

Schlussbericht

zum Vorhaben

Bekanntmachung:

„Hybride Materialien – Neue Möglichkeiten,
Neue Marktpotenziale (HyMat)“

Thema:

**TailoredJoints – Methoden und Auslegungskriterien von
laserbasierten Kunststoff-Metall-Hybridverbindungen für
maßgeschneiderte Fügeverbindungen**

Zuwendungsempfänger:

**EDAG Engineering GmbH
Kreuzberger Ring 40
65205 Wiesbaden**

Förderkennzeichen:

03XP0277C

Laufzeit:

Bewilligungszeitraum:

01.04.2020 bis 30.09.2022

Bewilligte Projektverlängerung:

01.10.2022 bis 31.12.2022

Monat der Erstellung:

06/2023

Projektleiter: **Michael Begert**

Co-Autoren: **Sascha Engel
Jan Förster**

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund der Bekanntmachung „Hybride Materialien – Neue Möglichkeiten, Neue Marktpotenziale (HyMat)“ durchgeführt und durch den Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich, PtJ unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1. Ziele

Ziel des Verbundprojektes „TailoredJoints“ war die Methodenentwicklung und die Definition von Auslegungskriterien, die den Einsatz von maßgeschneiderten Fügeverbindungen von Faserverbundwerkstoffen mit thermoplastischer Matrix und Metallen in großserientauglichem Maßstab ermöglichen.

Für EDAG als Ingenieurdienstleister für die globale Mobilitätsindustrie ist es von strategisch wichtiger Bedeutung, sich mit innovativen Technologien und Auslegungsmethoden zu befassen, um für eine sich verändernde Bauweise und Anforderungen neuer Fahrzeuggenerationen und Mobilitätskonzepte sicher aufgestellt zu sein.

Deshalb betreibt das Unternehmen Kompetenzzentren für wegweisende Zukunftstechnologien der Automobilbranche: Leichtbau im Rahmen nachhaltiger Fahrzeugentwicklung, alternative Antriebe (u.a. Elektromobilität), Integrale Sicherheit sowie Digitalisierung. Um sich auf diesem hart umkämpften Markt behaupten zu können, muss EDAG für die Lösung komplexer Problemstellungen in der Entwicklung effiziente und bezahlbare Technologien und Methoden bereithalten.

Ziel für EDAG ist es mit der Durchführung dieses Forschungsvorhabens für mögliche Anwendungen von innovativen, energieeffizienten und bezahlbaren Leichtbaulösungen und für die Entwicklung schnelle, sichere Auslegungsmethoden vorliegen zu haben. Gerade die Mischbauweisen und die damit verbundenen hybriden Verbindungstechnologien spielen für Leichtbauansätze zukünftiger Fahrzeugkonzepte eine signifikante Rolle.

Insbesondere der Verzicht auf zusätzliche Fügeelemente und –werkstoffe machen diese Technologie attraktiv hinsichtlich Zeit- und Materialeinsparung im Füge- und damit im Herstellprozess. Darüber hinaus setzt die Industrie Lösungskonzepte für Nachhaltigkeitsansätze zu den zu verbauenden Einzelkomponenten und Baugruppen voraus, was stetig wachsende Forderungen nach Recyclingmöglichkeiten mit sich bringt. Das Ziel zum Erreichen einer 100%-Recyclingrate durch sortenreines Trennen der Einzelkomponenten ist hierfür eine Grundvoraussetzung. Somit ist die thermoplastbasierende TailoredJoints-Fügemethode eine interessante Technologie für einen Einsatz in der Großserie.

EDAG arbeitet deshalb kontinuierlich im Rahmen von Forschungs- und Innovationsprojekten an Zukunftstechnologien in Kooperation mit spezifischen Partnerunternehmen und Forschungsinstituten. Die Realisierung von hybridischen Leichtbaulösungen erfordert ein tiefes Verständnis für die CAE-gestützte Auslegung hybridischer Fügemethoden. Mit der Durchführung dieses Forschungsvorhabens erwartete EDAG eine Erweiterung der simulationsgestützten Auslegungsmethoden, hinsichtlich struktureller Bauteilanforderungen, der Zuverlässigkeit der Fügemethode im Hinblick einer lastfallgerechten Auslegung und unter Berücksichtigung der Werkstoffpaarungen sowie der Kosteneffizienz in der Serienproduktion. Weiterhin sollte mit der Wahl der Anwendung die physikalischen, strukturellen Grenzen für diese Fügetechnologie erforscht werden. Deshalb entschied sich das Forschungskonsortium für ein hochstrukturelles, crashrelevantes Demonstratorbauteil, was hier in Form einer Momentabstützung für eine Sitzhöhenverstellung an die Struktur eines Fahrzeugsitzes dargestellt wurde. Dabei durchlaufen die Abstützmomente des Antriebsmotors das Kunststoff-Motorgehäuse (Funktionsintegration) des Sitzhöhenverstellantriebes und werden über die Kunststoff-Metall-Direktfügestelle (TailoredJoints) in den Sitzstrukturrahmen eingeleitet. Somit wird diese Konstruktion einer unmittelbaren Crashbelastung ausgesetzt.

Nun erwartete EDAG als Hauptziel durch das TailoredJoints-Projekt, eine bessere Zugänglichkeit zur Auslegung solcher hybridisch gefügten Komponenten im CAE-gestützten Entwicklungsprozess. Insbesondere steht bei der Methodenentwicklung, neben der strukturellen Bauteilauslegung und der Zuverlässigkeitsvorhersage der Fügestellen, auch eine schnelle, sichere und möglichst realistische Berechnung im Vordergrund. Bei der Vielzahl der durch die OEM-Kunden geforderten Lastfallbetrachtungen sieht EDAG hier ein enormes Zeiteinsparungs- und damit Kostenpotential in der Serienentwicklung, sodass diese Technologie und die zu erarbeitenden Prozesse/Methoden einen Wettbewerbsvorteil am Markt darstellen.

Die nachfolgenden Teilziele sollten im Verbundprojekt für EDAG erreicht werden:

- Entwicklung von Methoden und Auslegungskriterien, um den Einsatz maßgeschneiderter Fügeverbindungen durch lokal an den Lastfall angepasste Festigkeitseigenschaften zu ermöglichen. Dies soll weitere Möglichkeiten zur Funktionsintegration durch die Einstellbarkeit der Verbindung (Sollbruch) eröffnen.
- Gewichtsreduktion im Vergleich zu konventionellen Fügeverfahren durch Verzicht auf zusätzliche Werkstoffe (z.B. Schrauben, Niete, Klebstoffe) bei gleichzeitigem Erhalt der Festigkeit.

- FEM-Modell als Ersatzmodell der mikrostrukturieren Verbindung auf Meso- und Makro-Ebene und Konstruktionsleitfaden sowie Normentwurf zur Unterstützung der konstruktiven Auslegung und Versagensvorhersage der Verbindungstechnologie.
- Verkürzung von Iterations-/Berechnungszeit durch Reduktion des Simulationsaufwandes durch die Verwendung von Ersatzmodellen für die Fügezone
- Argument für einen Nachhaltigkeitsansatz in der Automobilindustrie: Eine 100%-Recyclingrate von faserverstärkten Spritzgusswerkstoffen und thermoplastischen FVK, da der Verzicht auf Zusatzstoffe nach Beendigung des Lebenszyklus des Bauteils die sortenreine Trennung beider Komponenten (Kunststoff oder FVK und Metall) durch lokales Aufschmelzen und Lösen der Verbindung schnell und kosteneffizient ermöglicht.
- Entwicklung von effizienten und bezahlbaren Lösungen für komplexe Anforderungen in der Automobilindustrie.
- Stärkung von hybriden Verbindungstechnologien durch Vorantreiben der Auslegungsgüte, Methodenkompetenz und Einsparung von Fügeelementen- und Werkstoffen, um Konstruktionsansätze mittels Mischbauweise für zukünftige Fahrzeugkonzepte attraktiver zu gestalten.
- Erweiterung des Verständnisses und Aufbau von weiterem Know-How in der CAE-gestützten Auslegung von hybriden Fügemethoden und einer Erweiterung der Methodenkompetenz hinsichtlich strukturellen Bauteilanforderungen und der Zuverlässigkeit der Fügemethode im Hinblick einer lastfallgerechten Auslegung.
- Bessere Zugänglichkeit zur Auslegung hybrid gefügter Komponenten im CAE-gestützten Entwicklungsprozess, durch Methodenentwicklung und daraus folgend einer schnellen, sicheren und möglichst realistischen Simulation. (Konstruktionsleitfaden)
- Abgleich der Simulationsmodelle durch mechanische Prüfung der hybriden Fügeverbindung, um die Aussagegenauigkeit der entwickelten Modelle und Methoden zu quantifizieren und zu verbessern. (virtuelle Validierung der Auslegungsmethode)
- Entwicklung neuer Prüfkfigurationen zur Absicherung der Eigenschaften der Fügeverbindung sowie Kennwertgenerierung zur Erstellung von CAE-Materialmodellen.
- Ansatz für eine Standardisierung der Auslegungsmethode derartiger hybridischen Verbindungen. (Normentwurf)

2. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Verbundprojektes „TailoredJoints“ übernimmt EDAG folgende Aufgabenstellungen bzw. wirkt im Rahmen der Partnerzusammenarbeit mit, die im Gesamtprojektplan über die jeweiligen Arbeitspakete (AP) definiert wurden:

AP 1 „Lastenheft und Analyse der Einflussgrößen für die Hybridverbindung“

- Mitwirkung für die Erstellung eines Lastenheftes bezogen auf die gewählte Demonstratoranwendung: hybridisch gefügtes Motor-Getriebegehäuses für die Höhenverstellung eines Pkw-Sitzes.
- Anforderungsdefinition an die hybridische Fügestelle auf Bauteilebene in Abstimmung des Partners für die Endanwendung (hier Partner Faurecia), wie z.B. Belastungsarten und Ableitung von Ersatzlastfällen, Funktionen, Erforderliche Verbundfestigkeiten.
- Mitwirkung bei der Definition der Einflussgrößen im Spritzgussfertigungsprozess (z.B. Massen-, Werkzeugtemperatur, Druckverlauf, Spritzgeschwindigkeit) unter Berücksichtigung der Einflussgrößen aus dem Lasermikrostrukturierungsprozess (durch Partner ILT)

AP 2 „Entwicklung einer Konstruktionsmethode zur Auslegung und Dimensionierung von Hybridbauteilen“

- Anforderungsermittlung bzgl. einzusetzender Software sowie Definition der Schnittstellen mit Beschreibung der jeweiligen Übergabeparameter als generischer Entwicklungs-PEP (AP 2.1).
- Mitwirkung in der Ableitung von Auslegungskriterien unter Berücksichtigung der Anforderungsparameter aus AP1 und Definition von Einflussparametern aus dem Herstellprozess, für die Erstellung eines Versuchsplans auf Basis einer DoE (Design of Experiment).
- Ableitung von Prüfkörperkonzepten für Kennwerterfassung mit reduziertem Prüfumfang in AP 3.5, welche wiederum die Grundlage für die Materialmodellierung als Grundlage der linearen Beschreibungsmodelle der Auslegungskriterien (z.B. Festigkeit) bildet. (AP 2.2)
- Mitwirkung in der Entwicklung einer Auslegungsmethode, welche die unterschiedliche Detailtiefen entsprechend dem aktuellen Entwicklungsstand abbildet. Dabei müssen die Haupteinflussparameter als Zielgrößen für die Eigenschaften der Fügeverbindung abgeleitet werden, wie z.B. Steifigkeit, Festigkeit, usw.. Des Weiteren werden hier die Auswirkungen von externen Einflüssen (Lastfall, Grobgestalt, etc.) sowie der Parameter der Fügeverbindung aus AP 2.2 auf diese Zielgrößen modelliert. (AP 2.3)
- Mitwirkung in der Ableitung eines Konstruktionsleitfadens zur Unterstützung der praktischen Vorgehensweise für die konstruktive Auslegung der Fügegeometrie. Hierbei sollen die Erkenntnisse aus den APs 1-4 einfließen, um so zu einer möglichst maßgeschneiderten Auslegung der hybridischen Verbindung für die verschiedenen Randbedingungen zu führen und somit den höchsten Leichtbaugrad zu erreichen. (AP 2.4)

AP 3 „Untersuchung der Einflussgrößen auf die Verbindungseigenschaften“

- Konstruktion und Bau von Prüf- und Probenfixierungsvorrichtungen, die jeweils unterschiedlichen lastfallgerechten Krafteinleitungen in die Probenkörpergeometrie ermöglichen. (AP 3.5)
- Durchführung von unterschiedlichen Prüfungen an der hergeleiteten Probenkörpergeometrie zur Kennwertermittlung der in AP1 und 2 definierten Einzellastfälle. Aufbereitung der ermittelten Kennwerte für die Herleitung der Materialmodelle, die die Grundlage für eine simulationsgestützte Auslegung und Validierung der hybridischen Fügezone dienen. (AP 3.5)

AP 4 „Erstellung einer Simulation (Modellentwicklung) zur Berechnung von laserbasierten Hybridverbindungen“

- Entwicklung eines Makromodells, welches die Grundlage für die Detailauslegung einer Konstruktion und deren Verbindung darstellt. Das Makromodell beschreibt das Verhalten der Fügezone auf Bauteilebene und stellt das Modell für die praktische Auslegung der Fügezone für den Bauteilkonstrukteur dar. Dieses Modell stützt sich auf das in AP 4.1 entwickelte Mikromodell (CIKONI), welches über das Verschmieren der Eigenschaften den Input für das Mesomodell liefert. Das Mesomodell stellt zum einen ein Austauschformat zwischen Mikro- und Makromodell dar und kann ergänzend genutzt werden, um Input für die Laserstruktur- und Spritzparametervariationen zu generieren. Das Makromodell soll dabei zur Anwendung in bestehender FEM-Software entwickelt werden. Präferiert wird hierfür die Darstellung der Fügeverbindung über ein Materialmodell, welches dadurch kompatibel mit allen gängigen Programmen ist (Übertragbarkeit auch auf andere Anwendungsbeispiele). (AP4.2)
- Mitwirkung zur Validierung des Mikro- und Mesomodells anhand der Prüfergebnisse aus AP 3.5. Die einzelnen Lastfälle und Prüfungsszenarien aus dem Versuchsplan (AP 2.2), werden mit Hilfe des Mikromodells simuliert (CIKONI) und Abweichungen zu den experimentellen Untersuchungen

(AP 3.5) weitergehend überprüft werden. Anpassen des entwickelten Mikromodells an die realen Kennwerte, um Schärfung des daraus abgeleiteten Makromodells zu erzielen. (AP 4.3)

- Die Validierung des Makromodells erfolgt analog zu AP 4.3 und wird mithilfe der Prüfkennwerte aus AP 3.5 validiert. Hierbei wird ein Fokus auf die Genauigkeit des Modells gelegt. Um eine einfache Anwendbarkeit zu gewährleisten und gleichzeitig Rechenzeiten möglichst gering zu halten, soll durch die Validierung sichergestellt werden, dass vorgenommene Vereinfachungen trotzdem noch die notwendige Genauigkeit zur Auslegung der Fügeverbindung zulassen. Hierbei gilt es einen möglichst optimalen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aufwand zu ermöglichen. (AP 4.4)

AP 5 „Übertragung der Ergebnisse auf die Herstellung eines Demonstratorbauteils“

- Mitwirkung zur Entwicklung Grobgestalt Prozessdemonstrator (Faurecia) auf Basis der Ergebnisse aus den vorherigen Arbeitspaketen und dem Makromodell aus AP 4.4). (AP 5.1)

Hier kam es zur Abweichung des ursprünglichen Projektplans: Durch zeitlichen Verzug in der Herstellung der Laborproben (Gubesch) für die Kennwertermittlung zur Materialmodellierung lag das Makromodell zum Zeitpunkt der Demonstratorentwicklung noch nicht in vollständig validierter Form vor. Die Ergebnisse der Demonstratorsimulationen in der Auslegungsphase waren daher mit einer möglichen Unschärfe zu deuten.

- Mitwirkung zur Entwicklung Feingestalt Prozessdemonstrator (Faurecia) auf Basis des Makromodells aus AP 4.4). (AP 5.2)

Hier kam es zur Abweichung des ursprünglichen Projektplans: Durch zeitlichen Verzug in der Herstellung der Laborproben (Gubesch) für die Kennwertermittlung zur Materialmodellierung lag das Makromodell zum Zeitpunkt der Demonstratorentwicklung noch nicht in vollständig validierter Form vor. Die Ergebnisse der Demonstratorsimulationen in der Auslegungsphase waren daher mit einer möglichen Unschärfe zu deuten.

- Mitwirkung zur Prüfung des Demonstrators (Faurecia). Interpretation der Prüfergebnisse und Einstufung im Vergleich zu den gewonnenen Erkenntnissen der vorherigen Prüfungen und Simulationen.
- Im Rahmen einer Potentialanalyse fließen neben der Life Cycle Assessment Analyse (LCA) und Lebenszykluskosten (LCC) (durch MSE), die technologischen Potentiale aus den physikalischen (Faurecia) und virtuellen (EDAG) Validierungsergebnissen aus AP 5.5 ein. (AP 5.6)

AP 6 „Entwicklung eines Normvorschlags zur Unterstützung der industriellen Anwendung der Verbindungstechnik“

- Mitwirkung an der Festlegung eines Normformats (MSE + alle). (AP 6.1)
- Mitwirkung an der Gremienarbeit mit Stakeholdern (MSE + alle). (AP 6.2)
- Mitwirkung an der Verschriftlichung des Normvorschlags (MSE + alle). (AP 6.3)

Ergebnis hierzu siehe Entwurf DIN SPEC des Partners MSE.

3. Stand der Technik

Die modernen Fahrzeug-Bauweisen in der Automobilindustrie unter Berücksichtigung von Leichtbauansprüchen sowie Kosteneffizienz führt in Anwendungen der Mobilitätsindustrie zum Einsatz von unterschiedlichen Materialien. Diese Multimaterialbauweise nutzt die lokal jeweiligen optimalen Werkstoffeigenschaften. Der an die lokalen Belastungen angepasste Einsatz von Kunststoff und Metall eröffnet neue Wege für eine Gewichtsoptimierung. Während Metalle eine hohe Festigkeit und ein duktils Bruchverhalten aufweisen, bestehen die Hauptvorteile der Kunststoffe in ihren herausragenden gewichtsspezifischen Eigenschaften und in der Möglichkeit zur Herstellung komplexer Geometrien. Dies trifft aufgrund der wirtschaftlichen und prozesstechnisch günstigen Verarbeitbarkeit sowie Recyclingfähigkeit insbesondere auf Thermoplaste zu, weshalb diese für viele Anwendungen im Fokus der Entwicklung stehen. Die Füge-technik ist dabei entscheidend, um die Materialeigenschaften von Metall und Thermoplast im Verbund optimal nutzen zu können und eine hohe technische und wirtschaftliche Effizienz der Struktur bei möglichst niedrigen Fertigungskosten zu erzielen.

Üblicherweise werden heute solche hybride Fügeverbindungen unter Anwendung separater Fügeelemente realisiert. Auf der einen Seite kommen hier mechanische Fügeelemente, wie Schrauben, Nieten, Clips usw. oder durch die Anwendung von Klebstoffen als verbindende dritte Komponente zum Einsatz.

Jede dieser Fügemethoden hat ihre Vor- und Nachteile. So bilden mechanische Fügeelemente meist punktuelle Krafteinleitungen zwischen den jeweiligen hybriden Materialien, was im Fall einer Kunststoff-Metallverbindungen oft zu unerwünschter Ausbildung von Spannungsspitzen führt und schlimmstenfalls zu einem Versagen des schwächeren Werkstoffpartners. Das wiederum versucht der Konstrukteur über das Einbringen von Formschlüssigkeit in der Fügezone weitgehend zu kompensieren, was allerdings bei komplexen Geometrien nicht immer möglich ist. Deshalb weicht man hier oft auf eine klebtechnische Verbindung aus, um so die einlaufenden Kräfte über einen größeren Flächenbereich zu verteilen und dadurch die o.g. Spannungsspitzen zu reduzieren. Beide Fügemethoden erfordern aber immer den Einsatz von dritten (Füge-) Elementen bzw. Materialien (Klebstoffe), um eine hinreichende mechanische Verbindung zwischen den hybridischen Werkstoffpartnern erzeugen zu können. Weiter sind diese Füge-technologien immer mit einem separaten Fügeschritt im Herstellprozess einer Komponente verbunden, der jeweils mit einem Zeit- und Kostenfaktor verbunden ist. Insbesondere ist bei einer Klebstoffverbindung ein Zeitfenster für die Vernetzung oder Aushärtung der Klebstoffe in den Prozess zu integrieren, was häufig zusätzliche maschinelle Aufwendungen (z. B. Aushärtpaternoster, Aushärtöfen usw.) für den Gesamtprozess bedeutet.

Ein weiterer Nachteil mechanischer Fügemethoden zeigt sich in der Forderung nach nachhaltigen Lösungen für die Fahrzeugentwicklung hinsichtlich Recycling- und Zerlegungsmöglichkeiten der hybridischen Baukomponente am Ende eines Fahrzeuglebens. Hier ist es bei der Anwendung von mechanischen Fügeelementen meist nur aufwändig (z. B. Schrauben) oder gar nicht (z. B. Nieten) möglich die Fügestelle zu lösen und die entsprechenden Einzelwerkstoffe inkl. der eingebrachten Fügeelemente stoffrein zu separieren.

Bei Klebstoffverbindungen, die größtenteils auf Reaktivsystemen (im Gegensatz zu Schmelzklebstoffen) beruhen, ist eine stoffreine Separation technisch meist gar nicht mehr möglich, so dass hier hybride Abfälle erzeugt werden und sich so einem stofflichen Recyclingkreislauf entziehen. D.h. hier ist nur noch ein thermisches Recycling durch Verbrennen dieser Abfälle denkbar, was den Forderungen einer modernen nachhaltigen Fahrzeugentwicklung nicht mehr entspricht.

Hier setzt die hybridische Füge-technologie an, die im Rahmen des Verbundprojektes TailoredJoints erforscht werden sollte. Die Methode des in einen Spritzgussprozess direkt integrierten Direktfügens, wie es im TailoredJoints-Projekt angewendet wird, ist für Anwendungen der Automobilindustrie mit einem sehr großen Stückzahlsszenario äußerst interessant. Spritzgussprozesse sind heute schnell und sehr gut für Großserienfertigungen geeignet. Das wiederum kann einen direkten Zeit- und Kosteneinspareffekt mit sich bringen und so als Einsparpotential für eine kosteneffiziente Herstellung von Hybridkomponenten angesehen werden.

Während die Fügemethoden unter Anwendung von mechanischen Fügeelementen und Klebstoffsystemen weitgehend erforscht sind und etablierte Auslegungsmethoden in der simulationsgestützten Bauteilentwicklung vorliegen, liegen für das vorliegende Direktfügeverfahren noch keine bewährten simulationsgestützten Auslegungsmethoden vor, um eine Fügefläche effizient und zuverlässig zu gestalten.

Die EDAG Engineering GmbH arbeitet kontinuierlich im Rahmen von Forschungs- und Innovationsprojekten an Zukunftstechnologien in Kooperation mit spezifischen Partnerunternehmen und Forschungsinstituten. So wurden in diesem Zusammenhang fachspezifische Simulationserfahrungen durch folgende vorangegangene Projekte im Bereich „Materialeinflüsse auf Produktionsprozesse“ im Fokus Hybridisierung unter Verwendung von Composites gesammelt, auf die das TailoredJoints-Projekt direkt aufsetzen sollte:

- "MAI Hiras und Handle" - Entwicklung einer Motorrad-Hinterachsgabel aus verschiedenen Verbundwerkstoffen / Typen; Berücksichtigung der Automatisierung sowie des Herstellungsprozesses. Erfahrung und selektive Nutzung von typischen Anwendungsfällen. BMBF 100211347
- "ULWAK": (deutsches nationales Projekt) - "UltraLeichten WAgenKasten" Leichtbau durch Mehrstoffdesign von Schienenfahrzeugen - Wege zu einer ultraleichten Karosserie, EDAG-Plan "Organoblätter", BMBF 13N11550.
- "MultiKab" - "MULTI Materialbauweisen für gewichts- und kostenoptimierte Nutzfahrzeug-KABinen" Mehrstoffsysteme für gewichts- und kostenoptimierte Nutzfahrzeugkabinenstrukturen), BMBF 03X3036
- „TRoPHY I“, - "Thermoplastische, Rollgeformte Profile in Hybridbauweise“, Open Hybrid LabFactory 03FO10603A
- „HybCar“, - "Technologien zur effizienten Herstellung von hybriden CFK/Metall-Strukturbauteilen im Automobilbereich“, STMWI 07 03/683 62/220/18/52/19/53/20/54/21
- „FlexHyJoin“, - "Flexible production cell for Hybrid Joining“, Laser- und Induktionsbasiertes Direktfügen von thermoplastischen Composites mit Metallen“, EU FoF-12-2015 EC-GA 677625
- „ITEA3 - VMAP“ - "VMAP – Ein neuer Schnittstellenstandard für die Integrierte virtuelle Materialmodellierung im produzierenden Gewerbe“, ITEA3 BMBF01IS17025E
- „RegScha“ - "Naturfaserverstärkte Biokunststoffverbunde und innovative Herstellungsverfahren für Leichtbau-Hybridformteile mit hohen Struktur- und Sicherheitsanforderungen“, BMEL /FNR 100333776

EDAG verspricht sich von dem Projekt eine Methodenentwicklung und nach Möglichkeit eine Standardisierung, um die o.g. Fügemethode in ihre Standardentwicklungsprozesse zu integrieren und effizient im Kundengeschäft zu nutzen.

