungsprojekten geeignete Ergebnisse.

Darauf aufbauend erfolgte die Umsetzung der Lebensdauerberechnung für die netzunabhängigen Schweißnähte in der Software FEMSITE und die Ableitung von geeigneten Masterwerkstoffen. Anschließend wurde die Validierung bzw. Weiterentwicklung der entwickelten Methoden und Verfahren zur netzunabhängigen Vernetzung und zur nachfolgenden Lebensdauerberechnung von Schweißnähten durchgeführt.

Der Vergleich der Kerbspannungen aus dem neuen Kraftermittlungsverfahren in Kombination mit erzeugten Parametermodellen mit Kerbspannungen aus Solidmodellen zeigte in Lastfällen normal zur Schweißnaht eine gute Übereinstimmung, bei Lastfällen in Schweißnahtlängsrichtung gibt es einige Abweichungen aufgrund der nicht ausreichenden Qualität der in FE-Simulationen ermittelten Knotenkräfte auf Basis der Schalenmodelle. Die umgesetzte Lebensdauerbewertung für netzunabhängige Schweißnähte an Proben zeigte bei den betrachteten Lastfällen (z.B. Zug, Biegung) gute Ergebnisse. Bei der nachfolgenden Validierung der Lebensdauerabschätzung an Bauteilen konnten die kritischen Stellen größtenteils identifiziert werden, jedoch konnte der Versagenstyp (Nahtwurzelversagen, Nahtübergangsversagen) nicht sicher ermittelt werden bzw. war der Wert der Schädigung teilweise nicht plausibel. Grund dafür ist die identifizierte, nicht ausreichende Qualität der in FE-Simulationen ermittelten Knotenkräfte, insbesondere an Stellen, an denen auch lokal Beanspruchungen in Schweißnahtlängsrichtung eine Rolle spielen. Die verwendeten Modelle und die Vorgehensweise in der FE- Simulation sind nicht in der Lage die benötigten Detailergebnisse zu liefern.

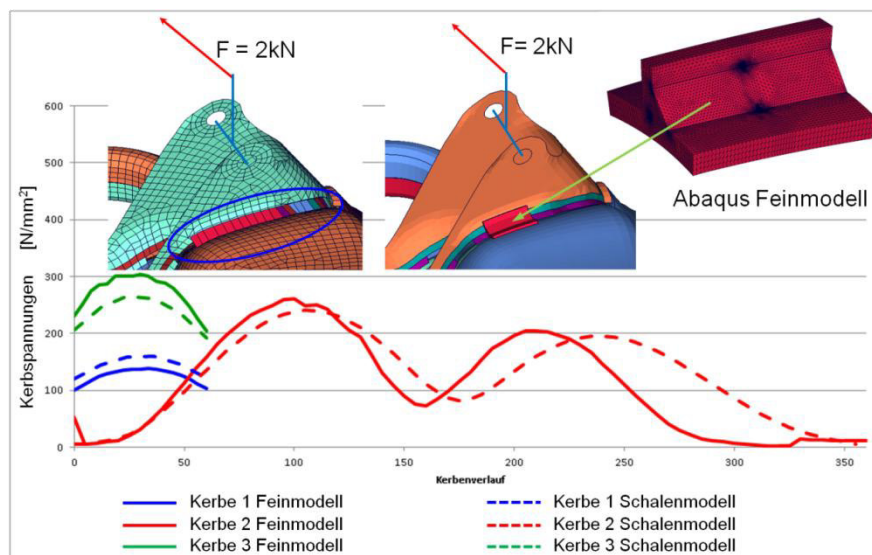


Bild 6 Vergleich der Kerbspannungen aus der verschiebungsbasierenden Methode mit den Ergebnissen aus einer Soliddetailmodellierung am Bauteil.