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Bearbeitung der Arbeitspakete AP 2.4 „Konstruktionsrichtlinie ableiten“ sowie AP 6.2 „Entwicklung eines Normvorschlags - Gremienarbeit mit Stakeholdern“ wurden die Unternehmen Fa. KIST + ESCHERICH GmbH, Dresden und INNOVENT e.V. Technologieentwicklung Jena in Workshoparbeiten eingebunden. KIST + ESCHERICH ist auf dem Gebiet der hybriden Füge-technik für Kunststoff-/Metall-Direktfügeverbindungen tätig und konnte sowohl für die Entwicklung des Konstruktionsleitfadens (AP 2.4) als auch für die Erstellung des Normenvorschlags (AP 6.2) wertvolle Hinweise, Anforderungen und Machbarkeitsgrenzen mit dem Hintergrund der industriellen Erfahrung beisteuern. INNOVENT e.V. konnte zu den o.g. Arbeitspaketen Erkenntnisse aus vergleichbaren Forschungsprojekten bzgl. hybrider Fügeverbindungen einbringen. Für beide Arbeitspakete konnten so realistische Randbedingungen definiert werden. Auch in der finalen Bewertung der als Ergebnisse erzeugten Dokumente „Konstruktionsleitfaden“ und „Normenentwurf“ wurden diese Unternehmen einbezogen.

5. Ergebnisse

5.1. Lastenheft und Analyse der Einflussgrößen für die Hybridverbindung (AP1)

Zum Start des Vorhabens wurden zunächst Anforderungen und Kriterien für die Fügeverbindung gesammelt und der Ist-Zustand aufgenommen. Die Tätigkeiten von EDAG fokussierten sich hierbei insbesondere auf die qualitative Beratung hinsichtlich der Erstellung eines Lastenhefts und einer Analyse der Einflussgrößen. Dazu wurde unter anderem ein Bezug zum Vorgängerprojekt „FlexHyJoin“ (Flexible production cell for Hybrid Joining, EU Horizon 2020, grant agreement no. 677625) hergestellt, um im Rahmen eines „lessons learned“ primäre Basisinformationen bzgl. Anforderungen, Einfluss- und Kenngrößenermittlung zu erhalten. Diese Basisinformationen dienten als Grundlage für die Analyse der Einflussgrößen auf den Lasermikrostrukturierungsprozess, die mechanischen Materialeigenschaften, den Füge- und Formgebungsprozess, sowie auf Anforderungen an das Bauteil und die dort implementierte Fügestelle.

Aus den vielfältigen Projekterfahrungen von EDAG mit Bauteilentwicklungen unter verschiedenen Funktionanforderungen wurden hierbei unter anderem Herausforderungen durch unterschiedliche Lastfälle dargestellt und analysiert und die Empfindlichkeit bezüglich der Materialeigenschaften hervorgehoben. Im Automotive-Bereich ist es für viele Komponenten notwendig, Anforderungen unter quasistatischer Belastung (funktionale Anwendungen) und hochdynamischer Belastung (Crash) zu erfüllen. Mit der Belastungsgeschwindigkeit verändern sich häufig die Materialeigenschaften und gerade unter Crashbelastung erhält die Bruch- und Materialversagensthematik von Werkstoffen eine große Relevanz. Weiterhin entstehen häufig Anforderungen unter verschiedenen Temperaturbereichen, z. B. von -30°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ je nach Klimasituation, in der sich ein Fahrzeug gerade befindet (z. B. Aufheizung der Instrumententafel bei direkter Sonneneinstrahlung).

Für das im Verbundprojekt als Fügepartner eingesetzte Kunststoffmaterial PP GF30 sah man gegenüber Referenzprojekten mit Polyamidwerkstoffen den Vorteil, dass Polypropylen hinsichtlich Feuchtigkeitsaufnahme robust reagiert. Polyamid dagegen ändert durch eine erhöhte Aufnahmefähigkeit von Feuchtigkeit sehr stark seine mechanischen Eigenschaften und bringt damit einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor in den Entwicklungsprozess einer solchen Fügeverbindung. Durch den Glasfaserszusatz von 30% wurde für das gewählte Grundmaterial eine Erfüllung erhöhter Festigkeitswerte erwartet.

Polypropylen weist in seinem viskoplastischen Deformationsverhalten eine ausgeprägte Abhängigkeit von Belastungsgeschwindigkeiten auf, auch durch die erhöhte Versprödung mit Anstieg der Geschwindigkeit bzw. Dehnrate. Eine weitere Herausforderung liegt an Polypropylenwerkstoffen hinsichtlich einer erhöhten Temperaturabhängigkeit auf. Im typischen Niedertemperaturbereich (-30°C) für Fahrzeuganwendungen ist die Glasübergangstemperatur überschritten, wodurch ein deutlicher Rückgang der Duktilität entsteht und Bauteile zu einem splitterartigen Bruchverhalten bei geringer Deformation neigen. Bei Erhöhung der Temperatur, z. B. in typische Hochtemperaturbereiche von $+80^{\circ}\text{C}$ kommt es zu einem starken Abfall der Materialsteifigkeit, wodurch in Bauteilentwicklungen in Steifigkeitslastfällen häufig im Entwicklungsprozess Verstärkungsmaßnahmen erarbeitet werden müssen.

Die dargestellten Materialeffekte und -abhängigkeiten sind auch in einer TailoredJoints-Fügeverbindung zu erwarten, stehen jedoch nicht im Fokus von Analysen im Rahmen des Verbundprojekts. Hier wurde die Betrachtung überwiegend auf eine quasistatische Belastung bei Raumtemperatur eingeschränkt.

Weiterführend wurde in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern ein generisches Lastenheft für die Anforderungen an die hybridische Fügezone des für das Vorhaben definierten Demonstrators E-Pump Motorabstützung/ Sitzverstellung erarbeitet.

5.2. Entwicklung einer Konstruktionsmethode zur Auslegung und Dimensionierung von Hybridbauteilen (AP2)

In den Tätigkeiten zur Anforderungsermittlung und der Entwicklung einer generellen Konstruktionsmethode stand unter anderem die Erstellung einer Konstruktionsrichtlinie für die Auslegung und Dimensionierung der Fügestelle von direkt gefügten Metall-/Kunststoff-Hybridbauteilen im Fokus. Hierbei wurden folgende Leitpunkte durch Ableitung aus Engineering-Projekterfahrungen in der Automobilindustrie im Bereich Konstruktionsanforderungen der Serienentwicklung erarbeitet:

Verbindungszone:

- Minimale Breite der Verbindung und Länge
- Form der Fügestreifen bzgl. Zugänglichkeit Laser (nur eben?) --> Laserzugänglichkeit betrifft nur das metallische Bracket. Laser(scanner) kann Kontouren im begrenzten Umfang (Radien) abfahren (LessonsLearn aus EU-Verbundprojekt „FlexHyJoin“)
- Mindestdicke der Materialien? (a) Metall: ausreichend Material für Laserprozess; b) Kunststoffseite: ausreichend „steif“ um bei Krafteinleitung nicht in „ungünstiger“ Richtung auszuweichen (Scherbelastung --> Schälbelastung))
- Kombination mit anderen Verbindungstechniken zu empfehlen (mechanische Fügeelemente, Verblockung z.B. durch Durchspritzung)
- Vorsehen zusätzlicher „Halteelemente“ (z.B. Kabelclips o.ä.)
- --> genaue Definition des "Kantenbereichs" (Übergang Kante Metallbracket zum reinen Kunststoffbauteilbereich): Vermeidung von Kerbwirkung im Lasteinleitungsbereich (Laserkavitäten bis in den Kantenbereich?; Overmoulding des Bracket mit Radius?; Kapillarkwirkung.....)

Fertigung:

- Verteilung Kleber auf Fügestelle --> bei diesem Verfahren wird kein Klebstoff verwendet: metallischer Bracket wird als Einlegeteil im Werkzeug vorgehalten; Konsolidierung (Fügeschritt) erfolgt direkt mit dem Spritzguss des Basisbauteils (optional: Haftvermittler?)
- Zugänglichkeit bzgl. Fertigung
- Verzug der Bauteile bzgl. Toleranz der Fügestelle
- Verzug nach Fügeprozess --> genaue Einhaltung der optimalen Spritzgussparameter (Temperatur, Druck, Spritzgeschwindigkeit, Nachhaldedruck, Abkühlrate) zur Gewährleistung einer vollständigen Füllung der Mikrokavitäten; Reduktion von eingebrachten Spannungen zwischen metallischem Bracket und Kunststoffbauteil in Fügezone

Lastgrenzen und Belastungsarten:

- Zug/ Druck/ Schub/ Torsion/ Schälung
 - Schäl- und Spaltbeanspruchung: linienförmige hohe Belastung des Klebstoffs, sollte vermieden werden.
 - Schub- und Torsionsbeanspruchungen: flächige, gleichmäßige Belastung des Klebstoffs parallel zur Klebfläche ohne Spannungsspitzen
 - Zug- und Druckbeanspruchungen: flächige, gleichmäßige Belastung des Klebstoffs senkrecht zur Klebfläche ohne Spannungsspitzen
- Sicherheitsfaktoren für überschlägige Auslegung empfehlen?
- Formel für überschlägige Auslegung?
- Schwingbruchanfälligkeit --> "Betriebsfestigkeit": ein wichtiger Punkt, der in TailoredJoints bei der Definition der Lastfälle nicht berücksichtigt wird (Grund: Umfang in Rahmen Forschungsprojekt)
- Temperatureinfluss auf Festigkeit?

Mögliche Materialpaarungen:

- Geeignetes "Lasermaterial"
- Geeignetes Paarungsmaterial
- Geeigneter Kleber --> entfällt: bei diesem Verfahren wird kein Klebstoff verwendet (optional könnte man hier einen Punkt "Haftvermittler" vermerken, wenn die Direktfüge auf gelaserte Brackets nicht hinreichend (siehe Obflächenkorrosionsprobleme bei Handling oder dezentraler Vorbehandlungsschritt der Brackets)
- Anfälligkeit für Umgebungseinfluss (Temperatur, Feuchte)

- Alterungsbeständigkeit

Recycling:

- Lösen der Verbindung --> z. B. induktiv, da Thermoplast (sehr schnelle und effiziente Lösung, Lessons Learned FlexHyJoin)

Empfehlungen für Einsatzorte:

- Kraftfahrzeug Anwendungsbereich: innen/ außen
- Hochbelastet, z.B. Crash

Bei EDAG standen in der Anforderungsermittlung die Fachgebiete CAE und Testing im Vordergrund, mit Schwerpunkt auf Anwendungen im Automotive-Umfeld und den dort angewendeten Methoden und Prozessen. Hierbei wurde auch der Einsatz geeigneter Software für die unterschiedlichen vorgesehenen Simulationsumfänge im Verbundprojekt betrachtet und eine Vorgehensweise festgelegt. In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde für die Simulation des Makromodells die Software LS-Dyna ausgewählt. Bei diesem Programm handelt es sich um eine in der virtuellen Produktentwicklung verbreitete Finite-Elemente-Methode-Software, die Ihre Stärken insbesondere in der transienten Crashesimulation mit expliziten Gleichungslösern ausspielen kann. Dabei lassen sich sowohl Gesamtfahrzeugmodell als auch Teilsystemmodell (z.B. Sitzsysteme) und Komponentensysteme (Versuche der Fügezone) simulieren und untersuchen. Solche Anwendungsfälle stehen beim Makromodell im Vordergrund und bieten eine Kompatibilität zu bestehenden Crashmodellen in der EDAG-Entwicklung. Darüber hinaus stehen diese Lizenzen bei EDAG in ausreichender Menge zur Verfügung und die Projektteilnehmer sind in der Bedienung dieser Software ausgebildet. Der Einsatz von LS-Dyna beschränkt sich dabei auf das Makromodell.

Als Austauschformate zwischen den Simulationen im Mikromodell bei CIKONI und dem Makromodell bei EDAG wurden Tabellen oder Kennfelder in Form von Text-, oder Excel-Formaten festgelegt, welche wiederum in der jeweils anderen Software weiterverwendet, werden können. Beispiele dafür sind Kraft-Weg-Kurven von standardisierten Versuchen oder Spannungskennfelder an Koordinatenpunkten.

Für die geplante Modellierung der Fügeverbindung im Makromodell wurde eine separate Darstellung der Fügezone als Elementlage zwischen den beiden Fügepartnern festgehalten. Dieser Elementschicht werden die entsprechenden mechanischen Eigenschaften der Verbindung zugewiesen, welche sowohl das Steifigkeitsverhalten als auch dessen Versagensverhalten möglichst genau abbilden sollen. Da die Rechenzeit eines expliziten Simulationsmodells stark von der Elementkantenlänge abhängig ist, gilt als Anforderung eine Elementkantenlänge von ca. 3mm-10mm für das Makromodell.

Die Modellierungsmethodik wurde hierbei auch hinsichtlich einer Abbildung des Projektdemonstrators gewählt. Dabei soll es sich um eine Kunststoff-Metall-Hybridverbindung zur Anbindung eines Stellmotorgehäuses aus Kunststoff an eine metallische Sitzstruktur handeln, welche vom Projektpartner Faurecia vorgeschlagen wurde. Die Hauptbelastung in dieser Fügeverbindung liegt in einer Schub- bzw. Torsionsbelastung. Da der Demonstrator neben rein statischer Belastung in der Fahrzeuganwendung auch zeitabhängigen Crashlastfällen unterworfen wird, wirkt sich diese Tatsache auch intensiv auf die CAE-Modellierung aus. Nach eingehender Rücksprache mit Faurecia, um ein Verständnis für die Fügezone des Demonstrators zu erlangen und diese zu analysieren, sind bei der Auslegung der Verbindung insbesondere Heck- und Frontcrashlastfälle zu berücksichtigen. Die Herausforderung liegt darin, dass die auftretenden Lasten nicht zeitlich konstant sind. Darüber hinaus ändert sich aufgrund des im Crash auftretenden lokalen und globalen Versagens die Lastrichtung und die Art (Zug-, Druck-, Scherbelastung) der Belastung in der Fügezone.

Anschließend wurde im Projektverbund die Herleitung eines geeigneten Probekörpers zur Ermittlung mechanischer Eigenschaften an Tailored Joints-Fügeverbindungen vorgenommen, sowie eine Versuchsmatrix unterschiedlicher Lastfälle und Fügekonfigurationen erarbeitet.

Hierzu wurden von allen an der Herstellung der Probe beteiligten Partnern die relevanten Einflussgrößen, bei den für die Fertigung eingebundenen Partner Gubesch, ILT und Faurecia abgefragt, um Einflussparameter aus der Herstellung für die Füge-Güte auf die Probekörper zu berücksichtigen. Zur Erstellung einer Versuchsmatrix mussten zunächst die Einflussgrößen auf eine realistische Anzahl an Varianten begrenzt werden. Durch die Kombination der diversen Einflussgrößen entstanden in der ersten Versuchsmatrix jedoch sehr viele mögliche Varianten. Um die Prüfungsanzahl auf einen zeitlich und kostentechnisch realistischen Rahmen zu begrenzen, wurde vom Projektpartner MSE die statistische Versuchsplanung mittels DoE unterstützt. So konnte mit Hilfe der DoE und Durchführung von diversen Abstimmungsrunden eine umsetzbare Versuchsmatrix erstellt werden.

Als Vorstufe zur Prüfkörperherstellung wurde über zusätzliche CAE-Simulationen bei EDAG bereits eine Abschätzung über ein mögliches Probekörperverhalten in unterschiedlichen Versuchslastfällen getroffen. Ziel

war es, die Prüfungsdurchführung schon im Vorhinein qualitativ zu simulieren, um die Sensibilität des Probekörpers hinsichtlich möglicher auftretender Nebeneffekte, die durch die Laservorbehandlung und die Wahl der Fertigungsparameter im Spritzgussprozess hervorgerufen werden könnten, zu analysieren und die Geometrie dahingehend zu optimieren. Diese Voruntersuchungen wurden mit einer repräsentativen generischen Materialkarte durchgeführt und vor allem die Spannungsverteilung in einem Kopf- und Scherzuglastfall untersucht. Zur Findung einer geeigneten Spannungsverteilung wurde hierbei die Probengeometrie variiert und verschiedene Wanddicken betrachtet, die auch mit dem Spritzgussprozess konform sind. Um einen Bruch im Kunststoffprofil zu vermeiden und das Separieren in der Fügezone zu konzentrieren, galt es prinzipiell das Profil massiv auszuführen, was jedoch der spritzgusstechnischen Umsetzbarkeit ab einer gewissen Wanddicke widerspricht. Der gefundene Geometriekompromiss ermöglichte eine erste Vorauslegung der geplanten Versuche und wurde für die Fertigung der notwendigen Werkzeuge zur Probekörperherstellung festgesetzt.

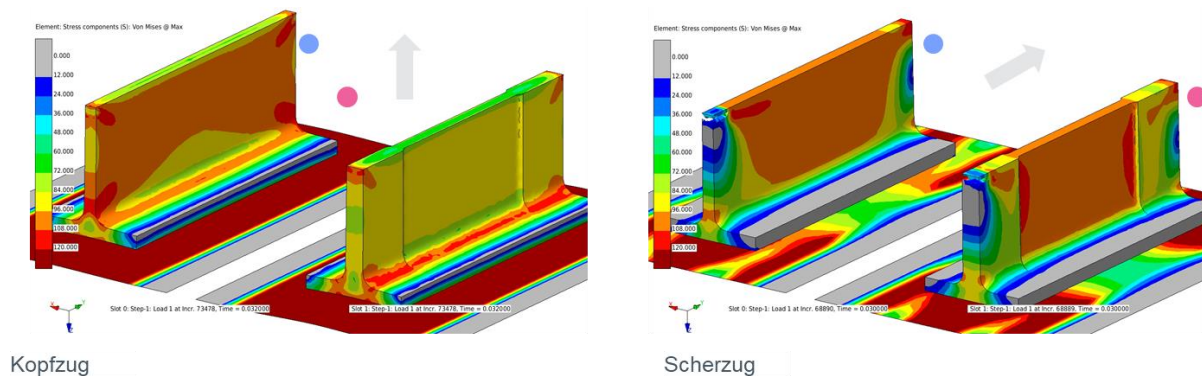


Bild 1: Spannungsverteilung für Kopfzug- und Scherzugversuche aus Detailmodellsimulation an generischen Probekörpergeometrien

Neben der eigentlichen Prüfkörpergeometrie wurden in gemeinsamer Abstimmung mit den Projektpartnern auch Prüfrandbedingungen, wie z. B. Krafteinleitung und Probeneinspannung definiert. Dabei wurde abgestimmt, dass eine einzige Probekörpergeometrie genutzt wird, mit welcher unterschiedliche Lastfälle im Laborversuch auf einer Zugprüfmaschine durchgeführt werden. In der Analyse möglicher Einspannsituationen des Probekörpers auf der Prüfmaschine wurde final definiert, die Lastfälle Kopf-, Scher- und Schälzug zu betrachten. Weitere überlagerte Belastungszustände mit schräg angesetzten Lastwinkeln sind für detaillierte Analysen des mechanischen Verhaltens möglich und können die Validierung von Simulationsmodellen verbessern, wurden im Rahmen des Verbundprojekts jedoch nicht untersucht, um die geplante Versuchsmatrix auf einen umsetzbaren Umfang zu bringen.

Abschließend wurde im Arbeitspaket AP2 im Projektverbund ein Konstruktionsleitfaden erstellt. Dieser soll dem Konstrukteur Empfehlungen zur effizienten Gestalt- und Strukturfindung geben. Die Ausarbeitung wurde durch MSE vorgenommen und durch die Projektpartner in gemeinsamen Besprechungen begleitet und unterstützt.

5.3. Untersuchung der Einflussgrößen auf die Verbindungseigenschaften (AP3)

Im Rahmen des Arbeitspakets 3 lag der Fokus in erster Linie auf der Erforschung der Einflussgrößen. Mit Hilfe einer generisch hergeleiteten Prüfkörpergeometrie, sollten die definierten fertigungstechnischen Einflussparameter bezüglich der Laservorbehandlung des metallischen Einlegeelementes sowie ausgewählte spritzgusstechnische Verarbeitungsparameter untersucht werden, um so die optimale Fügeüte für diese Art der Verbindungstechnik ableiten zu können.

Durch zerstörende Prüfungen im EDAG-Labor sollten diese Parameter unter dem Gesichtspunkt der mit AP1 „Lastenheft, Analyse der Einflussgrößen“ und AP2 „Entwicklung einer Konstruktionsmethode zur Auslegung und Dimensionierung von Hybridbauteilen“ definierten Haupt-Lastfallbeschreibungen wie Scher- und Kopfbzugbeanspruchungen messtechnisch untersucht und die Einflüsse der Fertigungsparameter analysiert werden.

Auf Basis dieser physikalischen Messergebnisse sollten die so gewonnenen Kennwerte, als Basis für die Validierung und ggf. Kalibrierung der CAE-Materialmodellerstellung dienen, welche unter Berücksichtigung der Versagensmechanismen die Grundlage für die konstruktive Auslegung der Fügestelle des angedachten Demonstratorbauteils bilden soll.

Das Konsortium beriet im AP 3.1 verschiedene Vorschläge für mögliche Probekörpergeometrien. Abschließend wurde eine Geometrie gewählt, bei der ein flaches, nicht umgeformtes, Blech mit dem hier entwickelten Fügeverfahren mit einem T-förmigen Kunststoffanguss verbunden wird. Es wurde zunächst noch darüber diskutiert auch eine Variante zu produzieren, die keinen T-förmigen Anguss hat, sondern nur stumpf mit der Kante der Kunststoffplatte an das Blech angespritzt ist. Diese Variante wurde aus verschiedenen Gründen verworfen. Stattdessen wurden zwei Varianten mit unterschiedlich breiten T-förmigen Angüssen entworfen. (12 und 16 mm Breite) Final wurde jedoch nur die Variante mit 16 mm breitem Anguss ausgewählt.

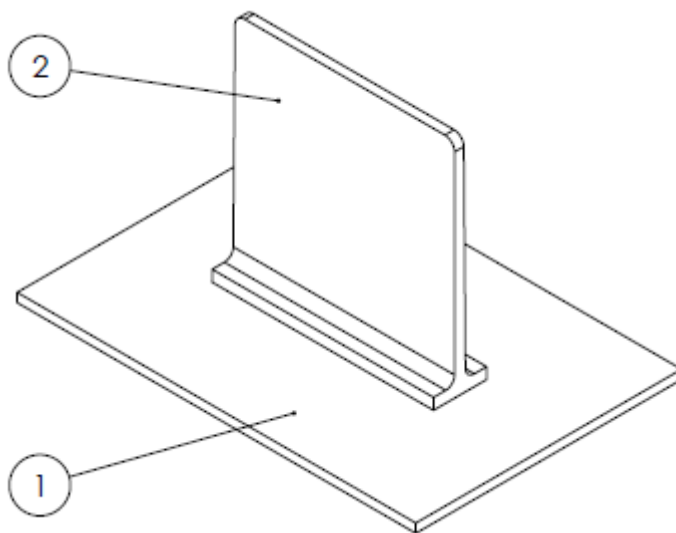


Bild 2: Final gewählte Probengeometrie (1 Blechteil, 2 Kunststoffteil)

Nachdem sich die Bereitstellung der Probekörper länger verzögert hatte, wurden im Rahmen des Arbeitspakets 3.5 die physikalischen Versuche im EDAG-Labor durchgeführt. Dazu wurden seitens EDAG verschiedene Prüfaufbauten entworfen, um die unterschiedlichen Belastungsrichtungen separat prüfen zu können. Der Entwurf wurde an die zuständigen Projektpartner zur Diskussion und Abstimmung vorgelegt. Nach erfolgter Abstimmung wurden die erforderlichen Komponenten zur Einspannung der Probe hergestellt und die Durchführung der Versuchsserien im Rahmen der Bearbeitung des AP 3.5 vorgenommen.

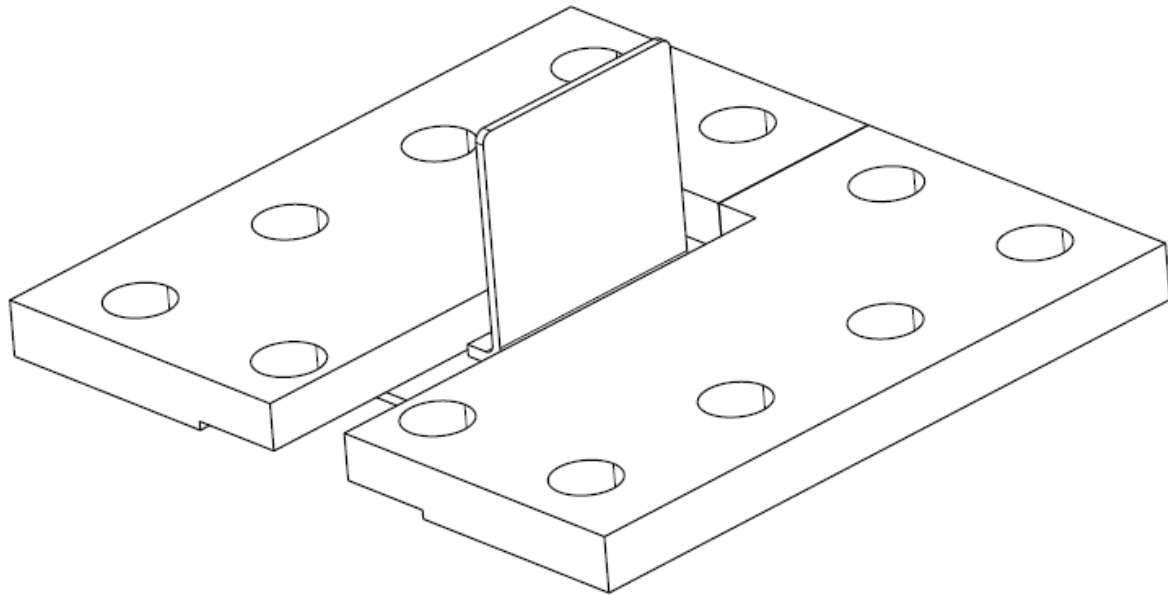


Bild 3: Konstruktion von EDAG zur Einspannung der Metallgrundplatte der Probekörper

Die dargestellte Einspannvorrichtung wurde so konstruiert, dass man damit zwei von drei Prüflastfälle direkt abdecken kann. Dies waren der Scherlastfall und der Kopfzuglastfall. Für den Schällastfall wurde mit einer etwas anderen Prüfvorrichtung durchgeführt, bei der der Kunststoffsteg in exzentrisch platzierte Zugspannbacke eingespannt wurde und die Metallplatte dann mittels eines Stempels abgeschält wurde. In der nachfolgenden Abbildung werden die 3 verwendeten Prüfaufbauten dargestellt.

Die folgende Darstellung zeigt die Prüfaufbauten der drei Lastfälle:

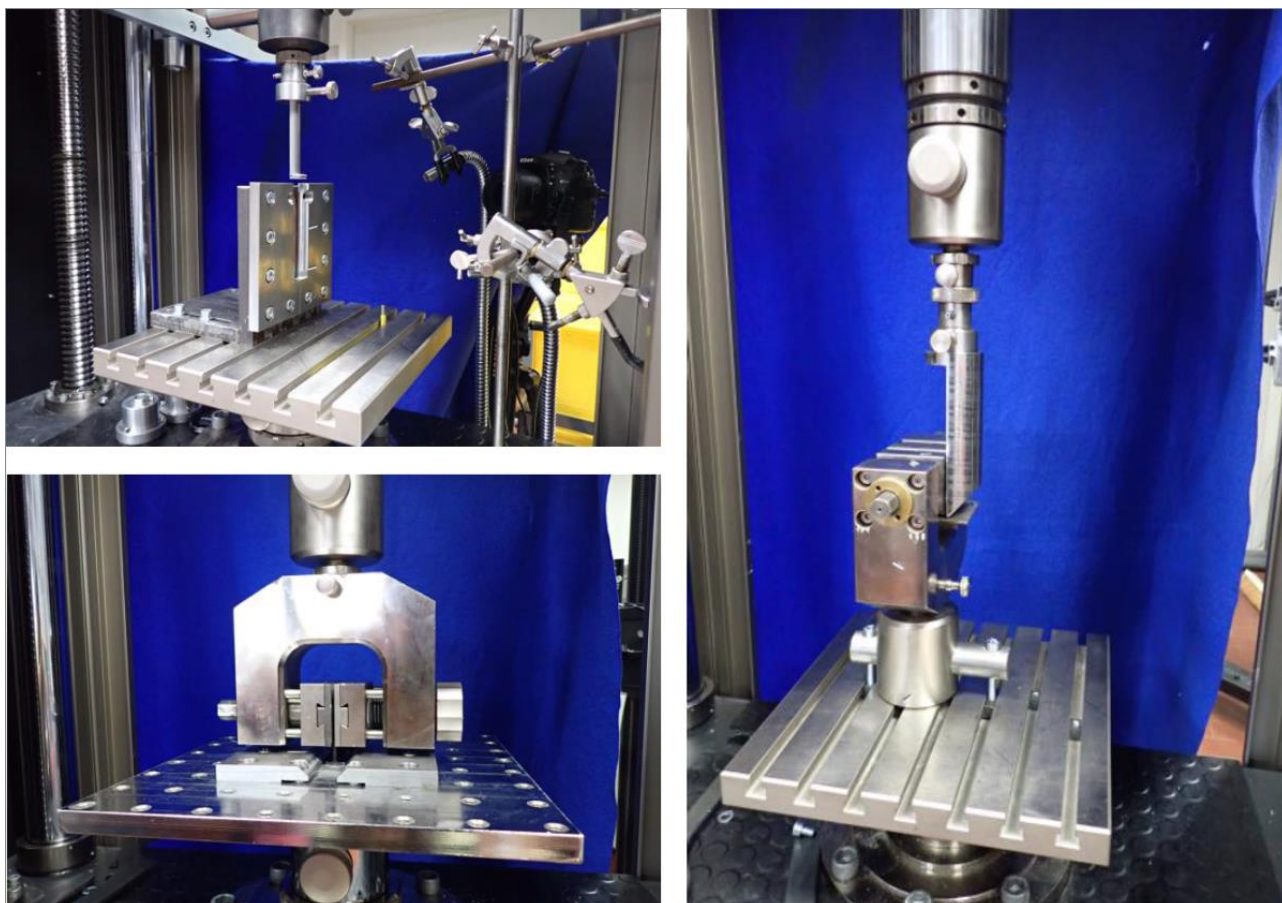


Bild 4: Übersicht untersuchte Lastfälle in der physikalischen Prüfung (oben links Scherlastfall, unten links Kopfzuglastfall, rechts Schällastfall)

Zur Erforschung der Einflussgrößen stimmte das Konsortium die entscheidenden Einflussparameter ab. Da die Kombination aller in Frage kommenden Einflussparameter den geplanten Versuchsrahmen bei weitem überstiegen hätte, wurde zunächst der Einfluss des Spritzgusses in einer separaten DoE analysiert. Hierzu fertigte der Projektpartner Gubesch Probekörper mit 8 unterschiedlichen Spritzgussparametern. Diese wurden anschließend beim Partner ILT geprüft und durch MSE ausgewertet. Details hierzu sind den Einzelberichten der jeweiligen Projektpartner zu entnehmen. Daraus hervorgehend wurden für die weiterführenden Untersuchungen der Einflussparameter nur noch mit einer festen Spritzparameterkonfiguration gearbeitet.

In der folgenden Tabelle werden die mit den Projektpartnern festgelegten Konfigurationen dargestellt bei denen Art der Laserstruktur, Strukturabstand und Einbringungswinkel der Laserstruktur variiert wurden.

Nummer	Parameter	Struktur	Strukturabstand	Winkel	Anzahl
1	Parameter 1	Linear	300 µm	0 °	20
2	Parameter 1	Linear	500 µm	0 °	20
3	Parameter 2	Linear	300 µm	0 °	20
4	Parameter 2	Linear	500 µm	0 °	20
5	Parameter 1	Gekreuzt	300 µm	0 °	20
6	Parameter 1	Gekreuzt	500 µm	0 °	20
7	Parameter 2	Gekreuzt	300 µm	0 °	20
8	Parameter 2	Gekreuzt	500 µm	0 °	20
9	Parameter 3	Linear	300 µm	30 °	20
10	Parameter 3	Linear	500 µm	30 °	20
11	Parameter 4	Linear	300 µm	30 °	20
12	Parameter 4	Linear	500 µm	30 °	20
13	Parameter 3	Gekreuzt	300 µm	30 °	20
14	Parameter 3	Gekreuzt	500 µm	30 °	20
15	Parameter 4	Gekreuzt	300 µm	30 °	20
16	Parameter 4	Gekreuzt	500 µm	30 °	20

Masse- /Einlegertemp.	Einspritzgeschwindigkeit	Nachdruck	Werkzeugtemperatur	Zeit Aufheizen	Zeit Abkühlen
235 °C	50 g/s	600 bar	50 °C	170 s	60 s

Bild 5: Übersicht untersuchte Konfigurationen in der physikalischen Prüfung

Das Hauptaugenmerk der Versuche lag auf den Lastfällen Scherung und Kopfzug. Lediglich fünf ausgewählte Konfigurationen wurden im Schällastfall geprüft. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Maximalkräfte als Min-, Max- und Mittelwert aus fünf Einzelmessungen dargestellt. Detaillierte Ergebnisse und Messkurven sind dem Laborbericht „PB-50501-0543-02.pdf“ zu entnehmen.

Parts	Scherzug / Shear test		Kopfzug / Head pull test		Schältest / Peel test	
Konfig XXX	x	min max	x	min max	x	min max
Konfig 1	2160	1890 2480	3050	2870 3170	--	-- --
Konfig 2	1790	1460 2300	2300	1970 2780	--	-- --
Konfig 3	2060	1780 2600	2630	2160 3330	--	-- --
Konfig 4	1610	1050 2330	1160	193 2330	258	112 418
Konfig 5	2860	2610 3170	3310	3030 3540	696	664 726
Konfig 6	2330	2080 2510	2750	2540 3030	--	-- --
Konfig 7	2430	2170 2550	2710	2460 2850	--	-- --
Konfig 8	2010	1720 2230	2520	2090 2870	--	-- --
Konfig 9	2650	2280 2890	2730	2450 2940	--	-- --
Konfig 10	2280	2200 2380	2710	2540 2910	--	-- --
Konfig 11	2520	2450 2580	2470	2250 2660	--	-- --
Konfig 12	1900	1690 2180	2530	2240 2750	--	-- --
Konfig 13	2890	2820 2990	2290	1700 2580	--	-- --
Konfig 14	2750	2340	3380	3220	680	612

Parts	Scherzug / Shear test		Kopfzug / Head pull test		Schältest / Peel test	
		3010		3570		772
Konfig 15	2800	2740	2820	2610	611	537
		2920		2970		696
Konfig 16	2360	2020	2940	2760	--	--
		2580		3200		--
Wdh. Konfig 1	2060	2010	2186	1988	--	--
		2100		2326		--
Wdh. Konfig 5	2910	2650	3319	2967	--	--
		3130		3615		--
Wdh. Konfig 14	2400	2190	2793	2434	--	--
		2550		3120		--
Wdh. Konfig 15	2470	2300	2439	2381	--	--
		2550		2504		--
Schub 5 %	1150	860	--	--	--	--
		1430		--		--
Schub 15 %	821	358	--	--	--	--
		1300		--		--
Zug 20 %	--	--	2254	1866	--	--
		--		2544		--
Zug 35 %	--	--	1715	1152	--	--
		--		2089		--

Basierend auf den Ergebnissen dieser 16 Basiskonfigurationen wurden die drei Konfigurationen mit den besten Festigkeitswerten (Durchschnittswert der Maximalkräfte) der beiden geprüften Lastfälle sowie die Konfiguration mit den schlechtesten Werten ausgewählt. Dies waren die Konfigurationen 05,14,15 und 04 als schlechteste Variante.

An diesen Konfigurationen wurde dann der Schällastfall geprüft. Durch die Problematik der längeren Verzögerung bei der Fertigung der Proben waren sehr viele Proben schon korrodiert. Es wurde vermutet, dass die Korrosion, die teils auch auf den Anbindungsflächen vorhanden war, einen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte haben könnte. Ein direkter Zusammenhang zwischen Grad der Korrosion und der mechanischen Eigenschaften konnte jedoch nicht eindeutig festgestellt werden. Um einen solchen Einfluss auszuschließen, wurden jedoch nochmal die 4 Varianten 1,5,14 und 15 neu angefertigt und als Wiederholung geprüft. Zudem wurde die Anbindungsfläche vom Projektpartner MSE im Hinblick auf die Lastfälle optimiert. Das heißt, es wurde versucht nur die mechanisch am stärksten belasteten Bereiche zu strukturieren. Dabei wurden je zwei Optimierungen für Zug und für Schub gemacht. Es gab je zwei unterschiedliche Grade der Strukturierten Fläche. Die bei den Bezeichnungen angegebene Prozentzahl gibt die Flächenanteile, an die im Bezug zur Gesamtfläche für die Strukturierung verwendet wurde. Mit der Reduzierung der Anbindungsfläche sollen Erkenntnisse für eine Lastfallbezogene wirtschaftliche Auslegung der Laserstrukturierungsfläche gewonnen werden.

Zusätzlich zu den mechanischen Kennwerten der obigen Tabelle gab es noch Erkenntnisse aus optischen Auswertungen der Bruchflächen. Die Bruchflächen wurden dazu fotografisch und partiell auch per Mikroskopie analysiert. Aus diesen Auswertungen wurden diverse Erkenntnisse gewonnen.

An den Bruchbildern der Kunststoffseite waren teils stark ausgeprägte Hohlräume zu erkennen. Es war an sehr vielen Proben erkennbar, dass sich Lufteinschlüsse als kleinere verteilte Bläschen oder auch als größere Hohlräume, kreisförmig angeordnet um den Anspritzpunkt herum, vorhanden waren. Dies spricht für eine ungünstige Wahl des Angusspunkts bzw. der Entlüftung und die Annahme, dass hierüber Luft mit in die Spritzform gezogen wird oder nicht in optimaler Form entweichen kann. Durch diese Lufteinschlüsse gab es teils sehr große Bereiche, die eine eher schlechte Anbindung an das Metall hatten. Dies zeigte sich in den Festigkeitswerten und auch in dem Verbleiben kleinerer Kunststoffpartikel oder größerer hautartiger Teile aus den Hohlräumen des Kunststoffteils auf der Metalloberfläche (siehe Bild 6 - Bild 9)

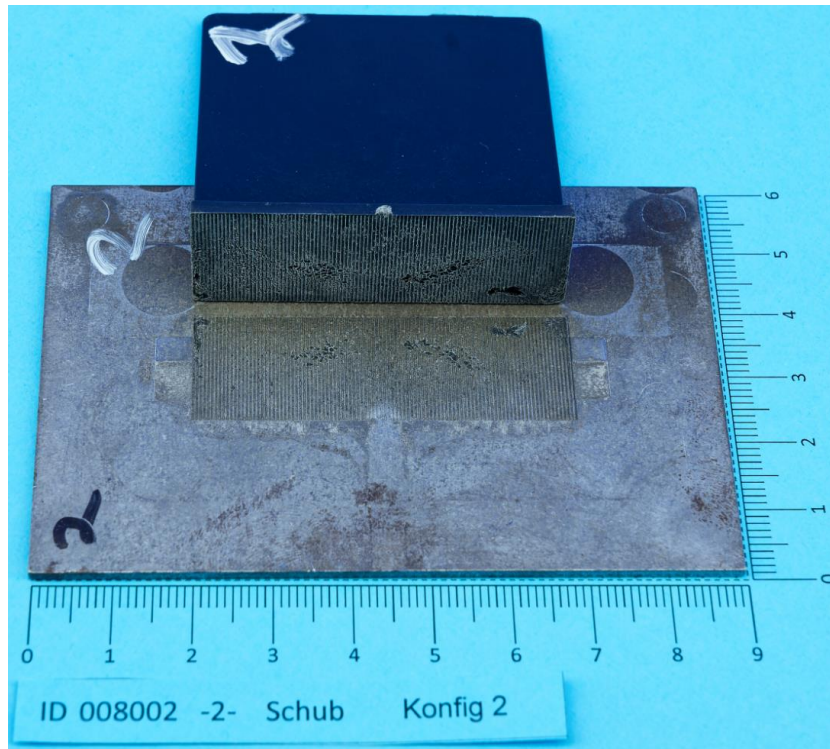


Bild 6: Beispiel Bruchbild mit einer geringen Korrosion und leichten Hohlräumen im Kunststoff



Bild 7: Beispiel Mikroskopieaufnahme Bruchbild, Kunststoffseite

Weiterhin konnten auf den Stahlflächen teils starke Einwirkungen von Korrosion auch im Bereich der Anbindungsfläche festgestellt werden. Die durch die lange Lagerzeit der strukturierten Bleche aufgetretene Oberflächenkorrosion zeigte sich sehr unterschiedlich stark ausgeprägt und teilweise auch in den Bereichen der laserstrukturierten Anbindungsfläche. Es wurde vermutet, dass dies negative Auswirkungen auf die Festigkeitswerte haben würde. Dieser Zusammenhang konnte sich jedoch nicht eindeutig nachweisen lassen.

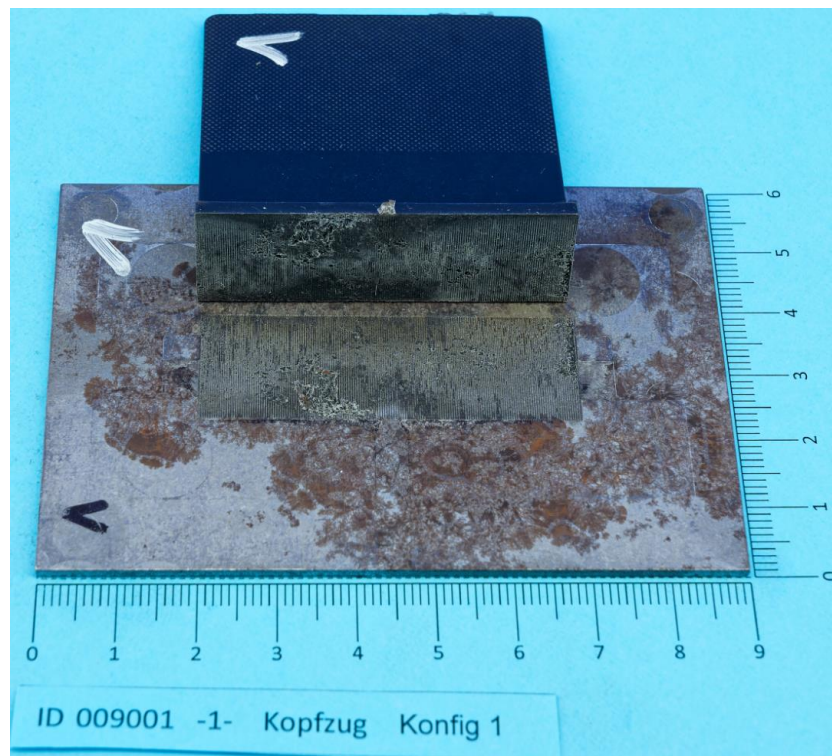


Bild 8: Beispiel Bruchbild mit einer stärkeren Korrosion und stärkeren Hohlräumen im Kunststoff

Mittels mikroskopischer Auswertung konnte man Bereiche erkennen, in denen Kunststoff in den Laserstrukturen hängen blieb bzw. sich herausgezogen hatte. Die laserstrukturierten Bereiche, die auf der Metalloberfläche weiß, hervorscheinen enthalten Reste vom Kunststoff, der durch das Weißbruchverhalten aufgeheilt ist. Die silbrig schimmernden Bereiche enthalten keinen Kunststoff mehr oder waren nie komplett mit Kunststoff gefüllt. Partikel, die von der Größe her über die Laserstrukturen hinwegreichen sind herausgetrennte Kunststoffpartikel die überwiegend aus den vorher dargestellten Hohlräumen stammen. Dies ist auch in der mikroskopischen Detailaufnahme in Bild 9 zu sehen.

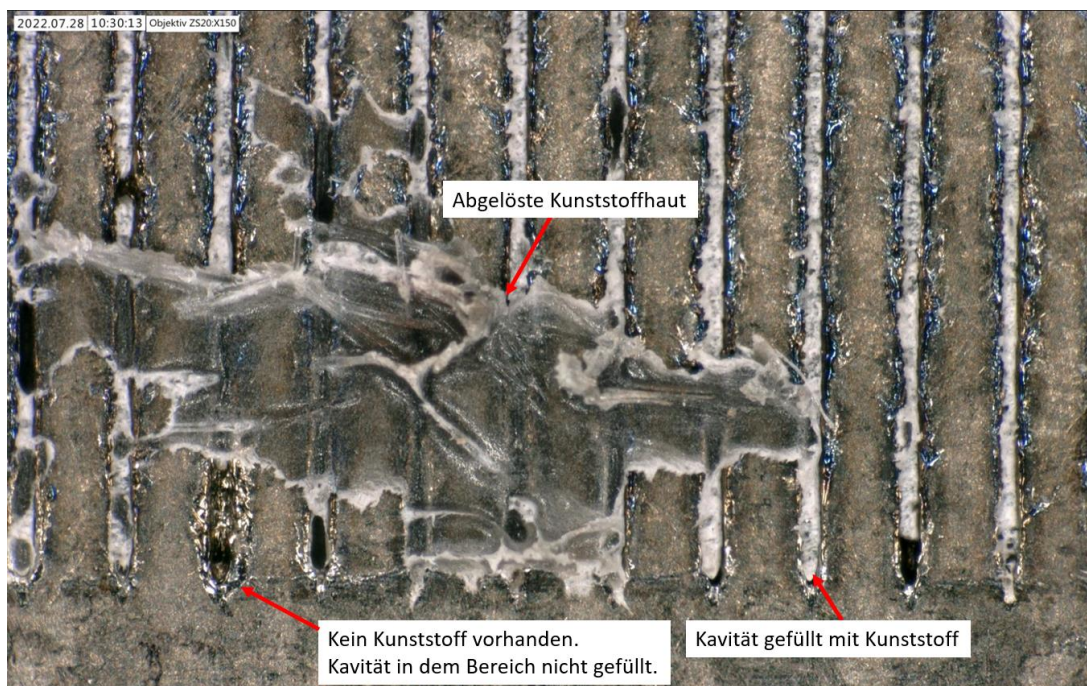


Bild 9: Beispiel Mikroskopieaufnahme Bruchbild, Metallseite

Es gab einzelne Versuche, bei denen die Verbindung so gut hielt, dass im Schubversuch kein Ablösen möglich war. Allerdings waren diese Versuche von den Festigkeitswerten her nicht über den Versuchen angesiedelt, bei denen ein Trennen der beiden Werkstoffe im Versuch möglich war. Bei diesen Versuchen stanzte sich der Druckstempel in das T-Profil hinein. (siehe Bild 10 und Bild 11)