Deshalb wurde auch ein verschiebungsbasierender Ansatz weiter weiterverfolgt. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass der Verlauf der ermittelten Verschiebungen längs der Schweißnaht qualitativ wesentlich besser (glatter) ist, als der korrespondierende Verlauf der ermittelten Kräfte beim kraftbasierenden Verfahren, insbesondere auch für Beanspruchungen in

Schweißnahtlängsrichtung. Diese Parametrisierung ist nicht allgemein gültig und es gibt darüber hinaus auch noch geometrische Einflussfaktoren. Eine Schwierigkeit stellte dabei auch eine geeignete Steifigkeitsparametrisierung der Ersatzmodelle dar, die mittels einer Optimierung vorgenommen wurde. Die erzielten Ergebnisse zeigten eine prinzipielle Anwendbarkeit des entwickelten Verfahrens auch an komplexen Bauteilen, bei denen bei geeigneter Parametrisierung sehr gute Ergebnisse in punkto Kerbspannungsverläufe und Reihenfolge an den betrachteten Kerben im Vergleich zu den Ergebnissen aus einer detaillierten lokalen Solidmodellierung erreicht werden konnten. Bild 6 zeigt eine der betrachteten Schweißnähte an den betrachteten Bauteilen. Dabei zeigte sich an dieser Stelle eine sehr gute Übereinstimmung und auch die Kerbreihenfolge (kritische Kerbe 3) aus dem Versuch wurde in der Simulation abgebildet.

Aus diesen Gründen wurde schlussendlich die Schädigungsrechnung auf Basis von netzunabhängigen Strukturspannungen implementiert. Damit bleibt der im Projekt erzielte große Effizienzgewinn bei der Erstellung von Gesamtfahrzeugmodellen zur nachfolgenden Steifigkeits- und Festigkeitsbewertung erhalten. Mit dem Ablauf und Verfahren für die Schweißnähte können auch im ersten Schritt brauchbare Aussagen an den Schweißnahtenden erzielt werden. Bei einer ersten Anwendung des entwickelten Verfahrens zur Lebensdauerabschätzung an einem Gesamtfahrzeugmodell konnten die kritischen Stellen am Fahrzeug identifiziert werden. Dabei wurden die Ergebnisse der Schädigungsrechnung auf Basis der netzunabhängigen Modellierung der Schweißnähte mit jenen aus der netzunabhängigen Vernetzung verglichen. Ziel dabei war es mit der netzunabhängigen Vernetzung die ermittelten Versagensstellen (Hotspots) aus der netzunabhängigen Vernetzung, die gut mit den Versuchsergebnissen korrelierten, zu identifizieren. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die ermittelten Stellen gut übereinstimmen (Bild 7).

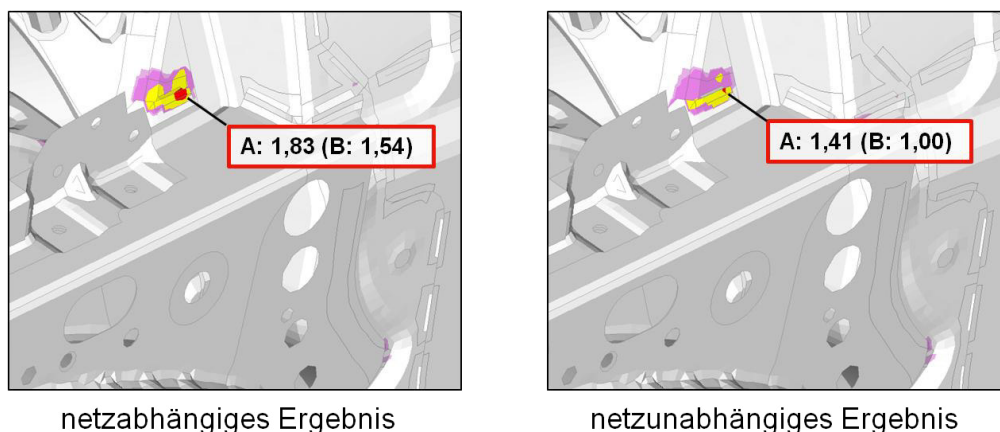


Bild 7 Vergleich der Schädigungen netzunabhängige Modellierung – netzunabhängige Modellierung an der Stelle A am Gesamtfahrzeug (in Klammer das Ergebnis an der symmetrischen Stelle B).