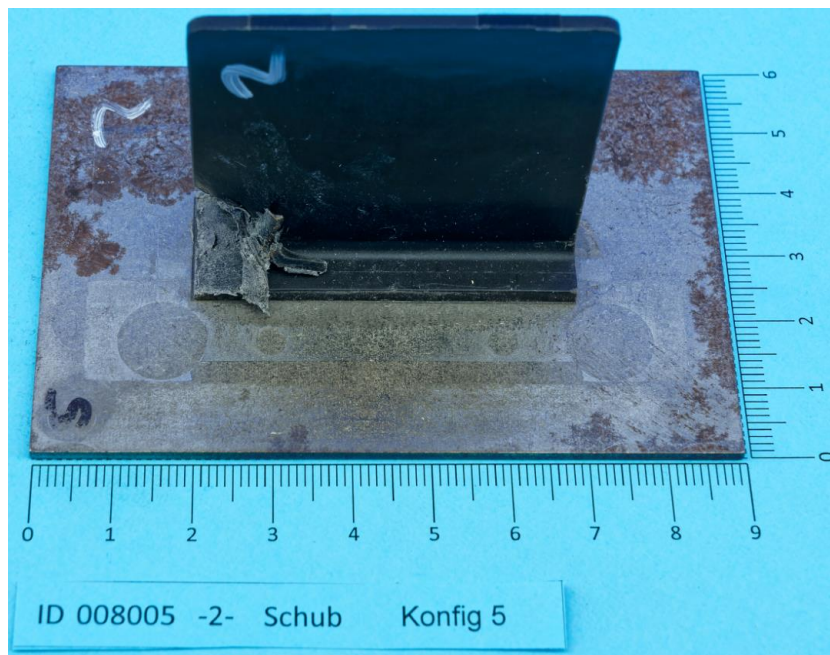


Bild 10: Beispiel für Versuchsergebnis bei nicht gelöster Verbindung

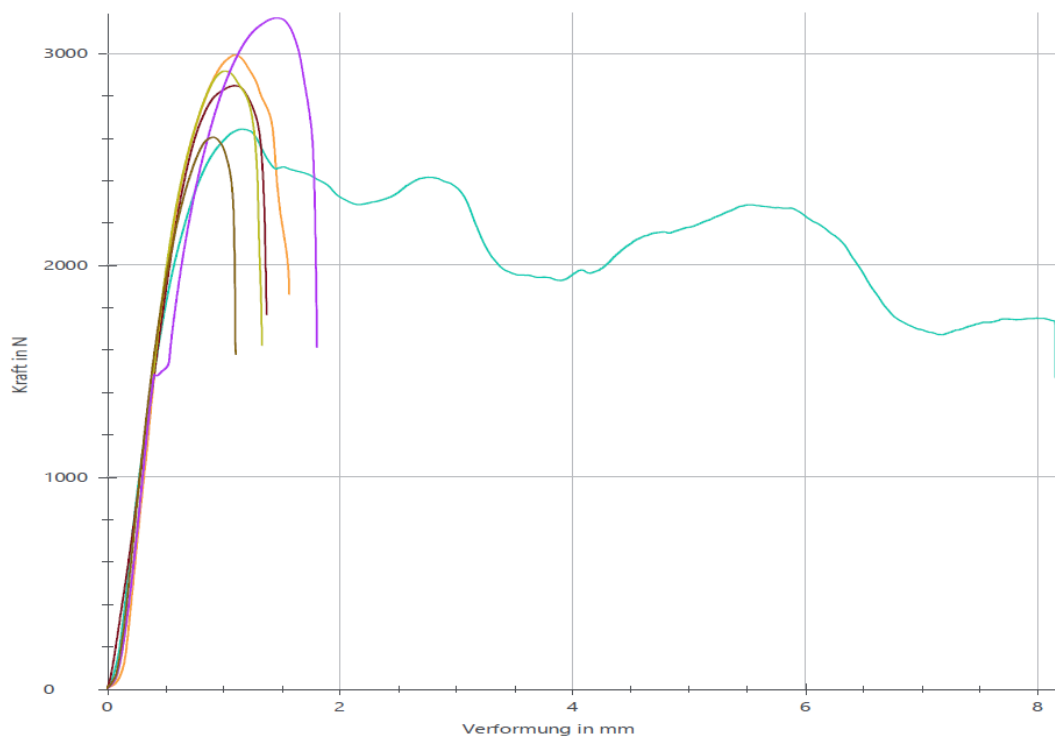


Bild 11: Beispiel für Versuchsergebnis bei nicht gelöster Verbindung, Diagramm von Konfiguration 5

Ein anderes an den Proben auch teilweise schon vor dem Versuch erkanntes Problem war ein leichtes Ablösen des Kunststoffs im mittleren Bereich der Probe. Dieses Phänomen zeigte sich an vielen Proben und immer an der identischen Position, auf der Gegenseite des Angusspunkts. Die nachfolgende Darstellung zeigt die abgelöste Stelle an verschiedenen Proben. Oben links ist ein Foto einer zu prüfenden Probe vor Versuchsstart zu sehen. Die Darstellungen oben rechts und unten zeigen eine solche Stelle in einer mikroskopischen Aufnahme aus einem Querschliff und die mikroskopische Vermessung einer solchen Stelle. (Bild 12) Darin ist zu erkennen, dass diese Ablösungen teils bis zu 0,8 mm in die Anbindungsfläche hineinragen und nach innen hin keilförmig auslaufen.

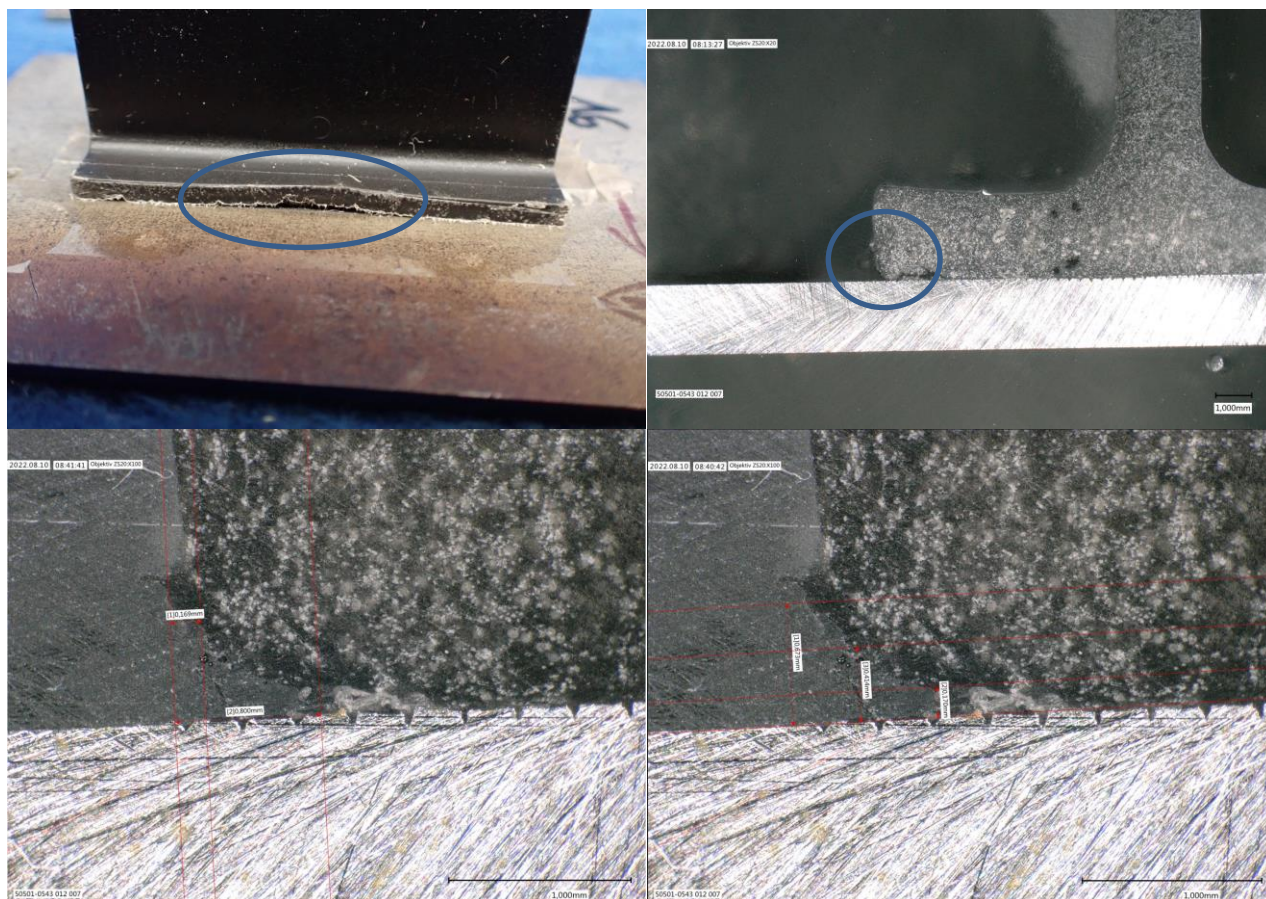


Bild 12: Beispiel für Ablösephänomen an der Probekante

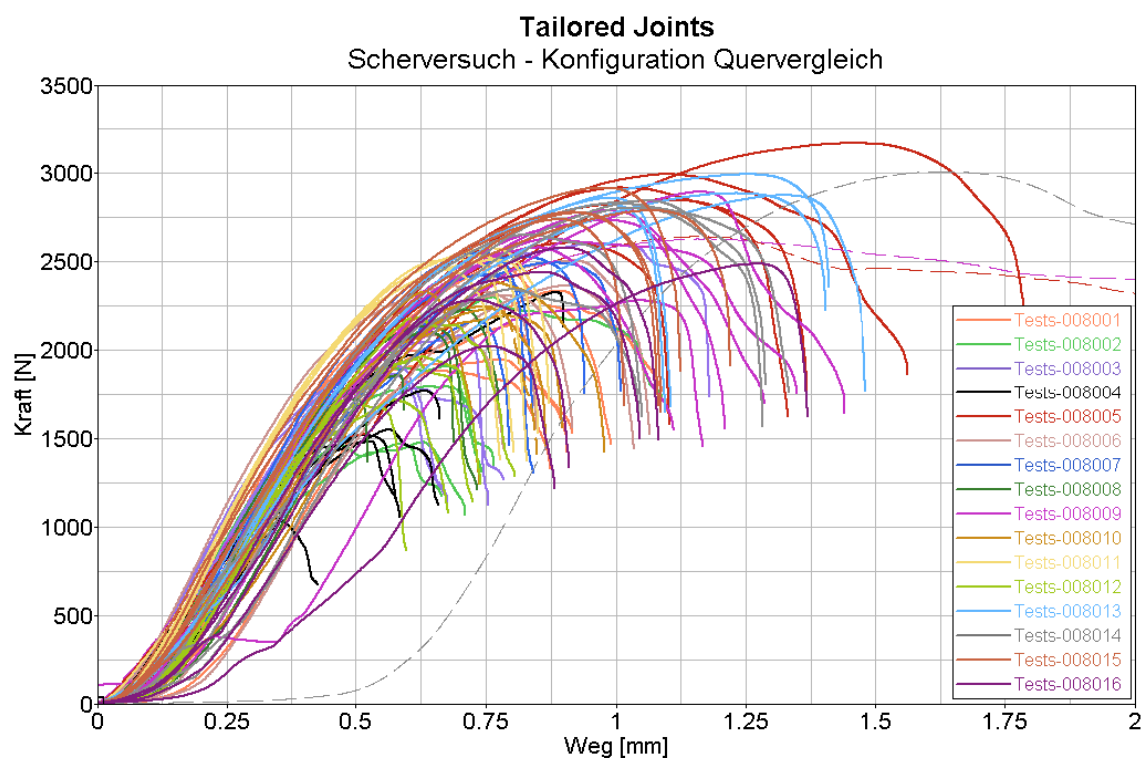
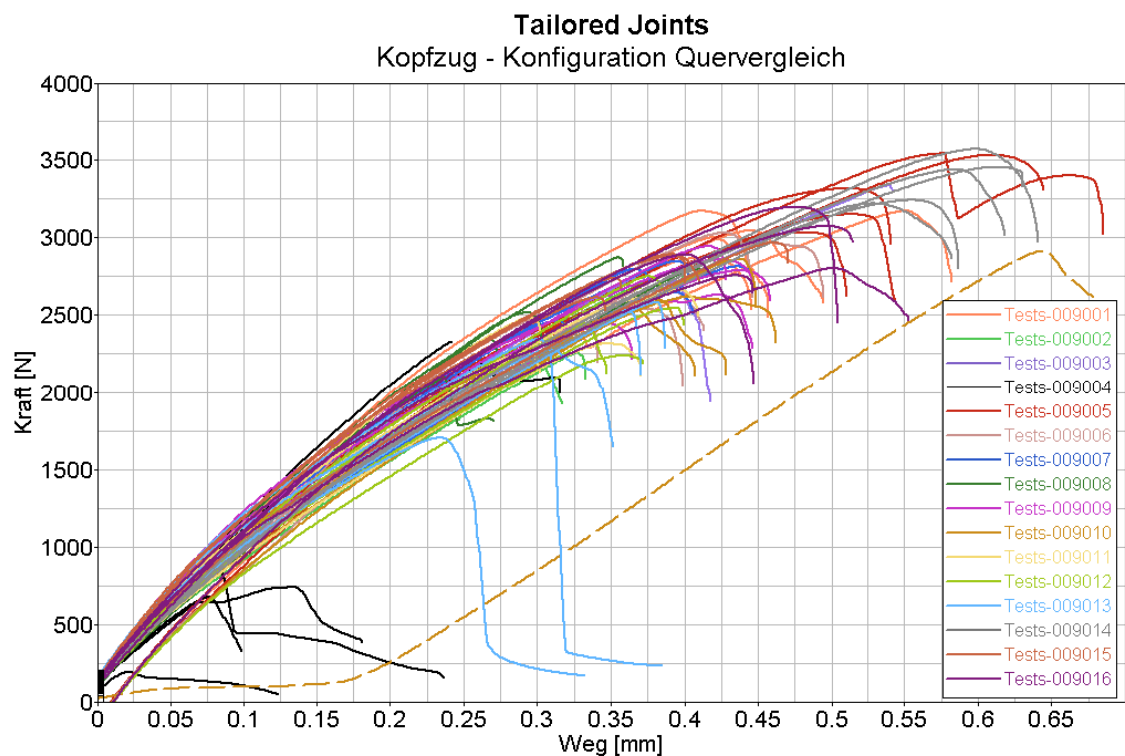


Bild 13: Gesamtübersicht aller Kopf- und Scherzugversuche der ersten Probencharge (16 Fügekonfigurationen)

Die Prüfergebnisse der 16 unterschiedlichen Fügekonfigurationen wurden anschließend untereinander verglichen, indem die Kraft-Weg-Messungen gegenübergestellt und bewertet wurden. Aus mechanischer Sicht wurden die Konfigurationen 05, 14 und 15 als günstigste bewertet. Diese drei Konfiguration weisen unter Zug- und Scherbelastung hohe Versagenskräfte auf, bei gleichzeitig hohem Deformationsweg und akzeptabler Streuung. Für den allgemeinen Einsatz in Bauteilentwicklungen sind daher diese drei TailoredJoints-Strukturierungen zu bevorzugen.

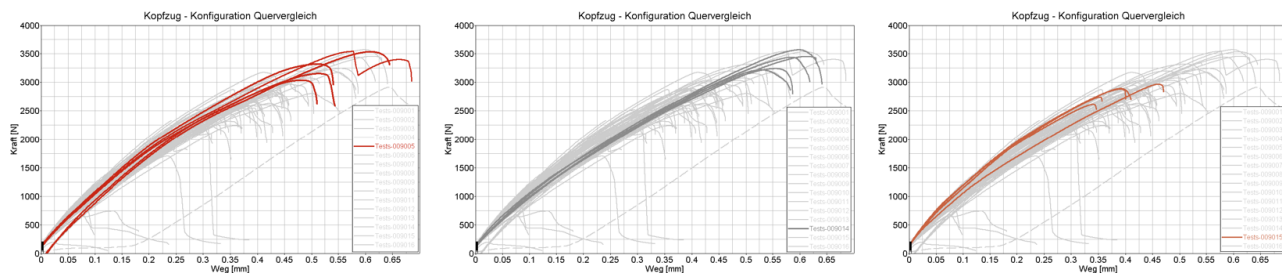


Bild 14: Quasistatische Prüfergebnisse Kopfbzug, von links nach rechts Konfiguration 05, 14, 15

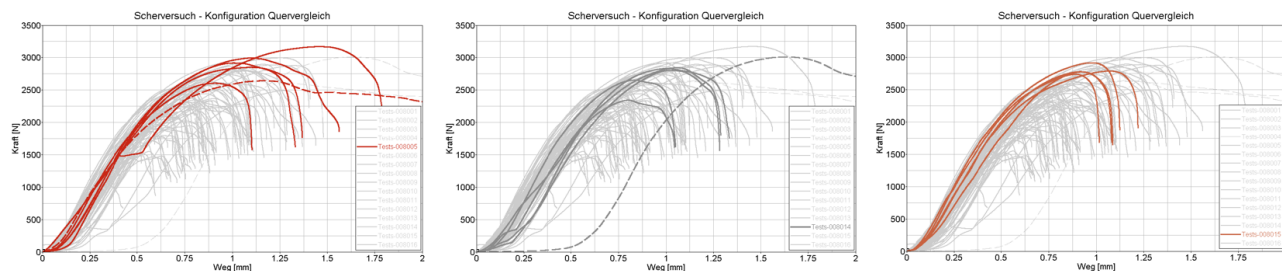


Bild 15: Quasistatische Prüfergebnisse Scherzug, von links nach rechts Konfiguration 05, 14, 15

Für die weitere Betrachtung im Projektverlauf wurde als mechanisch günstigste Konfiguration die Variante 05 ausgewählt. Hiermit wird anschließend die Validierung des Makromodells und die Herstellung des Demonstrators vorgenommen. Die aufbereiteten Kraft-Weg-Messungen dienen dabei als Grundlage, um das Makromodell zu kalibrieren.

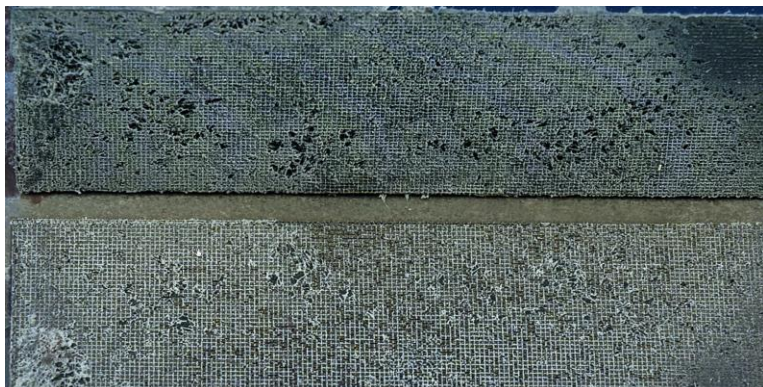


Bild 16: Unter Kopfbzug separierte Fügeverbindung der ausgewählten Konfiguration 05

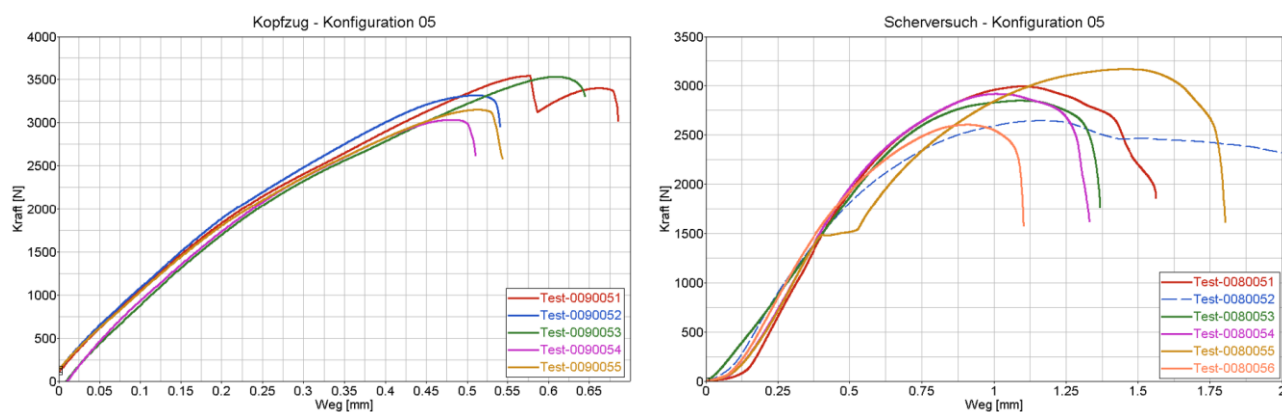


Bild 17: Vergleich der Einzelversuche aus der ausgewählten Konfiguration 05

5.4. Erstellung einer Simulation (Modellentwicklung) zur Berechnung von laserbasierten Hybridverbindungen (AP4)

Anschließend an die prüftechnische Untersuchung von Fügeproben aus AP3 sollte die Betrachtung der Fügeverbindung virtuell mit Hilfe der Finite-Elemente-Simulationsmethode erfolgen. Durch einen zeitlichen Versatz in den Tätigkeiten der realen Werkzeug-/ Probenherstellung und gefolgter Prüfung fand die Erarbeitung von Makromodellen und -simulationen bereits intensiver statt, bevor die geplanten Versuche aus AP3 vollständig abgeschlossen waren. Hierbei wurden notwendige Modelldefinitionen mit Annahmen befüllt, um generelle Abschätzungen über das Modellverhalten von Fügeverbindungen unter unterschiedlichen Belastungszuständen zu erlangen, und verschiedene Möglichkeiten zum Modellaufbau vergleichen und bewerten zu können.

Während der Aufbau und die Simulation auf Mikroebene durch den Projektpartner CIKONI umgesetzt wurden, lag der Fokus bei EDAG in der Betrachtung der Fügepartner auf Makroebene, sowie im Übertrag der Mikromodell-Simulationsergebnisse in die Definition eines Makromodells. Die Vorgehensweisen und zentrale Ergebnisse der beiden Simulationsmethoden wurden dabei regelmäßig im Projektverbund diskutiert und der Datenaustausch untereinander abgestimmt.

Mit dem Ziel einer möglichst realitätsnahen Simulation der T-Stoß-Probe im Kopf- und Scherzuglastfall mittels eines Makromodells galt es zunächst eine Vorauswahl über mögliche Modelltypen und Diskretisierungsgrade im ausgewählten Finite-Elemente-Solver LS-Dyna zu treffen. In Anlehnung an typische Komponentenmodellierungen im simulationsintensiven Fahrzeugsektor wurde zur Abbildung der Fügepartner eine Schalenelementmodellierung festgelegt, die dünnwandige Strukturen durch zweidimensionale Elemente in der Wandmitte nachstellt und somit einen guten Kompromiss aus Simulationsgenauigkeit und Rechenaufwand für komplexe Modelle bereitstellt. Die eigentliche Fügezone zur Kopplung der Fügepartner wird durch eine Ersatzschicht modelliert, die durch spezielle Fügezone-Materialmodelle in ihrer strukturmechanischen Verhaltensweise beschrieben wird. Hierbei steht neben einer Nachbildung des elastischen und plastischen Deformationsverhaltens auch die Darstellung eines Materialversagens im Fokus. Durch eine Nachbildung der real geprüften T-Stoß-Probe soll im späteren Projektverlauf eine Validierung der Modelle gegenüber dem real durchgeführten Versuch erfolgen, um die Modellgültigkeit abzusichern und um anschließend auch eine Übernahme des Modells in eine Bauteilanwendung zu ermöglichen, z. B. in die Simulation des Projektdemonstrators.

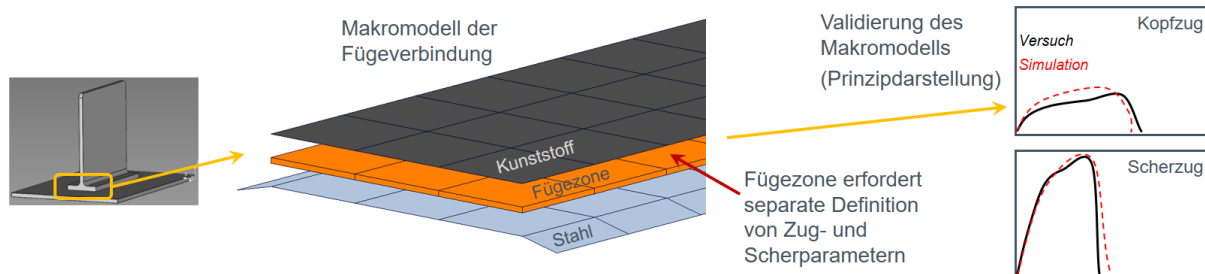


Bild 18: Prozesskette Makromodellerstellung und -validierung

Die beiden Fügepartner der T-Stoß-Probe wurden zur Erstellung eines Makromodells basierend auf CAD-Daten durch ein Schalenelementenetz abgebildet. Die gewählte Kantenlänge von ca. 3mm stellt einen Kompromiss dar, aus notwendiger Elementfeinheit zur Abbildung der verhältnismäßig kleinen Probe bei gleichzeitiger Annäherung einer größeren Kantenlänge aus Gesamtfahrzeugsimulationen (für metallische Werkstoffe ist hier ca. 4-7 mm verbreitet). Somit wird sichergestellt, dass die generierten Ergebnisse an der T-Stoß-Probe bzw. die erarbeitete Modellierungsmethodik auch auf größere Bauteile oder Komponenten direkt übertragbar ist.

Vor dem Bereitstehen erster Ergebnisse der Mikromodellsimulation von CIKONI und dem Vorliegen von Versuchsdaten aus Kopf- und Scherzugversuchen wurde die Fügezonenschicht im Makromodell zunächst mit einem Annahmen basierten generischen Materialmodell definiert, um erste Simulationsstudien durchführen zu können. Nach Recherche und Gegenüberstellung unterschiedlicher Modellierungsmethoden und Materialmodelle fiel die Wahl des Materialmodells für die Fügezone zuerst auf den Typ *MAT_169/ *MAT_ARUP_ADHESIVE, der häufig zur Modellierung von Klebe- oder allgemeinen Fügeverbindungen eingesetzt wird. Um der in TailoredJoints-Verbindungen vorliegenden geringen Fügezonendicke numerisch gesehen besser gerecht werden zu können, erfolgte anschließend ein Wechsel auf das Materialmodell *MAT_240/ *MAT_COHESIVE_MIXED_-MODE_ELASTOPLASTIC_RATE. Entsprechend der geplanten

Kopf-/ Scherzug-Versuchslastfälle wurde das erstellte T-Stoß-Makromodell belastet und das Modellverhalten ausgewertet und plausibilisiert.

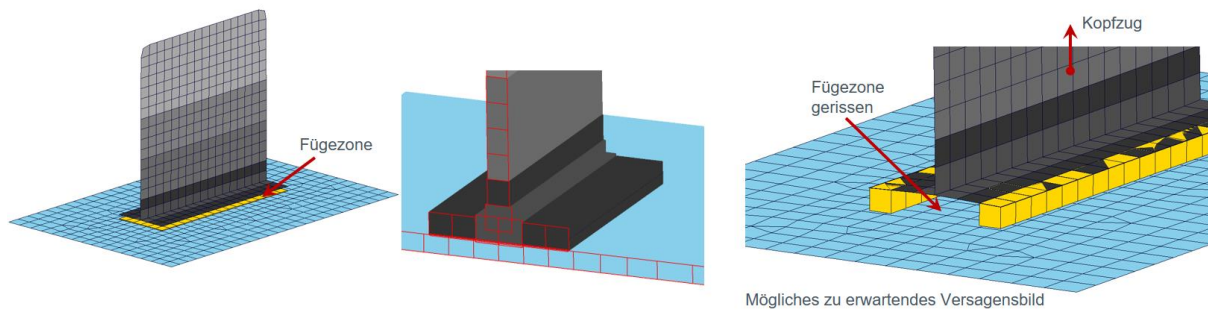


Bild 19: Makromodell der T-Stoß-Probe und Simulation im Kopfzuglastfall mit generischen Materialdaten

Nach Absicherung der grundsätzlichen Modellfunktionalität folgte anschließend der Übertrag erster Ergebnisdaten der Mikromodellsimulationen von CIKONI in das Makromodell. Hierbei galt es unter anderem, Spannungs-Dehnungs-Verläufe für Kopf- und Scherzug aus der Mikromodellsimulation abzuleiten und im Materialmodellformat *MAT_240 durch einen vereinfachten trilinearen Verlauf nachzubilden. Hierbei wurden auch maximale Spannungswerte für die Versagenseinleitung unter Zug- und Schubbelastung übertragen und die Ausbildung des Spannungsabfalls nach Versagensbeginn eingestellt, um innerhalb der Fügezone die Ausprägung eines Rissfortschritts zu steuern.

Die Ergebnisdaten der Mikromodellsimulation stellten das Kopf- und Scherzugverhalten in Form von Kraft-Weg-Kennungen dar, die für ein kleines Teilsegment mit 2-3 Feinstrukturierungen Gültigkeit haben. In der Übertragung dieser Daten in ein Makromodell wurde eine Umrechnung in Spannungs-Dehnungswerte notwendig, die die Skalierung und Anwendung auf großflächigere Strukturen erlauben. Ziel war die ersatzweise Abbildung der Feinstrukturierung durch ein homogenes Ersatzvolumen, das sich mit einer fest hinterlegten Materialkarte beliebig auf unterschiedliche Fügezonengrundflächen skalieren lässt, ohne hierbei eine Anpassung der Fügezonematerialdefinition an unterschiedliche Gesamtflächen vornehmen zu müssen. Für diesen Prozess wurde im Mikromodell eine Referenzfläche festgelegt, die zur Umrechnung der Kraft-Weg-Ergebnisse auf Spannungs-Dehnungs-Verläufe herangezogen wird und die Skalierung auf großflächigere Strukturen ermöglicht.

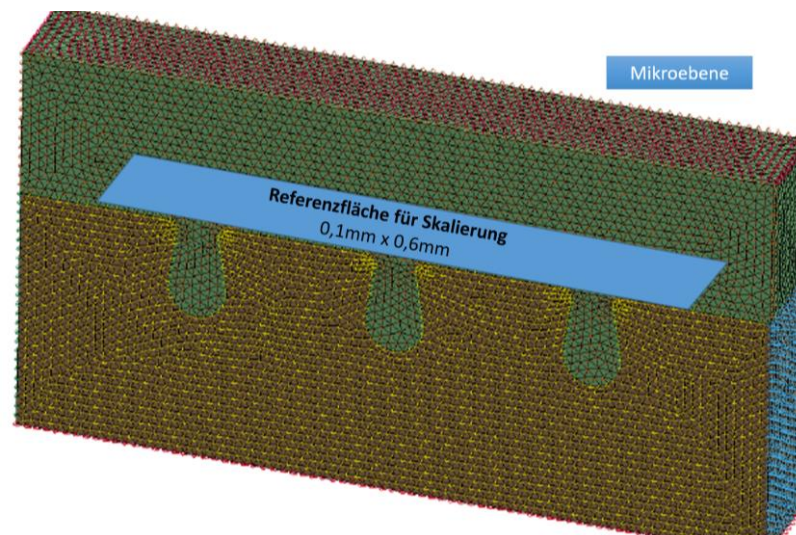


Bild 20: Festlegung einer Referenzfläche in Mikromodellnetz von CIKONI

Die Dicke der Fügezone im Makromodell wurde auf einen Ersatzwert von 0,1mm festgesetzt und die Dehnungsverläufe für diese Ersatzdicke kalibriert. Der Ersatzwert ist näherungsweise auf die Zone reduziert, die in der Mikromodellsimulation eine deutliche Deformation aufweist. Dies entspricht dem Materialbereich in direkter Nähe der Feinstrukturierungsverzahnung. Nach einmaliger Festlegung dieser Dicken-Ersatzwertes ist dieser in allen Makromodellsimulationen durchgehend fix zu halten. Eine virtuelle Skalierung der Fugeschichtdicke auf höhere oder niedrigere Werte würde die Gültigkeit der hinterlegten Materialparameter zur Folge haben. Die Größenskalierung darf nur in Längen- und Breitendimension der Fügefläche erfolgen. Sollten unterschiedliche Dickenkonfigurationen betrachtet werden, so wäre zunächst eine erneute

Mikromodellsimulation mit einer entsprechend veränderten Strukturierungstiefe notwendig, die dann in einem analogen Verfahren in ein weiteres neues Makromodell einfließen würde.

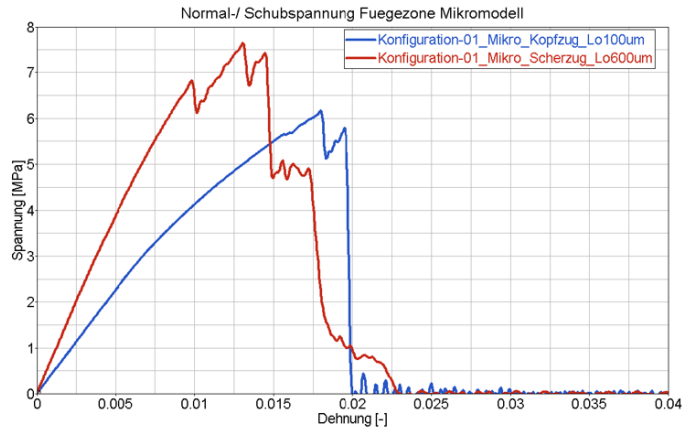
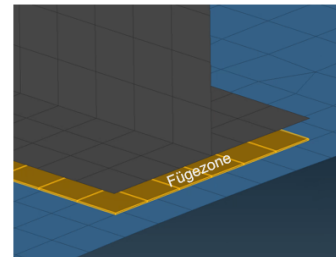
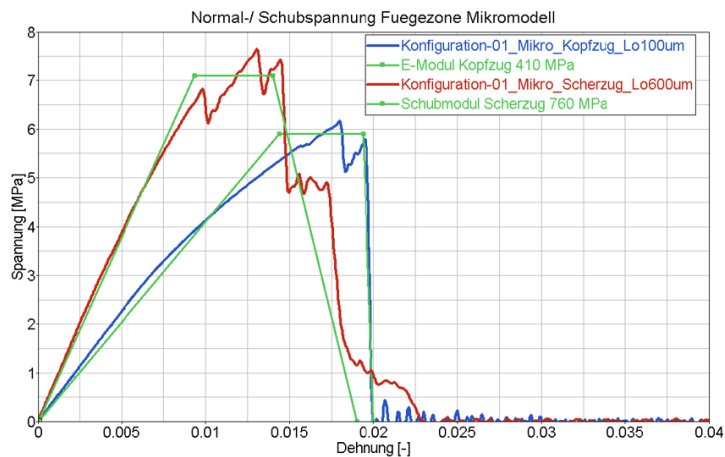


Bild 21: Ergebnisse der Mikromodellsimulation nach Umrechnung in Spannungs-Dehnungs-Verläufe

Für Zug- und Schubbelastung sieht das Materialmodell *MAT_240 jeweils eine separate Definition vor, die auch der unterschiedlichen Reaktion der Fügezone unter Kopf- und Scherzug entsprechend der Mikromodellsimulationen gerecht wird. Die ermittelten trilinearen Parametersätze für Zug und Schub wurden direkt in das Modellformat *MAT_240 übernommen.

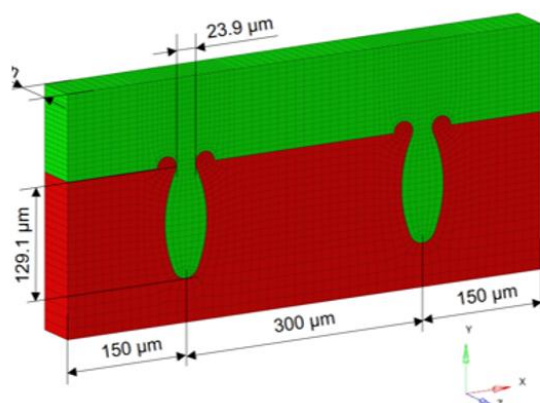


E-Modul Zug:	410 MPa
Schubmodul:	760 MPa
Zugfestigkeit:	5,9 MPa
Schubfestigkeit:	7,1 MPa

Bild 22: Trilineare Annäherung der Mikromodellergebnisse zur Definition des *MAT_240 Makromodells

Zur Kontrolle und Absicherung der Makromodelldefinition gegenüber der Mikromodellsimulation wurde in einem Mesomodell das Scheibensegment der Mikromodellsimulation mit identischen Randabmessungen nachgebildet, allerdings mit der Modellierungsmethodik der Makroebene. Der im Mikromodell durch viele sehr kleine Volumenelemente abgebildete Fügebereich wurde im Mesomodell durch nur 3 Elemente nachgestellt. Die beiden zu fügenden Werkstoffe PP GF30 und Stahl sind jeweils durch ein einziges Volumenelement abgebildet, während die Fügezone durch ein weiteres Element mit der Makromodell-Materialkarte *MAT_240 definiert ist. Auf diese Weise wird die Gesamtdimension des Mikromodells wiedergegeben und unter Belastung der beiden unterschiedlichen Modelle können anschließend die globalen Ergebnisse untereinander verglichen werden.

Mikromodell (CIKONI)



Mesomodell

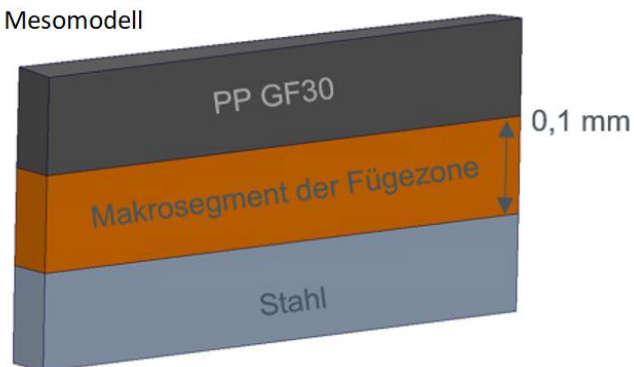


Bild 23: Abstraktion im Mesomodell zur Nachbildung des Fügeiteilsegments der Mikromodellsimulation

Die in der Mikromodellsimulation durchgeführten Lastfälle zur Aufbringung von Kopf- und Scherzugbelastungen wurden nach Einstellung der *MAT_240 Fügezonematerialkarte am Mesomodell wiederholt. Das Ergebnis der Mesomodellsimulation wurde den Verläufen der Mikromodellsimulation gegenübergestellt und weist eine gute Nachbildungs- bzw. Abstraktionsgüte auf.

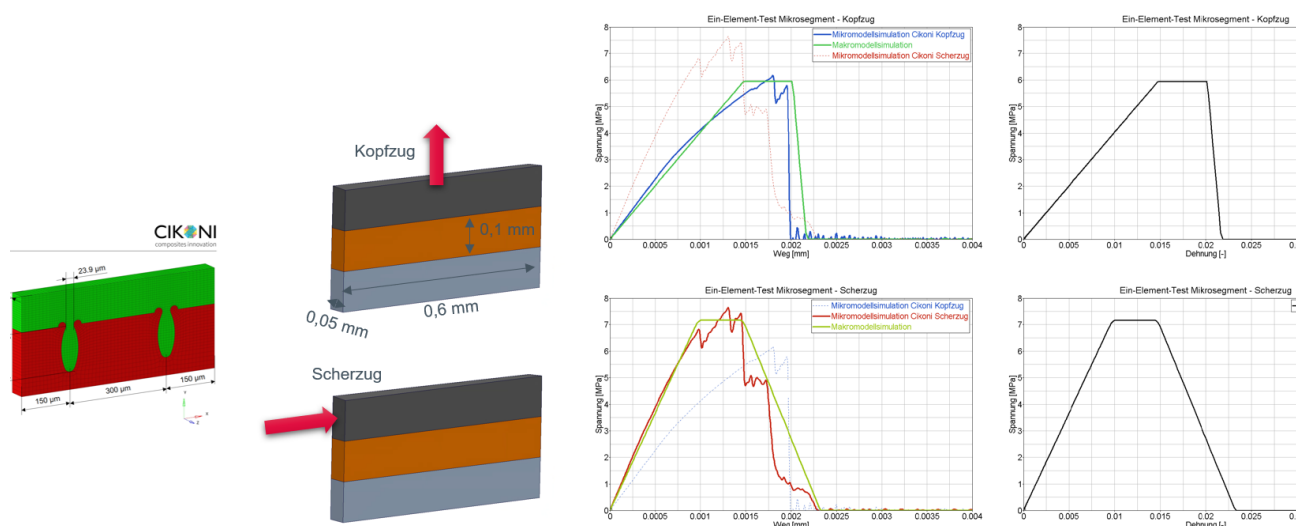


Bild 24: Abgleich der Mesomodellsimulationen gegenüber den Ergebnissen aus dem Mikromodell

Anschließend erfolgte die Simulation des so definierten Fügezonematerialmodells auf Makroebene anhand von Kopf- und Scherzugsimulationen mit der T-Stoß-Probe und wurde in diesen Lastfällen mit den entsprechenden quasistatischen Versuchsergebnissen verglichen. Die Makromodellsimulation weist hierbei ein wesentlich früheres Separieren der Fügeverbindung auf, als es im Versuch zu beobachten ist. Ursächlich kann u. a. die Verwendung des faserverstärkten Materials (PP GF30, 0°-Faserausrichtung) in der Mikromodellsimulation sein, während man aus der realen Fügeverbindung im Projektverlauf erfahren hat, dass die Kunststoffzapfen der Mikrostruktur nahezu keine Fasern beinhalten. Dadurch verhalten sich die Kunststoffzapfen in den Vertiefungen der Mikrostrukturierung in der Simulation spröder, was sich beim Übertrag der Ergebnisse aus den Mikromodellsimulationen in die Fügezonematerialdefinition des Makromodells ebenfalls abzeichnet. Der Übertrag der Mikromodellsimulationsergebnisse in ein Makromodell fand anhand der Fügeparameterkonfiguration 01 statt (Linearstruktur, Abstand 300 µm).

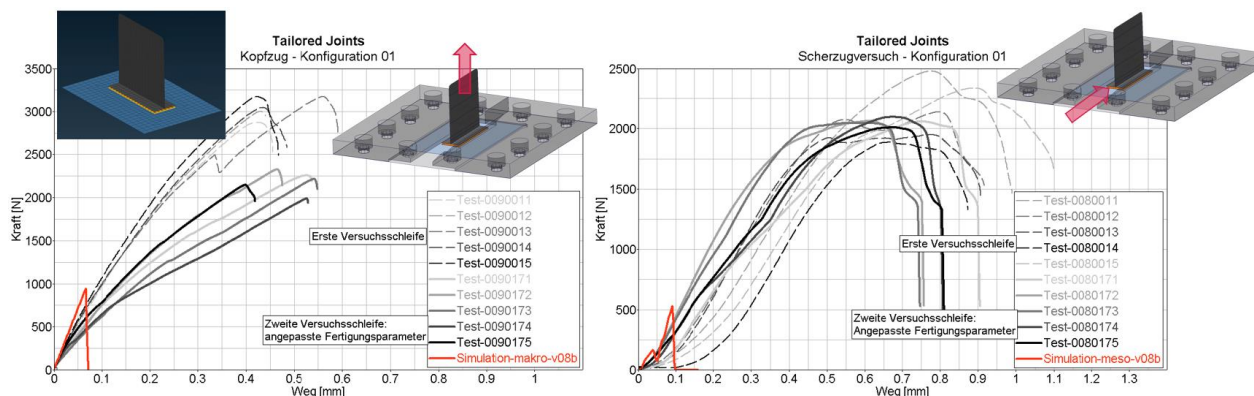


Bild 25: Versuchskorrelation Makromodell nach Definition entsprechend Mikromodellsimulationsergebnissen

Im weiteren Verlauf wurde die Fügezon-Materialkarte *MAT_240 anhand der T-Profil-Versuche iterativ nachkalibriert, um die Korrelation zum Versuch zu optimieren. Fokus lag hierbei auf einer Abbildung der Fügeparameterkonfiguration 05 (gekreuzte Struktur, Abstand 300 μm), da diese aufgrund ihrer günstigeren mechanischen Eigenschaften für den Einsatz am Demonstrator ausgewählt wurde.

In Simulationsstudien wurde zunächst die Sensitivität einzelner Parameter der *MAT_240 Materialkarte auf das Verhalten der gesamten T-Stoß-Probe überprüft, um sinnvolle Grenzbereiche für die iterative Parameterkalibrierung festzulegen. Modifiziert wurde hierbei unter anderem der Spannungsabfall nach Versagenseintritt, der einen Einfluss auf die Fortschrittschwindigkeit eines Risses in der Fügezone ermöglicht. Verglichen wurden sehr spröde Versagenseinstellungen, bis hin zu sehr duktilen. Dabei wurde sowohl die Spannungs-Dehnungs-Ausbildung im Meso-Scheibenmodell untersucht, wie auch die Korrelation globaler Kraft-Weg-Verläufe an der T-Profil-Probe gegenüber den Versuchsergebnissen.

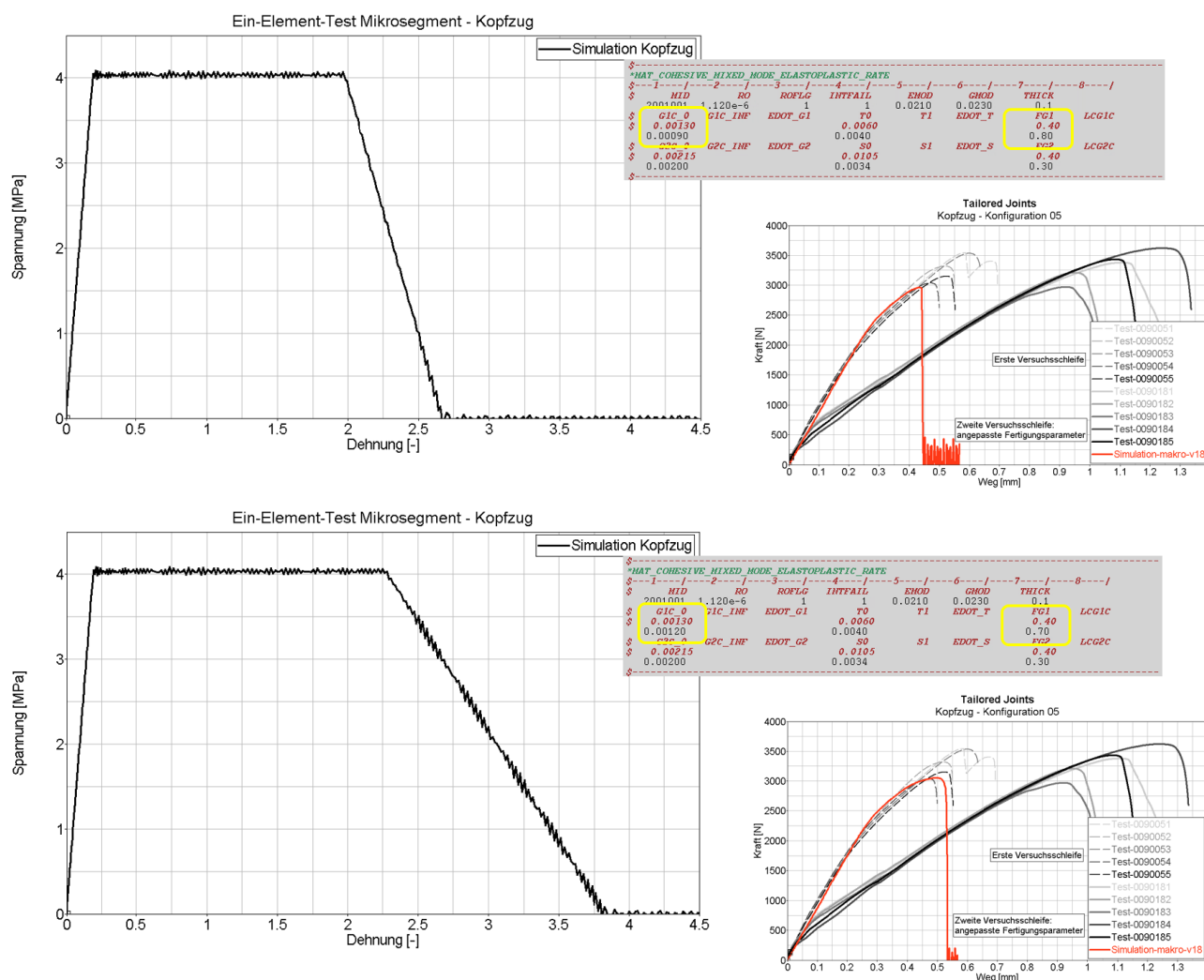


Bild 26: Parameterstudie zu Versagenseinstellung an Meso-Scheibenmodell und T-Profil

Weiterhin wurde der Einfluss unterschiedlicher Materialdefinitionen des Kunststoffprofils untersucht, während die Fügezonen- und Blechmaterialkarte nicht modifiziert wurde. Für das Profil wurde eine Materialkarte des Werkstoffs „Celstran PP-GF30-05 Blk“ eingesetzt. Durch den Faseranteil von 30% ist eine deutliche Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften von der Faserausrichtung in der Spritzgusskomponente zu erwarten. Da der Projektfokus auf einer Untersuchung der Fügezone lag, wurde das Kunststoffprofil vereinfachend mit einer isotropen Materialabbildung simuliert. Um trotzdem den möglichen Einfluss der Faserabhängigkeit auf das Gesamtverhalten der gefügten Probe abschätzen bzw. überprüfen zu können, wurde im Kopf- und Scherzuglastfall ein Vergleich drei unterschiedlicher isotroper PP-GF30 Materialkarten vorgenommen, die jeweils eine Faserausrichtung in 0°, 45° und 90° nachstellen. Dieser Vergleich auf Makroebene fand durch Materialkartenwechsel am Kunststoffprofil statt, während das Modell der Fügezone selbst unverändert blieb. Ein genereller Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Fügezone ist generell auch zu erwarten, wurde jedoch separat in einer Prinzipstudie beim Projektpartner CIKONI auf Mikroebene durchgeführt.