Im **AP3** wurden neue Methoden und Abläufe zur Lebensdauerabschätzung (Ermüdung, Verschleiß, etc.) für ausgewählte Leichtbauwerkstoffe entwickelt und als Prototyp in der Software implementiert. Einen Schwerpunkt bildete dabei zum einen die Entwicklung eines speziellen Verfahrens zur Lebensdauerabschätzung auf Basis nichtlinearer FEM Simulation, wobei derzeit bis zu sechs äußere Belastungen, die auf das Bauteil einwirken, berücksichtigt werden können. Die Tests und Validierungsarbeiten mit der erstellten Software zeigen, dass z.B. Problemstellen an Elastomerbauteilen richtig identifiziert werden konnten.

Weiters wurde ein Konzept zur Berücksichtigung anisotroper Werkstoffe (z.B. glasfaserverstärkte Kunststoffe) in der Lebensdauersimulation entwickelt, sowie das korrespondierende Umsetzungskonzept erarbeitet und anschließend die Umsetzung als Prototyp in der Software FEMSITE durchgeführt. Für die Lebensdauerabschätzung für anisotrope Werkstoffe wurden geeignete FE-Modellierungen mit speziellen Elementtypen für die in den Projekten auftretenden Komponenten aus Kunststoff bzw. Faserverbundstoff erarbeitet, um sowohl das globale Steifigkeitsverhalten als auch lokale Effekte abbilden zu können. Darüber hinaus war es notwendig, eine geeignete Schnittstelle zwischen FE- Solver und Lebensdauersoftware zu schaffen, damit die für die Lebensdauersimulation benötigten Inputdaten wie etwa FE-Spannungen in die Software importiert werden können.

Das bei der Lebensdauersimulation von Bauteilen aus metallischen Werkstoffen verwendete Werkstoffmodell wurde in Bezug auf die Berücksichtigung von Stützwirkungseffekten mit Fokus auf den Druckbereich weiter verfeinert bzw. validiert, um eine genauere Auslegung und eine Hebung von zusätzlichen Gewichtsoptimierungspotenzialen zu ermöglichen.

Einen weiteren Schwerpunkt bildete die Entwicklung einer Methode zur Simulation von endlosfaserverstärkten Kunststoffstrukturen für Hochdruckspeicher sowie deren weiterführende Optimierung [9]. Um den kostenintensiven Einsatz von Composite aus Kohlefaser, z.B. für CNG Hochdruckbehälter zu minimieren, wurde basierend auf einer nichtlinearen FEM-Simulation des Auslegungslastfalles Berstversuch eine Optimierungsmethode für einen Drucktank entwickelt. Mit der ersten Anwendung dieser Methode konnten mehr als 15% Composite eingespart werden (Bild 8).

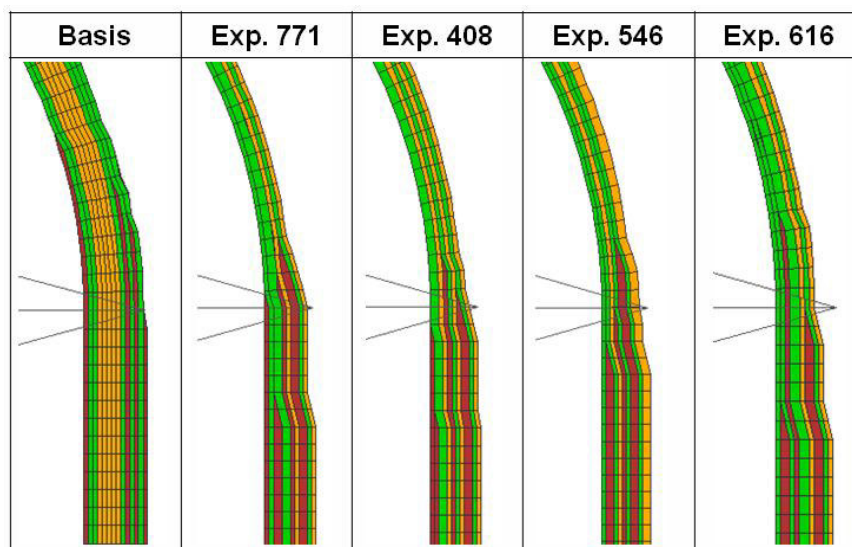


Bild 8 Gegenüberstellung: Basislagenaufbau versus optimierte Lagenaufbauten am Drucktank