Entsprechend des typischerweise bei solchen Werkstoffarten vorliegenden Trends einer höheren Steifigkeit und geringeren Duktilität bei Belastung in Faserlängsrichtung (0°) im Vergleich zur Faserquerrichtung (90°), lag auch hier ein entsprechendes Gefälle zwischen den unterschiedlichen Materialkarten vor, das ein Spektrum der mechanischen Eigenschaften von teilweise fast bis zu Faktor 2 aufwies (E-Modul ca. 3.200-5.500 MPa). Obwohl sich die drei unterschiedlichen Materialkarten für das Kunststoffprofil damit sehr deutlich unterschieden, zeigte sich in der Simulation des Kopf- und Scherzuglastfalls bis zum Zerreißen der gefügten Kunststoff-Stahl-Probe nur ein abgeschwächter Einfluss auf die resultierende Kraft-Weg-Kennung. Die Bandbreite der generierten Simulationsergebnisse ist mit der Streubreite der Realversuche vergleichbar.

Eine wesentlich höhere Sensitivität des Fasereinflusses auf die Simulationsergebnisse wird jedoch in der Fügezone selbst vermutet, da diese das Separieren der gesamten Probe und damit das Einstellen der Maximalkraft und des maximalen Deformationsweges steuert.

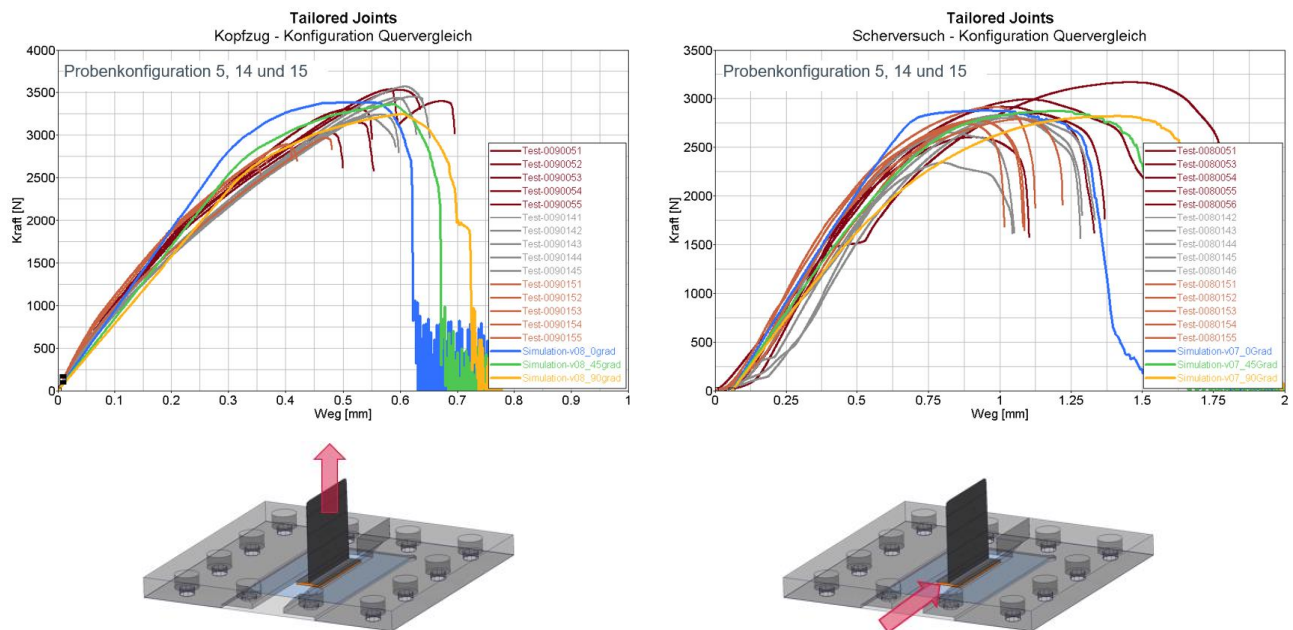


Bild 27: Parameterstudie mit unterschiedlichen Faserorientierungen der T-Profil-Materialkarte

In den Kopfzugversuchen am gefügten T-Profil hat sich gezeigt, dass eine Deformation sowohl in der Fügezone selbst, als auch im Kunststoffprofil stattfindet. Um hier detailliert zu überprüfen, ob die Materialdefinition des Profils diese Deformation in der Simulation nachstellen kann, wurde ausgehend vom Makromodell und CAD-Daten ein feinvernetztes Volumenelementmodell erzeugt. Dieses zusätzliche Modell ist mit Priorität zu einem besseren Verständnis der auftretenden Effekte im Versuch erzeugt worden und aufgrund des erhöhten Rechenaufwandes weniger für den Einsatz in Bauteilsimulationen vorgesehen.

Die Validierungssimulation wies nach visueller Bewertung im freien nicht eingespannten Bereich des Profilsteges eine geringere Deformation als der Versuch auf.

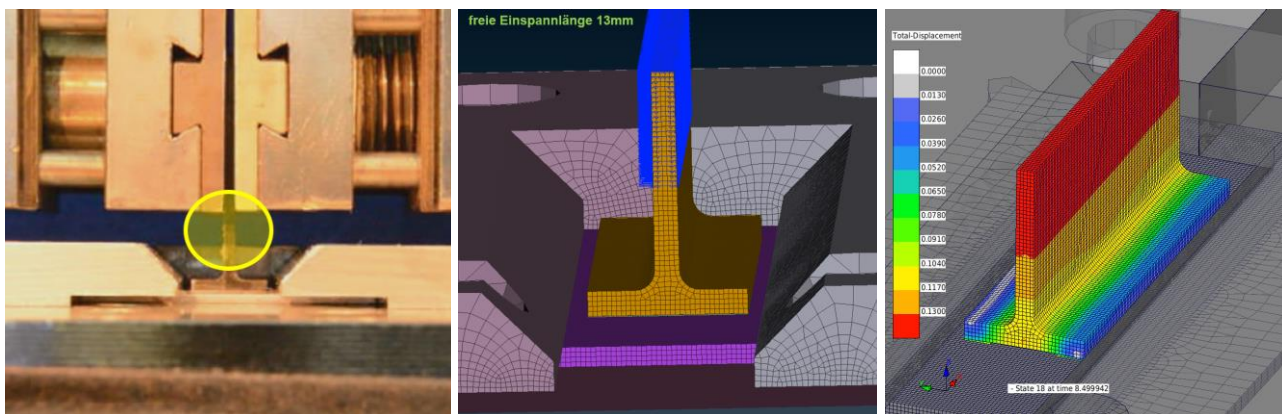


Bild 28: Stegdeformation und Nachstellung mit Volumenelemente-Detailmodell

Um die Gültigkeit der eingesetzten Kunststoff-Materialkarte zu überprüfen, wurden in zusätzlichen Zugversuchen Materialproben getestet, die im Steg des faserverstärkten Kunststoffprofil entnommen wurden. Von den sechs untersuchten Proben lieferten fünf Proben ein untereinander ähnliches Ergebnis auf einem höheren Steifigkeitsniveau. Eine einzige Probe reagierte deutlich weicher. Generell war aufgrund der Faserorientierung und der Faserdistribution eine erhöhte Streuung zu erwarten. Ein Grund zur Einstufung des weicheren Einzelversuchs als Ausreißer war nicht identifizierbar, weshalb sowohl entsprechend des weicheren Verlaufs, als auch des steiferen Verlaufs eine isotrope Materialkarte für den faserverstärkten Grundwerkstoff definiert und für Verifizierungssimulationen auf Makroebene eingesetzt wurde.

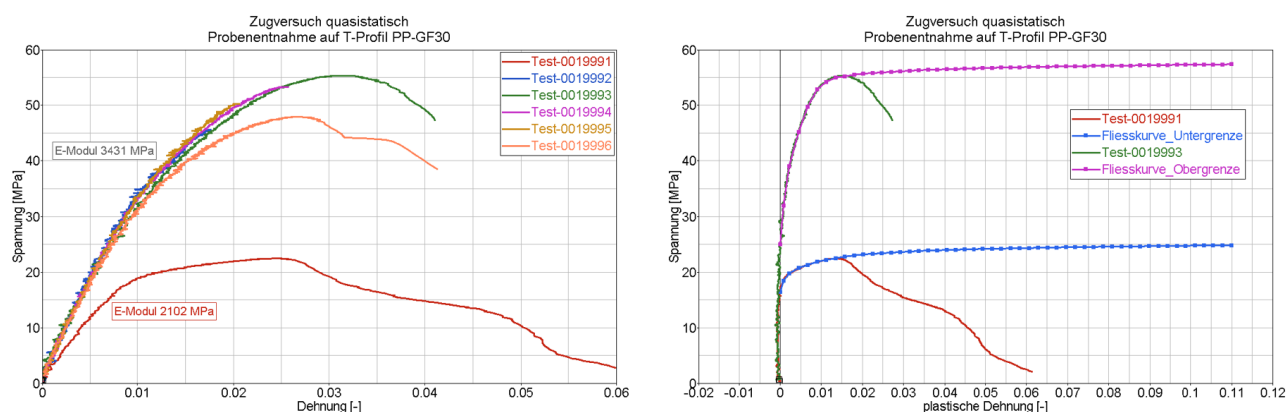


Bild 29: Ergebnisse Zugversuch an Steg und Materialkartendefinition für den Grundwerkstoff PP GF30

Im Quervergleich der ermittelten mechanischen Eigenschaften mit der allgemein im Projekt eingesetzten Materialkarte „Celstran PP-GF30-05 Blk“ lässt sich eine Ähnlichkeit der Materialkarte mit 45° Faserausrichtung zu dem Hauptband der 5 Zugversuche festhalten. Die einzige deutlich weicher reagierende Zugprobe weist auch insgesamt zu den Materialkarten unterschiedlicher Faserausrichtung ein wesentlich weiches Verhalten auf.

Bei Anwendung der beiden neu definierten Grundwerkstoff-Materialkarten entsprechend Ober- und Untergrenze des Streubereichs in den Korrelationssimulationen am T-Stoß-Profil stellte sich ein ausgeprägter Einfluss auf die maximal erreichbaren Gesamtkräfte heraus. Die Fügezone-Materialkarte wurde für diesen Vergleich nicht modifiziert bzw. kalibriert. Dies bedeutet, dass die maximal erreichbare Festigkeit und Duktilität einer Fügeverbindung auch vom Gleichgewicht der Steifigkeiten im Fügepartner und der Füge-Feinstrukturierung abhängt. Bei unveränderter Fugeschicht-Materialdefinition bewirkt ein steiferer Kunststoff-Fügepartner im Kopf- und Scherzug eine höhere maximal ertragbare Gesamtlast, während die Verbindung bei geringerer Gesamtdeformation separiert.

Korrelation Makromodell – Kunststoff PP-GF30 nach Zugtest Steg unterer Spannungsbereich, ohne Versagensdefinition

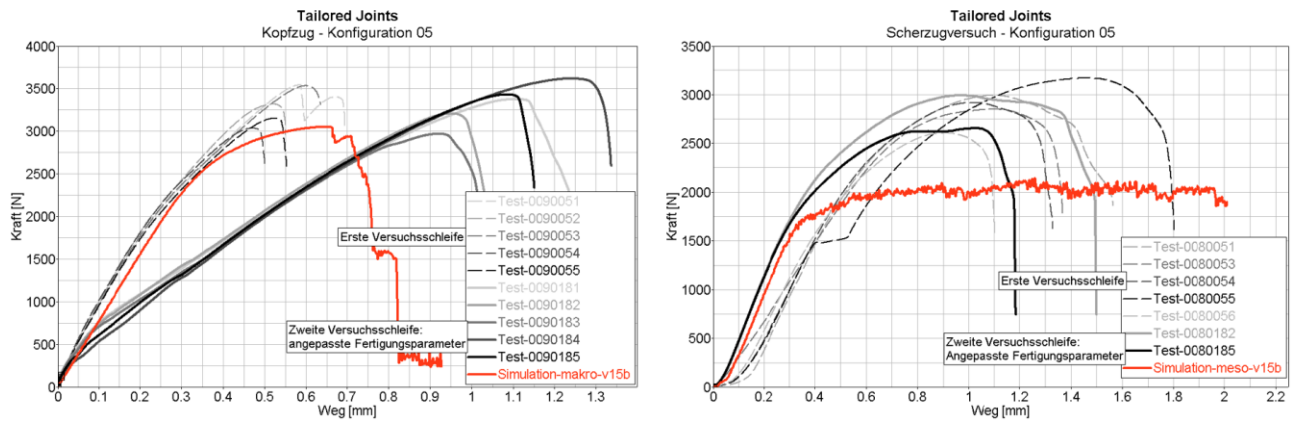


Bild 30: Simulationsstudie mit weich eingestelltem PP-GF30-Grundwerkstoff

Korrelation Makromodell – Kunststoff PP-GF30 nach Zugtest Steg oberer Spannungsbereich

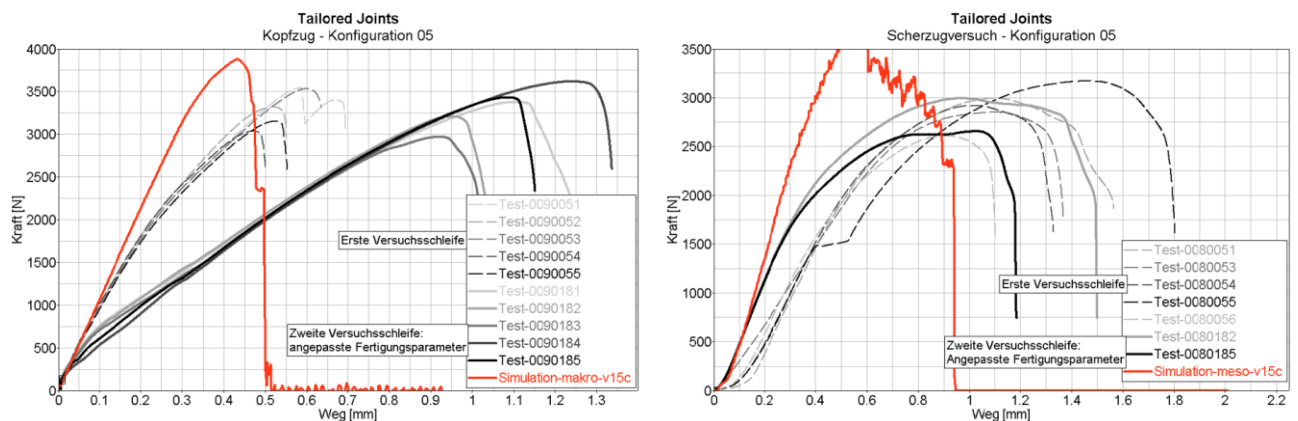


Bild 31: Simulationsstudie mit steif eingestelltem PP-GF30-Grundwerkstoff

Unter Einbeziehung eines zusätzlichen Schälzuglastfalls wurde schließlich eine abschließende Kalibrierung des Füge-Zonen-Materialmodells vorgenommen. Während unter Kopfzug die Korrelation zu der Versuchen der ersten Versuchsschleife gut eingestellt werden konnte, gelang dies im Scherzug hinsichtlich des Versagensweges nur bedingt. Bis zum vollständigen Zertrennen der Fügeverbindung im Realversuch findet ca. 0,6mm mehr Deformationsweg statt, als dies in der Makromodellsimulation der Fall ist. Analog zum festgestellten Einfluss einer Stegdeformation im freien Einspannbereich der Kopfzugproben ist daher das Auftreten einer Randdeformation im Realversuch denkbar, dass aufgrund der geringen Ausprägung von nur ca. 0.6mm bisher nicht erkannt wurde. Um solche Effekte in zukünftigen Versuchen bzw. Projekten auszuschließen, ist zusätzlich zu den globalen Messungen im Versuch eine lokale Deformationsmessung ratsam, z. B. über eine optische Punktverfolgung auf Probenbereichen nahe der Fügezone.

Der Korrelationskompromiss wurde daher im Scherzug auf ein Nachbilden der Maximalkraft eingestellt und auch unter Anbetracht einer allgemeinen Überzeichnung im Schälzug nicht zu unphysikalisch hohen Versagenseinstellungen gezwungen.

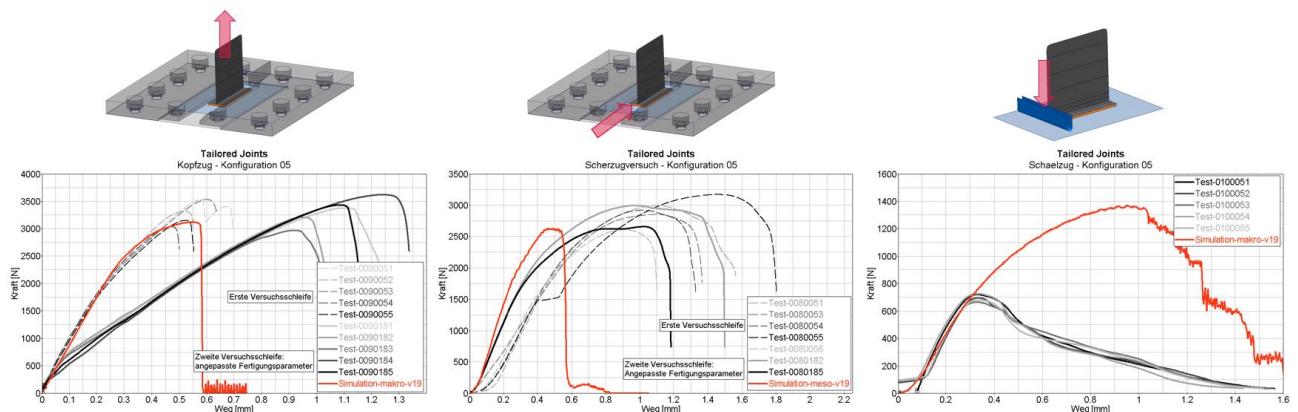


Bild 32: Korrelation kalibriertes Makromodell in Kopf-, Scher- und Schälzug (3,0 mm Fügezonenkantenlänge)

Unter Schälbelastung ist generell in der flächigen Fügeverbindingssimulation mit Makromodellen ein häufiges Überzeichnen der Rissentstehung bzw. -ausbildung verbreitet. Die maximale Materialbelastung in der Fügezone liegt bei Einbringen einer schälenden Belastung häufig an der Außenkante der Fügezone vor und ist dort kleinräumig stark überhöht. Mit gängigen Elementkantenlängen der Makromodellierung können die hier entstehenden Spannungsspitzen nur angenähert werden. Dies hat zur Folge, dass die Rissinitiierung verzögert beginnt und eine höhere Losbrechkraft erfordert. Durch lokal feinere Vernetzung kann dieser Effekt reduziert werden, was anhand der Schälzugprobe mit einem Fügezonennetz von ca. 0,7mm bestätigt wurde, im Vergleich zur angestrebten Kantenlänge von 3mm.

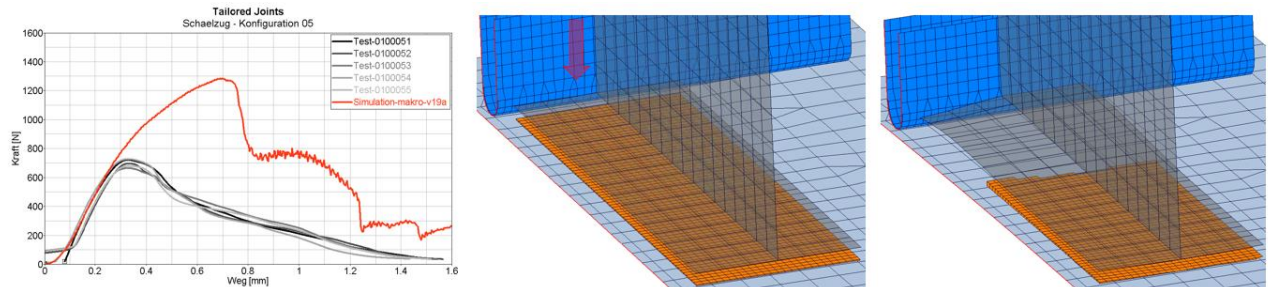


Bild 33: Korrelation Schälzug bei feinerer Vernetzung (0,7 mm Fügezonenkantenlänge)

5.5. Übertragung der Ergebnisse auf die Herstellung eines Demonstratorbauteils (AP5)

Als Demonstratorkomponente wurde im Projekt eine E-Pump aus dem Produktportfolio von Faurecia ausgewählt, deren konventionelle Fügemethodik durch den Einsatz der Tailored Joints Fügetechnik ersetzt werden sollte. Diese elektrische Sitzverstellung besteht unter anderem aus einem Kunststoffgehäuse (im Förderprojekt glasfaserverstärktes Polypropylen), das den elektrischen Verstellmotor und ein Getriebe aufnimmt und an eine Stahl-Adapterplatte fixiert ist, die wiederum an die Sitzstruktur montiert wird. Das komplexe Verstellmodul wurde mit Fokus auf eine Untersuchung der Fügetechnik in der Überführung in einen Demonstrator auf das Kunststoffgehäuse und die Adapterplatte reduziert.

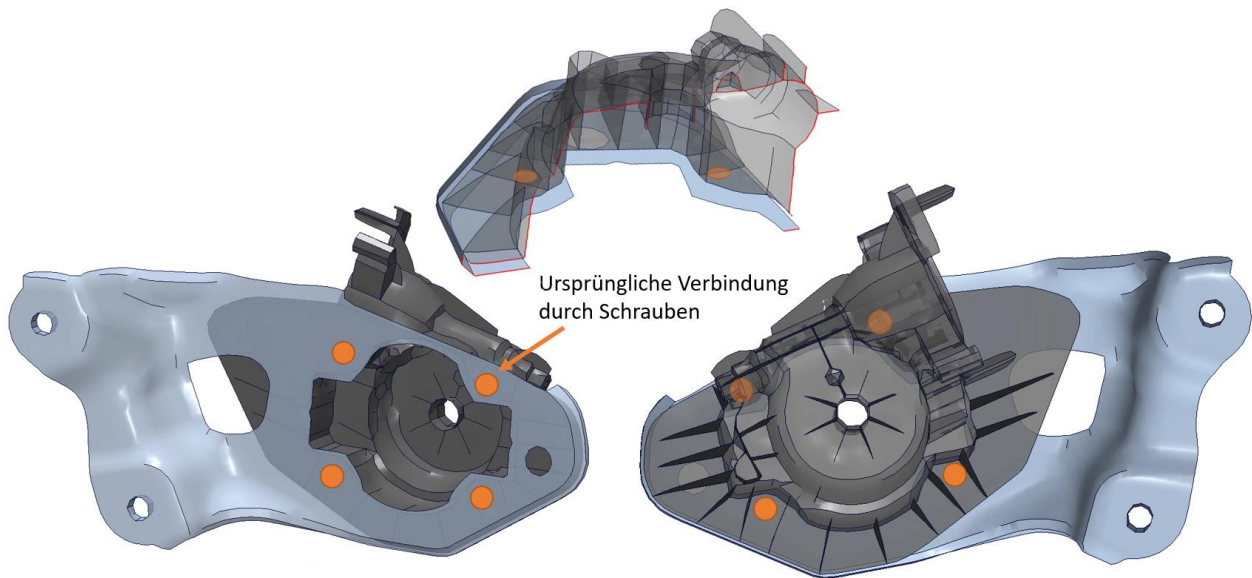


Bild 34: Reduziertes E-Pump-Modul bestehend aus Kunststoffgehäuse und Adapterplatte

In Zusammenarbeit mit Faurecia wurde zunächst die Belastungssituation eines E-Pump-Moduls in der Gesamtfahrzeugumgebung analysiert und die Herausforderungen an die Fügetechnik erörtert. Das aktuelle Serienprodukt E-Pump stellt die Kopplung zwischen Kunststoffgehäuse und Adapterplatte über vier Schraubverbindungen und zwei zusätzliche Pins des Kunststoffgehäuses dar. Die vier vorliegenden Schraubverbindungen und zwei Pins galt es, durch eine ausreichend große Tailored Joints Fügetfläche zu ersetzen. Hierbei waren bauraum- und fertigungstechnische Restriktionen einzuhalten, die keine unbeschränkt große Dimensionierung des Fügetflansches zuließen.

Basierend auf der Projekterfahrung von Faurecia wurde unter anderem ein Heckcrashlastfall am Gesamtfahrzeug als besonders intensiver Lastfall für die Fügeverbindung der E-Pump-Bestandteile identifiziert. In den konventionellen Schraubverbindungen können hierbei Axialbelastungen von ca. 2-6 kN und Scherbelastungen von ca. 1-2 kN auftreten und am Gehäuse ein Drehmoment von ca. 300 Nm anliegen. Diese Belastungen unterliegen im Crashlastfall einer zeitlichen Abhängigkeit und resultieren vor allem aus der Massenträgheit des gesamten Sitzes mit Insassen, der im Crashlastfall hohen Beschleunigungen unterliegt. Hierbei treten auch Deformationen an der E-Pump ein, z. B. an der Adapterplatte, die eine Wechselwirkung mit der Fügeverbindung hervorrufen. Somit ist eine ungleichmäßige Lastverteilung über den gesamten Fügebereich zu erwarten, was sich in einer Auswertung der 4 einzelnen Schrauben auch in Form von unterschiedlichen Kraftmaxima bestätigte.

Um die komplexe Situation aus einer Gesamtfahrzeugumgebung für die zu erarbeitende Demonstratorkomponente zu vereinfachen, wurde der Fokus auf das auftretende Drehmoment von 300 Nm gesetzt und ein Ersatzlastfall in der Finite Elemente Simulationssoftware LS-Dyna definiert, der dieses Drehmoment am Gehäuse entstehen lässt. Die Stahl-Adapterplatte ist dazu an ihren drei vorgesehenen Kopplungszonen zur Sitzstruktur fixiert, während am Gehäuse zentrisch eine ideale Drehbewegung aufgebracht wird. Die Materialeigenschaften von Kunststoff und Stahl sind dabei elasto-plastisch definiert, jedoch vereinfachend dehnratenunabhängig angenommen.

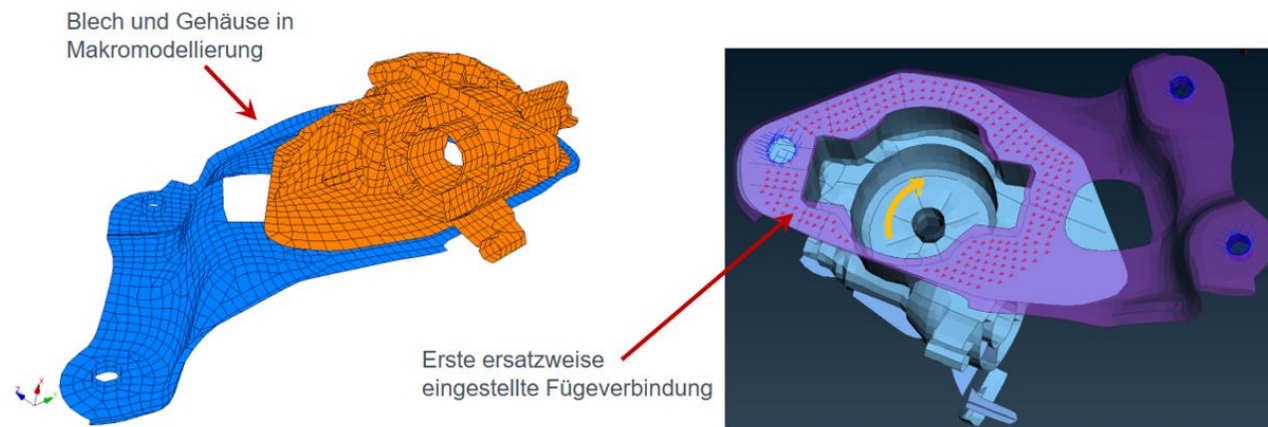


Bild 35: Demonstrator-Makromodell E-Pump-Modul im Drehmoment-Ersatzlastfall

Bei der Erstellung der Demonstrator-Simulationsmodelle griff EDAG auf die Modellierungsmethodik zurück, die im Rahmen der Makromodellerstellung in AP4 genutzt und optimiert wurde. Die Erzeugung eines entsprechenden Finite-Elemente-Modells beruht auf Ableitung einer vereinfachten Bauteilgeometrie aus CAD-Daten und Kopplung der beiden zu fügenden Bauteile mittels des in AP4 definierten Fügezonen-Ersatzmodells.

Die Bauteilgeometrie ist hierbei durch 2D-Schalenelemente mit einer Kantenlänge von ca. 2-4mm abgebildet, um einen Auflösungsgrad anzuwenden, der noch in komplexen Gesamtfahrzeugmodellen einsetzbar ist und mit wirtschaftlich sinnvollem Rechenaufwand Crashesimulationen auf Fahrzeugebene zulässt, der aber auch bei Simulation der T-Stoß-Proben aus AP3/4 eine ausreichende Abbildung der kleinräumigeren Probenstruktur ermöglicht. Modelldetails wie z. B. kleine Radien werden dabei nur angenähert.

In der Herleitung des Ersatzlastfalls und unter Anwendung des ersten von Faurecia bereitgestellten CAD-Datensatzes des Demonstrators wurde die Kopplung zwischen Gehäuse und Adapterplatte zunächst idealisiert durch eine numerische TIE-Kontaktverbindung hergestellt, die zwischen den Fügepartnern keine Relativbewegung und kein Separieren zulässt. Die zur Verfügung stehende mögliche Fügefläche wurde dabei nicht vollständig ausgenutzt, um sich im Projektverlauf iterativ einer minimal notwendigen Gesamtfügefläche anzunähern.

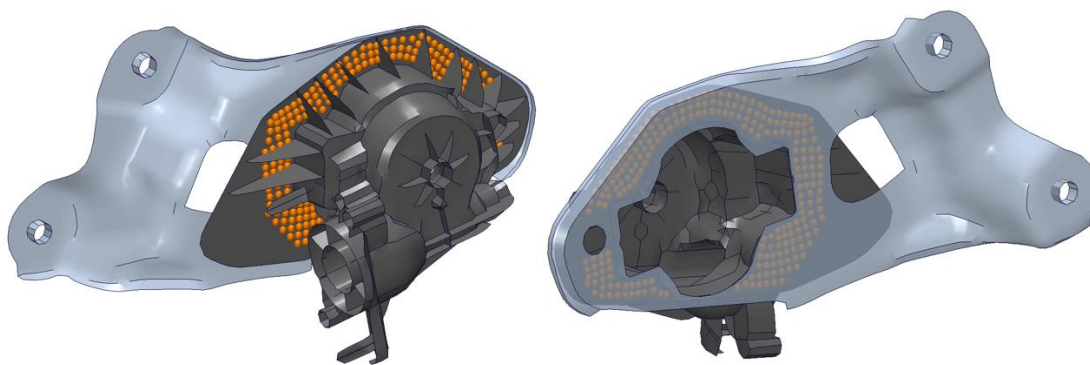


Bild 36: Erster Entwicklungsstand des Demonstrator-Makromodells mit TIE-Fügeverbindung

Bereits im ideal rotationssymmetrischen Verdrehlastfall zeigte sich hierbei eine ungleichmäßige Spannungsverteilung im Bereich der Fügezone, die auf der nicht rotationssymmetrischen Geometrie von Adapterplatte und Gehäuse beruht, sowie auf der ungleichmäßigen Breite der Fügezone bzw. des Fügeflansches. Hintergründe zur nicht homogenen Lastverteilung und Möglichkeiten zur Optimierung wurden gemeinsam im Projektverbund erörtert, jedoch vor allem (geometrische) Restriktionen des Moduleinsatzes in der Fahrzeuganwendung als Hauptkriterium gegen eine wesentliche Veränderung der Flanschzone festgestellt. Auffällig war hierbei vor allem die einseitig schmale Stegbreite an der Stahl-Adapterplatte, die kleinräumig die Fügung nahezu unterbricht. Da solche Restriktionen in Bauteilanwendungen häufig anzutreffen sind und die Möglichkeiten zur Anwendung der Tailored Joints Fügetechnik im Rahmen der Projektdurchführung zu prüfen sind bzw. auch Grenzen aufzuzeigen sind, wurde die Inhomogenität der Fügeflächenbreite am Demonstrator beibehalten und auch letztendlich an den Realkomponenten umgesetzt.

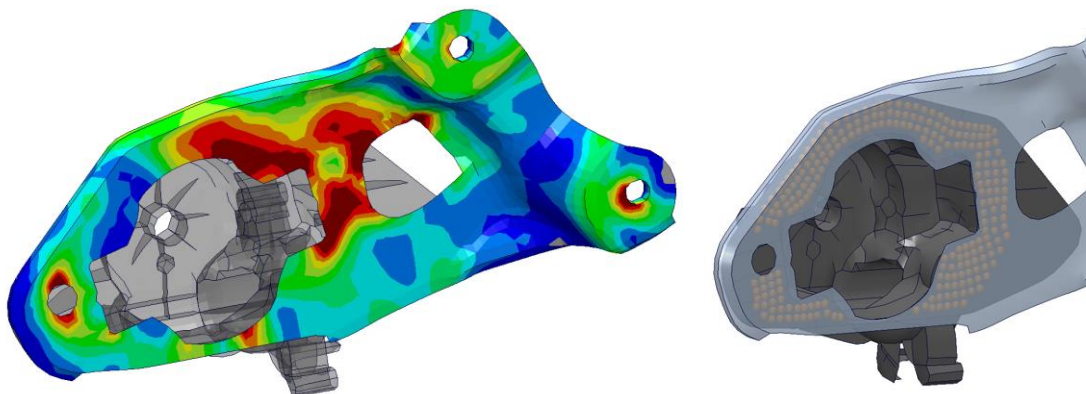


Bild 37: Von-Mises-Spannungsverteilung in der Adapterplatte im Verdrehlastfall

Mit der Feinabstimmung der Demonstratorgeometrie stellte Faurecia weitere CAD-Daten bereit, die in erneute Simulationsschleifen im Drehmoment-Ersatzlastfall überführt wurden. Hierbei wurde die Fügezone numerisch deformierbar eingestellt und inklusive Versagenskriterien definiert, indem das Materialmodell `*MAT_240/*MAT_COHESIVE_MIXED_MODE_ELASTOPLASTIC_RATE` zur Beschreibung der Tailored Joints Fügefläche angewendet wurde. Die mechanischen Eigenschaften dieses Fügezonenmodells wurden zunächst entsprechend der Fügekonfiguration 1 definiert, indem die Fügeigenschaften der Mikromodellsimulation von CIKONI eingestellt wurden.

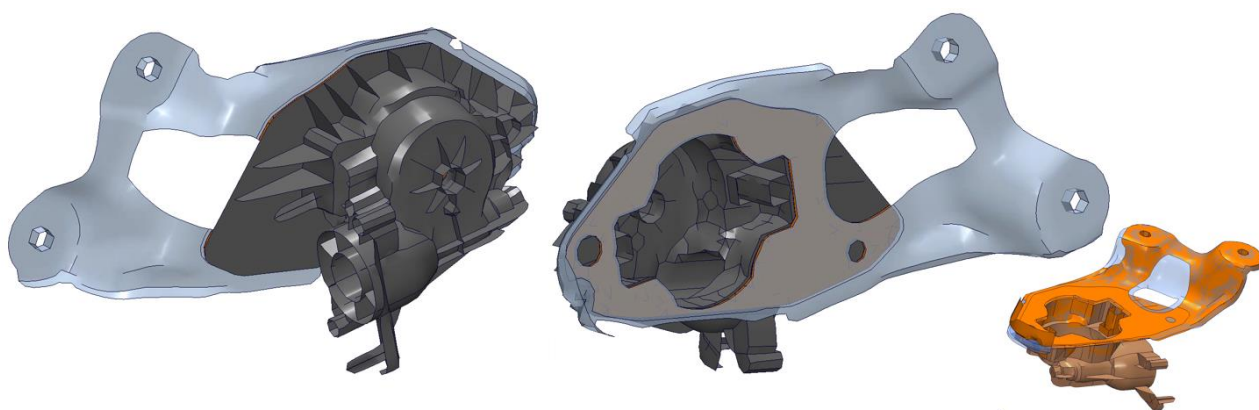


Bild 38: Ausgearbeiteter Stand des Demonstrators/ Vergleich mit erstem Modellstand

Auch in diesem Modellstand und mit einer umsetzbar eingestellten Fügeflächengeometrie bestätigte sich die Inhomogenität der Spannungsverteilung. Am schmalen spitzen Auslauf der Adapterplatte tritt eine Spannungskonzentration ein, die für eine intensive und kleinräumige Lastübertragung in der Fügezone spricht. Im gegenüberliegenden Bereich am breiten Auslauf der Adapterplatte liegen dagegen niedrigere Spannungsbelastungen in der Fügezone vor. Hier konnte die Fügefläche aufgrund der größeren Überdeckung von Gehäuseflansch und Adapterplatte maximiert werden, wodurch die Lastübertragung auf eine größere Fläche verteilt werden kann und die lokale Spannungsausprägung damit sinkt. In weiteren Simulationsstudien wurden Möglichkeiten zur Reduktion der Fügeflächenausweitung in dieser weniger stark belasteten Zone analysiert.

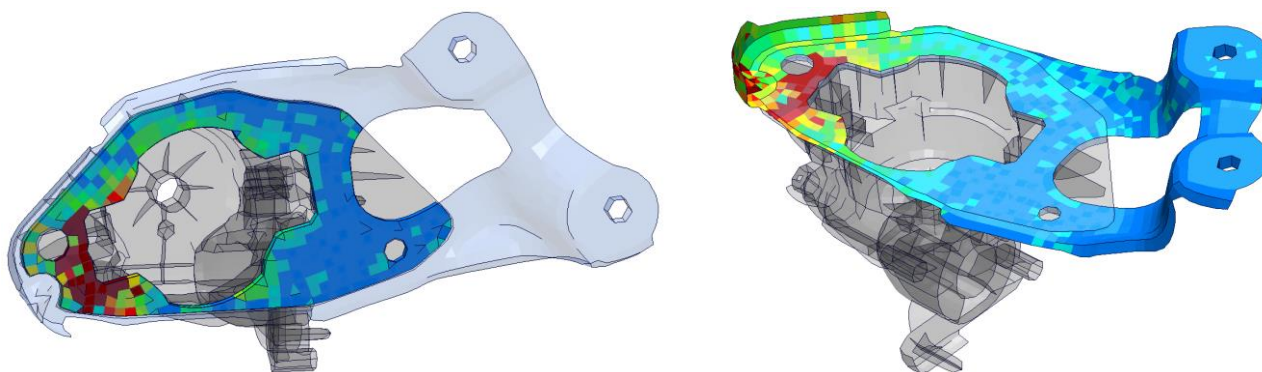


Bild 39: Von-Mises-Spannungsverteilung in Fügezone und Adapterplatte an finaler Demonstratorgeometrie

Im späteren Projektverlauf fiel unter Einfließen von Erkenntnissen aus realen Abzugsversuchen die Auswahl der optimalsten Fügepaarung zu Konfiguration 5 (gekreuzte und feine Strukturierung), die anschließend auch in der Herstellung der realen Demonstratorkomponenten umgesetzt wurde. In den zentralen Entwicklungsstufen des Demonstrators wurde aus dem LS-Dyna-Makromodell durch Konvertierung ein Abaqus-Modell abgeleitet, das dem Projektpartner MSE für Simulationsstudien zu Spannungsverteilung und Belastungstyp in der Fügezone übergeben wurde.

Zum Entwicklungszeitpunkt der Demonstrator-Fein- und -Grobgestalt lag das Makromodell durch einen zeitlichen Verzug in der Laborprobenherstellung noch nicht in seiner abschließend validierten Form vor. Das Fügezonverhalten wurde daher anhand von ersten Prüfergebnissen im Rahmen der Möglichkeiten im Modell zunächst grob eingestellt. Im späteren Projektverlauf wurde parallel zur laufenden Demonstratorfertigung die Simulation des Demonstrators mit fein abgestimmtem Makromodell wiederholt.

Durch Integration einer Versagensdefinition in der *MAT_240-Fügezonmaterialkarte ließ sich das Aufreißen der Fügezone simulieren und das dabei entstehende maximal übertragbare Drehmoment bewerten. Im idealisierten simulativen Verdrehlastfall wurden mit unterschiedlichen Modellständen (Gehäuse-/Adapterplattegeometrie, Fügezonmaterial,...) wiederholt maximale Drehmomente im Bereich von ca. 300 Nm identifiziert, was dem ursprünglich definierten Lastenheftwert entspricht. Hierbei weist auch das glasfaserverstärkte Polypropylen in der Gehäusestruktur lokal hohe Belastungen auf, die in der Simulation teilweise zu einer Rissbildung im Gehäuse geführt haben, während zeitgleich die Fügezone separiert. Da das mechanische Werkstoffverhalten des Gehäuses hinsichtlich Faserverteilung und -ausrichtung mit der gewählten isotropen Simulationemethode nur angenähert werden kann, wurde als Robustheitsanalyse die Simulation auch mit modifizierter Gehäuse-Materialkarte durchgeführt, in der die Versagensdefinition deaktiviert wurde. Dadurch wird ein reines Separieren in der Fügezone herbeigeführt, während im Gehäuse kein Materialversagen stattfinden kann. Das maximal übertragbare Drehmoment liegt dabei geringfügig höher im Vergleich zur Simulation mit Rissbildung im Gehäuse und erfüllt weiterhin den Lastenheftwert.

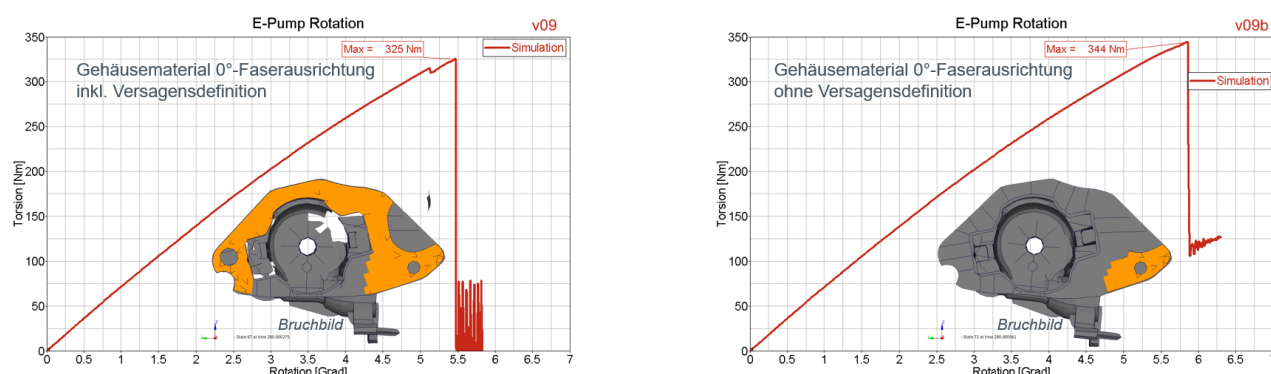


Bild 40: Drehmoment-Reaktionskurve im Verdrehlastfall und Versagensausbildung

In der Übertragbarkeit der hier bestätigten Bauteilfunktionalität in einem einzigen ausgewählten Ersatzlastfall auf die vielfältigen Belastungssituationen eines realen Bauteils sind weitere Einflussgrößen einzubeziehen. Im Rahmen des Verbundprojekts wurde die werkstofftechnische Betrachtung auf eine quasistatische Situation reduziert. Bei dynamischer Belastung, z. B. in Craschanwendungen, ist allgemein eine Werkstoffversprödung zu erwarten. Dies kann zur Folge haben, dass die Fügeverbindung weniger deformierbar reagiert, bis der Separiervorgang einsetzt und das maximal übertragbare Drehmoment dadurch geringfügiger ausfällt. Auch der Rissfortschritt innerhalb der Fügefläche nach einem ersten Anriss kann abrupter stattfinden. Weiterhin kann ein Deformieren der Fügepartner eine Reduktion der maximal möglichen Tragfähigkeit der Fügeverbindung hervorrufen. Die Adapterplatte des Demonstrators ist im montierten Zustand an einen Sitz im Fahrzeugcrashlastfall einer Deformation ausgesetzt, deren Ausprägung vom Zusammenspiel vieler Einzelkomponenten innerhalb des Fahrzeugs abhängt. Bei hoher Deformation der Adapterplatte ist der zusätzliche Eintrag einer schälenden Belastung in die Fügezone möglich, der zu einem früheren Separieren führen kann, als unter der idealen scheren Belastung des simulierten Verdreh-Ersatzlastfall. Gemeinsam mit dem Projektpartner Faurecia wurde die Deformation der Adapterplatte in einer Gesamtfahrzeugcrashsimulation betrachtet und die hier vorliegende geringe Deformation im Fügezonbereich als vernachlässigbar innerhalb der Ziele des Forschungsprojekts eingestuft. Generell wurde jedoch auch festgehalten, dass ein verändertes Strukturverhalten des gesamten Sitzes eine stärkere Deformation der angeschraubten Adapterplatte mit sich bringen kann.

Für die Anwendung der hier erarbeiteten Methodik in einer allgemeinen Produktentwicklung bedeutet dies, dass die Prüfung der Verbindungstechnik auf Coupon-Ebene (T-Stoß-Probe im Kopf-/ Scher-/ Schälzug) ggf. entsprechend der zu erwartenden Belastung am Bauteil auszuweiten ist. Für den Fall einer Craschanwendung wären zum Beispiel zusätzlich zu den umgesetzten quasistatischen Versuchen auch entsprechende dynamische Versuche durchzuführen. Die dabei ermittelten mechanischen Eigenschaften sind dann in die

Makromodelle zu integrieren und die erstellten Modelle anhand der durchgeführten Versuche zu validieren. Das gewählte Fügezonen-Materialmodell *MAT_COHESIVE_MIXED_MODE_ELASTOPLASTIC_RATE lässt sich hierzu durch Definition der Dehnratenabhängigkeit erweitern. Abschließend sind mit den so abgestimmten Modellen die entsprechenden Lastfälle am Bauteil zu simulieren und hierbei die Funktionalität der Fügeverbindung abzusichern bzw. ggf. Fügeverbindung und/ oder Komponente zu optimieren. Für die Demonstratorkomponente E-Pump wäre zum Beispiel dann auch die Simulation im verbauten Zustand am Gesamtfahrzeug in unterschiedlichen Crashlastfällen zu betrachten (Front-, Heck-, Seitencrash/ europäische Lastfälle, asiatische Lastfälle, ...).

Im Rahmen des Forschungsprojektes war die Reduktion dieser komplexen Auslegungsvielfalt auf einen Ersatzlastfall notwendig, um pragmatisch und wirtschaftlich die grundsätzliche Methodik zu erarbeiten und darzustellen.

Aufgrund dieser hier aufgeführten Einschränkungen wurde für die Umsetzung des realen Demonstrators die maximal mögliche Strukturierungsfläche (Vollstrukturierung) ausgewählt und umgesetzt. Durch virtuelle Simulation wurden zusätzlich unterschiedliche Varianten einer Teilstrukturierung verglichen und bewertet.

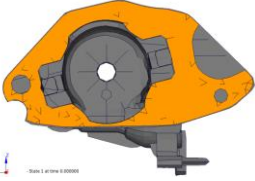
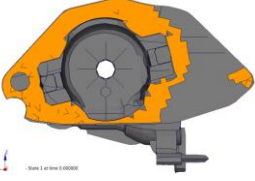
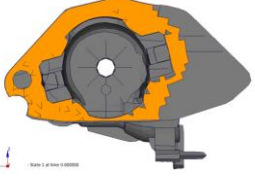
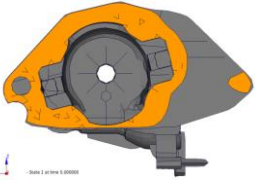
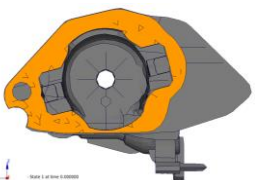
Fügeflächengröße	Drehmoment inkl. Versagensdefinition Gehäuse	Drehmoment ohne Versagensdefinition Gehäuse
Fügefläche vollstrukturiert (=Referenz) 	325 Nm (Referenz)	344 Nm (Referenz)
Fügefläche teilstrukturiert: „Grenzwert 21.0“ 	312 Nm (96 %)	331 Nm (96 %)
Fügefläche teilstrukturiert: „Grenzwert 21.0 + Reduktion“ 	312 Nm (96 %)	322 Nm (94 %)
Fügefläche teilstrukturiert: „Grenzwert 21.0 – Kanten geglättet“ 	319 Nm (98 %)	-
Fügefläche teilstrukturiert: „Grenzwert 21.0 + Reduktion – Kanten geglättet“ 	310 Nm (95 %)	-

Bild 41: Ergebnisübersicht Drehmoment-Ersatzlastfall mit unterschiedlichen Strukturierungsflächen

Die reduzierten Vorschlagsflächen der Teilstrukturierungskonzepte wurden durch MSE erarbeitet und von EDAG in die Drehmomentsimulationen des Demonstrators integriert und analysiert.

Trotz deutlicher Reduktion der Fügefläche wurde generell nur ein geringfügiger Abfall des übertragbaren Drehmoments verzeichnet und somit die grundsätzliche Reduzierbarkeit der Fügefläche für den betrachteten Lastfall in Aussicht gestellt. Als besonders robust zeichnete sich hierbei die Variante „Grenzwert 21.0“ ab, die mit einer glatten Fügezonenußenkante und zwei Teilzonen ein Drehmoment von 98 % gegenüber dem vollstrukturierten Referenzkonzept aufweist. In Vergleich der Spannungsverteilungen wird die Erfolgsgüte dieser Teilstrukturierung sichtbar, da die zuvor schwach belasteten Zonen aus der Fügefläche entfernt wurden und sich nun über die gesamte Restfläche der Fügezone eine homogene Spannungsverteilung darstellt.