Als weiterer Hauptpunkt wurde mit Hinblick auf die Ausschöpfung von Leichtbaupotenzialen ein Verfahren zur Festigkeitsbewertung für den Missbrauchs- und Sondermanöverlastfall Hindernisüberfahrt entwickelt, um den bislang erforderlichen Versuchsaufwand reduzieren zu können. Beim entwickelten Verfahren wird eine Mehrkörpersimulation der zu untersuchenden Gesamtfahrzeugsstruktur für die Hindernisüberfahrt bzw. die Durchfahrt durch ein Schlagloch durchgeführt. Mit den aus dieser Simulation an den Fahrwerks-Koppelstellen resultierenden Last-Zeitverläufen wird nachfolgend aufgrund des dynamischen Vorganges eine Simulation der Gesamtfahrzeugsstruktur mit einem expliziten nichtlinearen FE-Solver (Abaqus) durchgeführt. Auf

diese Weise werden die maximalen lokalen plastischen Verformungen während der Schlaglochüberfahrt ermittelt und daraus die kritischen Stellen identifiziert. Die Ergebnisse der Validierung zeigten, dass mit der entwickelten Methode die in Bezug auf die Festigkeit kritischen Stellen größtenteils identifiziert und diesbezügliche Optimierungspotenziale gehoben werden können. Als weiterer notwendiger Baustein zur optimierten Auslegung der Bauteile wurde eine Methode zur Berücksichtigung von Temperaturverteilungen in der Lebensdauerabschätzung entwickelt, in der Software umgesetzt und validiert.

Für den Bereich der physischen Erprobung der virtuell entwickelten Bauteile wurde ein Konzept zur Schädigungskontrolle und -überwachung (Online Klassierung) entwickelt und implementiert, wodurch die Prüfungen wesentlich effizienter durchgeführt werden können. Darüber hinaus wurde das in der Software FEMSITE bisher eingesetzte Verfahren zur Reduktion von gemessenen Last-Zeitreihen (Raffung) [10] für die Erzeugung von Prüfstandsvorgaben dahingehend erweitert, dass nun auch Schwingspiele in einem gewissen charakteristischen Frequenzbereich der geprüften Bauteile in der Prüfstandsvorgabe erhalten bleiben, ohne die Prüfzeit nennenswert zu verlängern. Bisher konnte in diesen Fällen die Raffung nicht eingesetzt werden, da es zwar möglich war, durch den Einsatz der Raffung die Länge der Kollektive für die Prüfstandsvorgabe deutlich zu reduzieren, aber es nachfolgend am Prüfstand nicht mehr möglich war, diese schwingungsinduzierten Schäden zu reproduzieren. Bild 9 zeigt die Validierung des Verfahrens anhand des Kanals Längsbeschleunigung des verwendeten Prüflings. Im Weiteren wurde das entwickelte und als Prototyp in der Software implementierte Verfahren zur schädigungsbasierenden Prüfstandskontrolle (Online Klassierung) erstmals an konkreten Prüfläufen validiert. Die Ergebnisse zeigten, dass das umgesetzte Verfahren die Erreichung der Schädigung des Vorgabekollektivs gewährleistet und Probleme bei der Prüfung vorzeitig erkannt werden können.

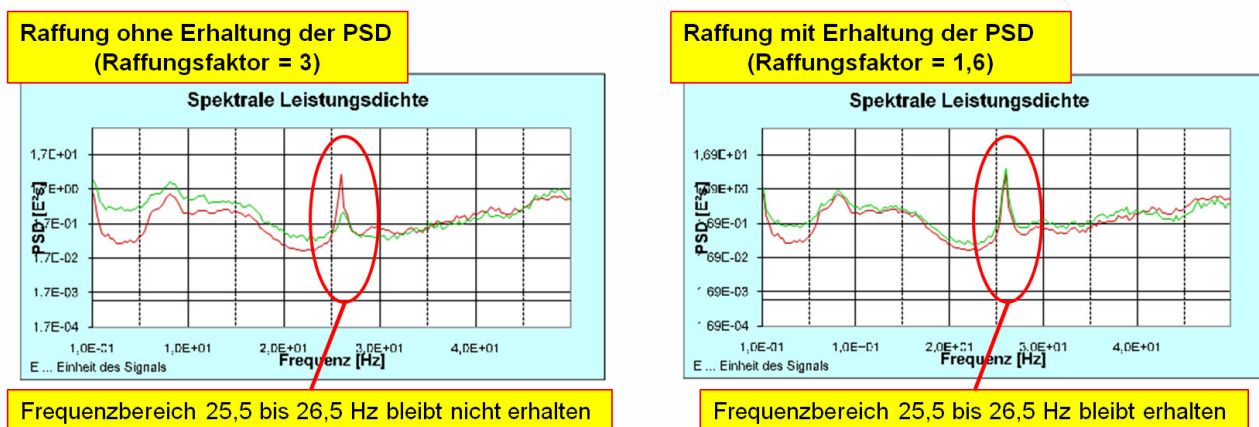


Bild 9 Validierung des erweiterten Verfahrens zur Verkürzung der Kollektive zur Prüfstandsvorgabe (Raffung) unter Erhaltung der charakteristischen Frequenzen des Prüflings. Die spektrale Leistungsdichte (PSD) für den Kanal Längsbeschleunigung zeigt die weitgehende Erhaltung der charakteristischen Frequenzen nach der Raffung (rechts) im Vergleich zum bisherigen Verfahren (links).

Projektteam hat dabei in einem systematischen Ansatz grundlegende Konzepte und Methoden entwickelt, mit denen die wesentlichen Einflüsse auf Steifigkeit, Festigkeit und Betriebsfestigkeit für diese Strukturen, die eingesetzten Werkstoffe und die erforderliche Füge-technik nachvollziehbar aufgezeigt werden können. Ein großer Teil der entwickelten Methoden und Verfahren wurde direkt in der Software als Prototyp implementiert, manche wurden bereits in konkreten Entwicklungsprojekten eingesetzt bzw. projektbegleitend angewendet oder ein Einsatz steht unmittelbar bevor, bei manchen sind noch weitere Schritte und Validierungen für eine nachfolgende Prozessimplementierung zu tun.

Insgesamt können aufgrund der durchgeführten Entwicklungen und Umsetzungen bereits einige Optimierungen der Leichtbaustrukturen in punkto Massenreduktion bei gleichzeitiger Sicherstellung der Betriebsfestigkeit durchgeführt werden sowie auch teilweise aufwändige physische Erprobungen im Entwicklungsprozess entfallen. Durch diese Maßnahme kann der Ressourcenverbrauch bei der Automobilentwicklung reduziert werden. Durch die entwickelten netzunabhängigen Verbindungstechniken, insbesondere die realisierten netzunabhängigen Schweißnähte, können die Aufwände zur Modellierung der Leichtbaustrukturen mit zunehmender Anzahl an Schweißnähten substantiell reduziert werden, somit stehen erste Ergebnisse zu Steifigkeit und Festigkeit künftig früher in der Projektbearbeitung zur Verfügung.

4. Ausblick und Empfehlungen

Aus den vorliegenden Projektergebnissen lassen sich folgende Schwerpunkte weiterer notwendiger Weiterentwicklungen hinsichtlich Methode, Ablauf und Werkzeugen ableiten. Mit den im Rahmen des Projektes durchgeführten Schritten wurde u.a. auch ein wesentlicher Einstieg in die Steifigkeits-, Festigkeits- und Lebensdauerberechnung anisotroper Werkstoffe gefunden. Die Anforderungen angefragter und teilweise auch bereits laufender Entwicklungs- und Vorentwicklungsprojekte zeigen, dass es im Zuge der virtuellen Entwicklung auch notwendig sein wird, nicht nur die Vielzahl der dabei auftretenden Werkstofftypen durch Simulation beurteilen zu können sondern auch deren Kombinationen im Materialverbund (Multimaterialmix). Der Einsatz von anisotropen Werkstoffen (Faserverbundwerkstoffen, etc.) bedingt dabei auch in immer stärkerem Ausmaß die Notwendigkeit nichtlinearer FE-Simulationen mit speziellen FE-Modellen, um für die nachfolgenden Festigkeits- und Lebensdauersimulationen geeignete Eingangsdaten zu erhalten, mit denen das Versagensverhalten in ausreichend genauem Maße beschrieben werden kann. Ebenso von maßgeblicher Bedeutung ist es, die dabei eingesetzten, erforderlichen Verbindungstechniken in gleicher Weise beherrschen zu können, wie das derzeit bei den metallischen Werkstoffen schon größtenteils möglich ist. Dies betrifft aus jetziger Sicht vor allem spezielle Klebe-, aber auch u.a. Stanzniet- und Schraubverbindungen, etc. Darüber hinaus ist auch die Erweiterung der Methoden, Abläufe und Werkzeuge auf neue notwendige Leichtbauwerkstoffe in Stahl, Aluminium und andere Metalle, deren Verbund in Multimaterialmix sowie die Ableitung der dafür notwendigen Verbindungstechnik erforderlich.

5. Literaturverzeichnis

[1] Rupprechter, F.; Mayer, A.; et al: FEMSITE Benutzerhandbuch, MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik 2009.

- [2] Ruprechter, F.; Kepplinger, G.; Dölle, N.; Martin, M.; Ageorges, C.: Lebensdauerabschätzung von Stanznietverbindungen in der Karosserieentwicklung auf der Basis von lokalen Beanspruchungen und der netzunabhängigen Vernetzung, VDI Kongress Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Würzburg 2006.
- [3] Ruprechter, F.: Simulation des Betriebsfestigkeitsverhaltens von Schweißpunkten in der PKW-Entwicklung, 1. Konferenz für angewandte Optimierung in der virtuellen Produktentwicklung, Karlsruhe 2006.
- [4] Schlimmer, M.: Abschlussbericht zu P593 „Methodenentwicklung zur Berechnung geklebter Stahlbauteile für den Fahrzeugbau“, 2005.
- [5] Ruprechter, F.; Ruf, A.; Barenbrock, D.; Hofer, M.; Kepplinger, G.; Nieß, D.: Lebensdauerabschätzung von geklebten Stahlbauteilen, Vortrag und Veröffentlichung im Rahmen des internationalen Kongresses „SIMVEC – Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau 2010“, 16. – 17. November 2010, Baden-Baden, Deutschland.
- [6] Ruprechter, 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.
- [7] Ruprechter, F.; Kepplinger, G.; Hofer, M.: Simulation punktförmiger Fügestellen in der Karosserieentwicklung auf Basis lokaler Beanspruchungen und der strukturunabhängigen Vernetzung, Vortrag und Veröffentlichung im Rahmen des NAFEMS Seminars „Verbindungstechnische Aspekte bei FE-Berechnungen - Simulation von Schweiß-, Klebe-, Niet- und Schraubverbindungen“, 28. – 29. April 2010, Wiesbaden, Deutschland.
- [8] Ruprechter, 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.
- [9] Kepplinger, G.; Novak, P.; Schmalhofer, F.; Ruprechter, F.: Methode zur rechnergestützten Strukturoptimierung von faserverstärkten Hochdruckspeichern auf der Basis von Parameteroptimierung gekoppelt mit nichtlinearer FEM-Berechnung, Vortrag und Veröffentlichung im Rahmen des internationalen Kongresses „SIMVEC – Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau 2010“, 16. – 17. November 2010, Baden-Baden, Deutschland.
- [10] Hofer, M.; Niess, D.; Ruprechter, F.; Lindtner, W.: Generierung von optimierten Betriebsfestigkeitsprüfprogrammen für den Betriebslastennachfahrversuch, DVM-Bericht 131 „Leichtbau und Betriebsfestigkeit“, München 2004.

IMPRESSUM

Verfasser

MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG
Franz Ruprechter
Liebenauer Hauptstrasse 317, A-8041 Graz
Tel: +43/664/8840-2005
Fax: +43/316/404-2430
E-Mail: franz.ruprechter@magnasteyr.com
Web: <http://www.magnasteyr.com>

M.J.L. Technische Software GmbH
Piccardigasse 18, A 8055 Graz
Tel: +43/316/242561-10
E-Mail: m.leipold@mjl.at

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