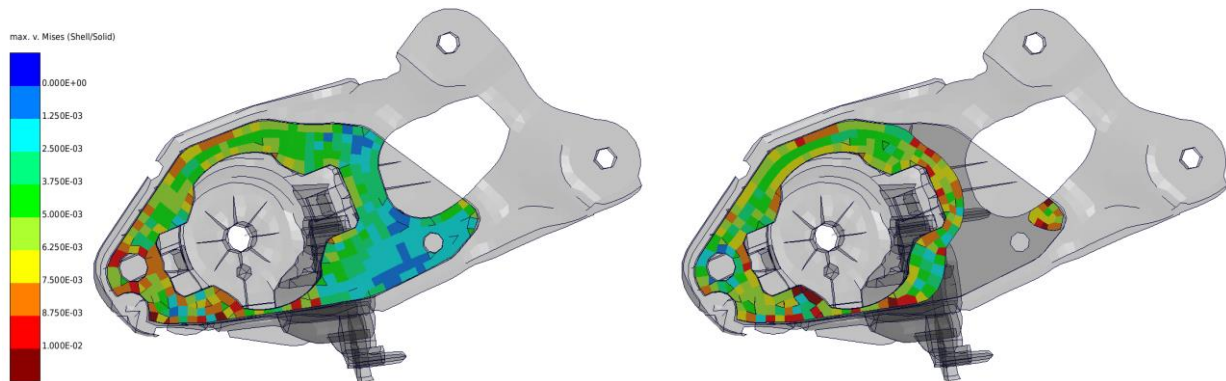


Bild 42: Spannungsverteilung in günstigster Teilstrukturierung im Vergleich zur Vollstrukturierung

Der hergestellte Demonstrator wurde durch den Projektpartner Faurecia in unterschiedlichen Lastfällen geprüft. Unter Teilnahme aller Projektpartner wurde unter anderem ein Schlittentest an einer Sitzstruktur mit Dummy durchgeführt, um auf Komponentenebene einen Fahrzeugcrash nachzustellen. Der E-Pump-Demonstrator war hierbei an der Sitzstruktur montiert und wurde dabei einer dynamischen Belastung unterzogen, die in einem Gesamtfahrzeugcrash entstehen würde. Unter Bewertung der hierbei auftretenden Drehmoments am Demonstratorgehäuse war in Orientierung an die zuvor durchgeführten quasistatischen Simulationen im idealen Demonstrator-Drehmomentlastfall ein Standhalten der TailoredJoints-Fügeverbindung zu erwarten. Tatsächlich trat ein Separieren der Verbindung auf.

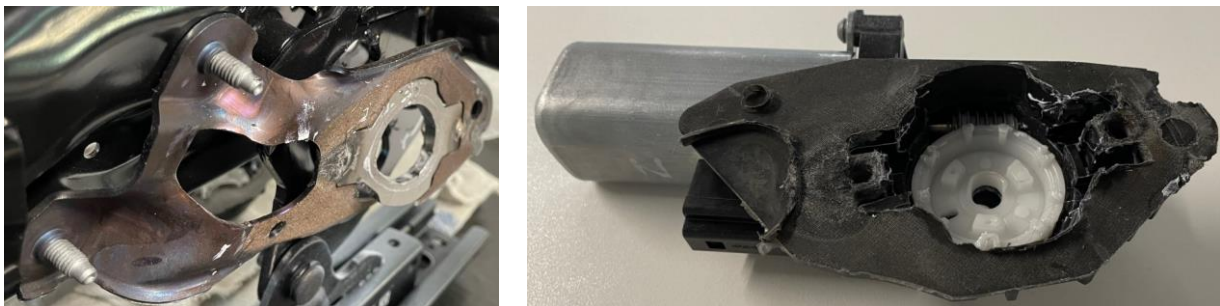


Bild 43: Demonstrator mit separierter Fügeverbindung nach Schlitten-Crashtest (Faurecia)

Als Hauptursache für das Separieren wurde eine hohe Deformation in der Stahl-Adapterplatte vermutet, die über den deformierenden Sitz eingebracht wird. Aus den Kopf- und Scherzugversuchen an der T-Stoß-Probe war bekannt, dass die Fügeverbindung höheren Kräften standhält, jedoch das Trennen einer Verbindung mit nur einem vergleichsweise geringen Deformationsweg einhergeht. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass eine zwangsweise von außen eingebrachte hohe Deformation durch die Fügeverbindung nur bedingt ertragbar ist. Im Crashversuch überstieg die Biegedeformation in der Adapterplatte die kritische Grenze einer ertragbaren Umgebungsdeformation, weshalb auch erhöhte Festigkeitswerte der kleinräumigen Fügeverbindung kein Standhalten innerhalb der auf Komponentenebene global hohen Deformation ermöglichen konnten.

Weitere Einflüsse sind durch einen punktuellen Schweißprozess an der Adapterplatte möglich, der durch einen Wärmeeintrag in die zuvor hergestellte TailoredJoints-Fügefläche eine Veränderung der Kunststoffstruktur hervorgerufen haben kann.

Allgemein lässt sich hieraus u. a. ableiten, dass die TailoredJoints-Fügemethode mit den im Forschungsprojekt gewählten Materialtypen (PP-GF30 + Stahl) vor allem in Anwendungen umgesetzt werden sollte, die keinen hohen äußeren Deformationen ausgesetzt sind. Prozessschritte in der Produktion, die einen Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften haben können, z. B. Wärmeeinwirkung durch Schweißen in direkter Umgebung der Fügezone, sollten möglichst dem Fertigungsschritt des TailoredJoints-Fügens vorgeschaltet werden.

In Ergänzung an die Schlittenversuche unter Crashbelastung wurden durch Faurecia umfangreiche weitere Versuche durchgeführt, die die generelle Funktionalität der Fügezone bestätigt haben. Hierbei wurden unter anderem Drehmomente von 190 Nm erreicht, wodurch mit möglichen Anpassungen der Fügezonenrandbedingungen (Flächengröße, Materialtypen,...) Potential zur Anwendung in unterschiedlichsten Konstruktionen besteht.

5.6. Entwicklung eines Normvorschlags zur Unterstützung der industriellen Anwendung der Verbindungstechnik (AP6)

Für die Erarbeitung eines Normvorschlags wurde zunächst unter Teilnahme aller Projektpartner und anschließend auch mit Einbindung externer Stakeholder aus Industrievertretern der Verbindungstechnik ein gemeinsamer virtueller Workshop durchgeführt, um Ideen für notwendige Inhalte einer möglichen Norm zu sammeln und auszutauschen. Die im Rahmen eines Brainstormings zusammengetragenen Themenpunkte wurden auf die folgenden fünf Gliederungsbereiche aufgeteilt, die im weiteren Verlauf in Kleingruppen weiter ausgearbeitet wurden: Definitionen, Anwendungsbereich, Prozess- und Anlagentechnik, Prüftechnik, Auslegung und Simulation. Durch EDAG wurde dabei vor allem der Bereich der Prüftechnik bearbeitet und im Themenfeld Auslegung und Simulation mitgewirkt.

In den Normenvorschlag wurde der im Laufe des Projekts erarbeitete Prüfkörper als Empfehlung übernommen. (siehe Bild 44) Wichtig ist bei dem Probekörper vor allem, dass man möglichst reinen Zug (Kopfzugversuch), reinen Schub (Scherversuch) und zudem die kombinierte Belastungsart Schalen daran prüfen kann. Diese Belastungsarten werden zwingend zur experimentellen Absicherung der Prognosegüte des Simulationsmodells bzw. zur Nachkalibrierung für eine Steigerung der Prognosegüte für den Validierungsprozess anhand von Versuchsergebnissen benötigt.

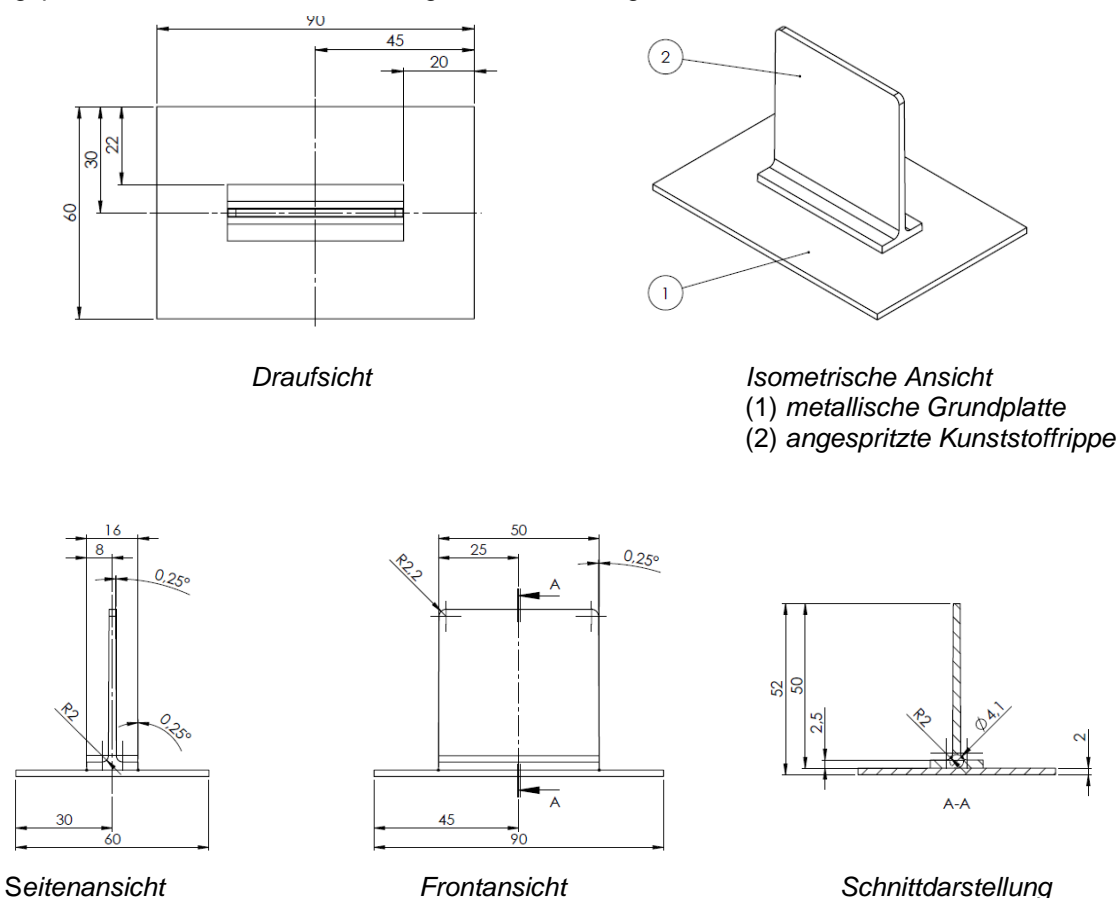


Bild 44: Rippenprüfkörper; 1: Metallplatte; 2: Rippe aus Kunststoff

Auch die in diesem Projekt angewendeten Prüfmethoden wurden in den Normenvorschlag integriert. (siehe 5.3 Untersuchung der Einflussgrößen auf die Verbindungseigenschaften (AP3) und Bild 4 Übersicht untersuchte Lastfälle in der physikalischen Prüfung (oben links Scherlastfall, unten links Kopfzuglastfall, rechts Schallastfall). Der Normentwurf wurde ergänzt um Details zur Probenerstellung, Vorbehandlung und der zu prüfenden Probenanzahl. In diesem Fall wurde von einer Prüfung im Normklima nach DIN EN ISO 291 ausgegangen. Als Typische Probenanzahl wurden 5 -15 Proben festgelegt. Zu jedem Versuch wurde eine Beschreibung des Versuchsaufbaus inkl. der Einspannung aufgenommen und die erforderlichen Prüfgeräte und Messmittel beschrieben. Weiterhin wurde der genaue Prüfablauf und die erforderlichen Angaben für den Prüfbericht beschrieben.

Zum Aufbau von Simulationsmodellen und der Auswahl bzw. Anwendung unterschiedlicher Simulationsmethoden wurde die Betrachtung der Fügeverbindung auf Mikro- und Makroebene exemplarisch dargestellt. Die unterschiedlichen Finite-Elemente-Diskretisierungsgrade, die sich im Rahmen des Forschungsprojektes als sinnvoll umsetzbar bestätigt haben, sind als orientierende Größenordnung

festgehalten (Mikromodell, z. B. Volumenelemente mit Kantenlänge von ca. 1-15µm; Makromodell, z. B. Schalenelemente mit Kantenlänge von ca. 2-5mm). Die Vor- und Nachteile und der Zielkonflikt aus Rechenaufwand und detaillierter Aussagekraft ist für die beiden unterschiedlichen Auflösungsgrade dargestellt und bietet dem Anwender einer möglichen Norm eine Auswahlgrundlage für seinen Simulationsprozess, entsprechend seiner Anforderungen und Entwicklungsintentionen. In der Bauteilentwicklung wird normalerweise eine Makromodellierung angewendet, deren Rechenaufwand die Betrachtung großräumiger Komponenten oder Module/ Baugruppen/ Fahrzeuge zulässt, auch in Anbetracht der häufig hoch ausfallenden Variantenvielfalt im Entwicklungsprozess. Dagegen wird für kleinräumige und detaillierte Betrachtungen innerhalb der Fügezone eher eine Mikromodellierung gewählt, um das Verhalten der Mikrostrukturierung zu untersuchen und zum Beispiel die Fertigungsmethode zu optimieren.

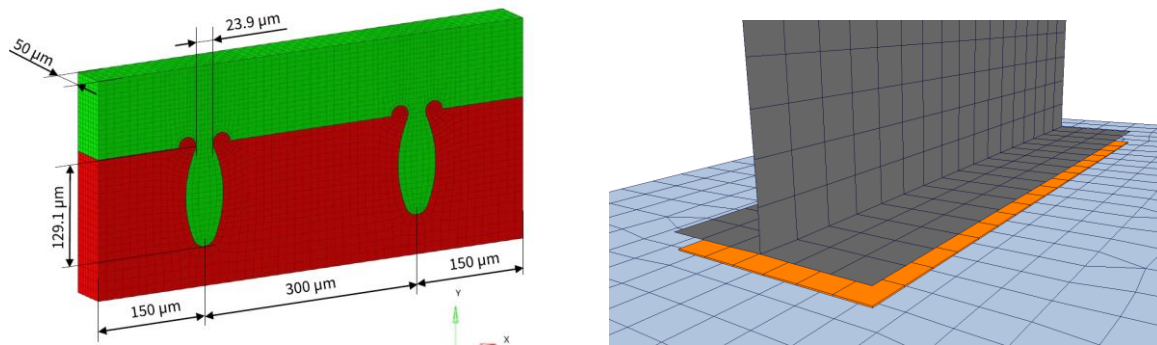


Bild 45: Finite –Elemente-Modell auf Mikro- (Bildquelle CIKONI) und Makroebene

Auch die Relevanz zur Einbindung valider mechanischer Werkstoffdaten (Materialkarten) zur Generierung prognosesicherer Simulationsergebnisse wurde erläutert. Materialversuche mit einer lokalen optischen Dehnungsmessung (DIC, Digital Image Correlation/ Grauwertkorrelation) können besonders exakte Werkstoffdaten liefern und sind als Grundlage für einen Simulationsmodellenaufbau ratsam. Zug-, Scher- und Schälversuche eignen sich zur Kalibrierung und Validierung von Makromodellen. Generell ist eine Absicherung der Simulationsmodelle anhand von Validierungen eines oder mehrerer Versuchslastfälle zu empfehlen, um ein virtuelles Simulationsverfahren sicher und wirtschaftlich in Entwicklungszyklen einsetzen zu können.

Die erarbeiteten Leitlinien wurden in einem DIN SPEC Entwurf zusammengefasst, der über den Projektpartner MSE eingereicht werden soll.

6. Erzielte Ergebnisse

Bezogen auf die unter I. „Ziele“ beschriebenen TailoredJoints-Projektziele für EDAG, konnten zusammenfassend die folgenden Ergebnisse erzielt werden:

Zur Ermittlung mechanischer Eigenschaften der TailoredJoints-Fügeverbindung wurde ein allgemein verwendbarer geeigneter T-Stoß-Probekörper hergeleitet, bestehend aus einem Stahlblech und einem PP GF30 Spritzgussprofil. Mittels einer hergestellten Prüfvorrichtung und Versuchsdurchführungen auf einer Zugprüfmaschine in einem Kopf-, Scher- und Schälzuglastfall wurden die Eigenschaften 16 unterschiedlicher Fügekonfigurationen verglichen, wodurch die mechanisch günstigste Fertigungseinstellung (Konfiguration 05) ausgewählt werden konnte und das Prüfverfahren zur Nutzbarkeit der Messergebnisse abgesichert wurde. Aus den hierbei entstandenen Erfahrungen ließen sich Empfehlungen für weitere Optimierungen des Prüfverfahrens ableiten, z. B. hinsichtlich einer Vergrößerung des Lasteinleitungsfläche des Druckstempels auf das Kunststoffprofil im Scherlastfall oder zur Integration einer zusätzlichen optischen Wegmessung und Erweiterung des Prüfspektrums auf dynamische Lastfälle.

Um in virtuell gestützten Produktentwicklungen die Fügeverbindung prognosesicher simulieren zu können, wurde im Solver LS-Dyna eine Modellierungsmethode erarbeitet und validiert. Mit Abbildung der Fügepartner durch Schalenelementnetze mit einer Kantenlänge von ca. 3 mm und Kopplung mittels einer Fügenschicht in Form von Kohäsivelementen und einer *MAT_240 Materialdefinition ließ sich ein guter Kompromiss aus Rechenaufwand und Ergebnisgenauigkeit finden, der als Makromodell sowohl auf Coupon- wie auch auf Bauteilebene anwendbar ist. Auch die Übertragbarkeit in andere gängige Finite-Elemente-Solver ist damit möglich. In der Parameterdefinition des *MAT_240-Fügezonenmaterials wurden zwei unterschiedliche Vorgehensweise überprüft, die Übernahme von Ergebnisdaten einer Mikromodellsimulation, sowie die iterative Parameterkalibrierung anhand von Versuchsergebnissen. Grundsätzlich sind beide Wege als zielführend einzustufen, zeigten jedoch in der Prognosefähigkeit der Simulationsergebnisse starke Abhängigkeit von den zugrundeliegenden Eingangsdaten. Für die Integration von Ergebnissen aus Mikromodellsimulationen wurde die Verwendung exakter und valider Materialkarten der Grundwerkstoffe als essenziell verstanden, während in der Nutzung von Couponversuchen als Kalibrierungsgrundlage kleinste Deformationen innerhalb der Probe und im Umgebungsbereich messtechnisch erfasst und entsprechend verarbeitet werden müssen.

Durch Bereitstellung der gewonnenen Erkenntnisse in einem Konstruktionsleitfaden und Normentwurf wurde dem Anwender der Übertrag des TailoredJoint-Verfahrens in neue Bauteilentwicklungen vereinfacht.

7. Verwertung

Die Verwertung des TailoredJoints-Projektes nach Projektende ist eingehend in Teil III „Erfolgskontrollbericht“ Kap. 3. „Fortschreibung des Verwertungsplans“ dokumentiert.

Hier werden die wirtschaftlichen (Kap.3.2.) wissenschaftlich/technischen (Kap. 3.3.) Erfolgsaussichten nach Projektende beschrieben.

8. Erkenntnisse von Dritten

Im Rahmen der Bearbeitung der Arbeitspakete AP 2.4 „Konstruktionsrichtlinie Ableiten“ und AP 6.2 „Entwicklung eines Normvorschlages – Gremienarbeit mit Stakeholder“ wurde in der Zusammenarbeit mit externen Stellen (vgl. auch Kap. I. 3. „Zusammenarbeit mit anderen Stellen“) über vergleichbare hybride Füge Technologien in potenziellen Serienentwicklungen diskutiert. Hier brachte der externe Teilnehmer Fa. KIST * ESCHERICH GmbH, Dresden Erkenntnisse und eigene Erfahrungen ein, die das Potential der Füge Technologie auch mit anderen Kunststoffen und Metallen aufzeigen. Die erläuterte Anwendung unterschied sich zwar von der im TailoredJoints-Projekt gewählten hochstrukturellen, crashrelevanten Anwendung im Rahmen einer Sitzstruktur, doch konnte KIST + ESCHERICH zeigen, dass hier auch mediendichte Verbindungen für Kühlkreisläufe erzeugt werden können. Das Potential der Füge Technologie konnte hier durch Einleitung einer homogen in die Fügezone eingebrachte Kraft durch eine Mediendruckbeaufschlagung gezeigt werden. Eine seitens KIST + ESCHERICH durchgeführte Berstdruckprüfung, hielt einen mehrfach höheren Druck aus, als es für die angedachte Serienanwendung gefordert war. Die Geometrie der Laservorbehandlung für die metallische Komponente (hier Aluminium) unterschied sich etwas von der in TailoredJoints gewählten (schubkraftoptimierten) Laserstruktur. Die Auslegung der Fügezone wurde seitens KIST + ESCHERICH auch konventionell und nicht simulationsgestützt vorgenommen. Das macht das TailoredJoints-Projekt für eine mögliche spätere Anwendung der Projektergebnisse sowie einer Standardisierung (Normentwurf) auch für Unternehmen, wie KIST + ESCHERICH interessant und öffnet Möglichkeiten für eine spätere Zusammenarbeit zwischen den Unternehmen nach Projektabschluss. Die Stärken des Unternehmens KIST + ESCHERICH liegen in der Entwicklung und dem Bau von Kunststoff-Metall-Fügemaschinen, während EDAG den Entwicklungspartner für die simulationsgestützte Auslegung von Komponenten mit entsprechenden hybriden Fügestellen abbilden könnte.

Weiter konnte EDAG hierdurch wertvolle Erkenntnisse für eine mögliche erweiterte Bandbreite der Anwendungen der TailoredJoints-Füge Technologie gewinnen.

9. Veröffentlichungen

Bedingt durch die Corona-Problematik fanden während der Projektlaufzeit kaum Live-Präsentationen statt. Das Projekt wurde inhaltlich und hinsichtlich des projektfortschritts auf folgenden Veranstaltungen der Öffentlichkeit präsentiert:

-) CU Composite United e.V. - Werkstoffplattform HyMat: 1. Statusseminar, 22.02.2021, Mitwirkung EDAG an der Präsentationsverfassung im Rahmen des Konsortiums, Vortragende: Kira van der Straeten, Fraunhofer ILT

-) CU Composite United e.V. - Werkstoffplattform HyMat: 2. Statusseminar, 21./22.06.2022, Mitwirkung EDAG an der Präsentationsverfassung im Rahmen des Konsortiums, Vortragende: Julius Berges, RWTH Aachen MSE

Schriftliche Veröffentlichungen wurden seitens EDAG im Rahmen des Projektverlaufs nicht vorgenommen. Weitere Hinweise zu geplanten Projektpräsentationen sind im Teil III „Erfolgskontrollbericht“ Kap. 5. „Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer“ beschrieben.

Berichtsblatt - Kurzfassung des Vorhabens

Zuwendungsempfänger: EDAG Engineering GmbH Kreuzberger Ring 40 65205 Wiesbaden	Förderkennzeichen: 03XP0277C
Thema: TailoredJoints – Methoden und Auslegungskriterien von laserbasierten Kunststoff-Metall-Hybridverbindungen für maßgeschneiderte Fügeverbindungen	
Laufzeit des Vorhabens:	
Bewilligungszeitraum:	01.04.2020 bis 30.09.2022
Bewilligte Projektverlängerung: 01.10.2022 bis 31.12.2022	

Projektbeschreibung:

Für eine hybridische Fügeverbindung zwischen einer laserstrukturierten metallischen Komponente und einer über einen Spritzgussvorgang angefügten thermoplastischen Komponente für eine strukturelle Anwendung in der Automobilindustrie wird eine Auslegungsmethode entwickelt.

Wesentlich ist hier die Herleitung einer anforderungsgerechten Fügefläche, die das Optimum zwischen einer lastfallgerechten Fügegeometrie zur Erfüllung der strukturellen Anforderungen und einer kosteneffizienten Auslegung, Fertigung und Herstellung darstellt. Für die Kosteneffizienz ist die laserbasierte Erzeugung einer Strukturierung auf der metallischen Seite als Kostentreiber ausschlaggebend.

Die simulationsgestützte Auslegung der Fügefläche erfolgt über ein dreistufiges Simulationsmodell: Ein Mikromodell beschreibt dabei das Material- und Kräfteverhalten auf der Ebene der durch einen Laser erzeugten Mikrokavitäten. Daraus wird ein Mesomodell abgeleitet, welches das Verhalten der Fügefläche als Grenzschichtmodell unter Berücksichtigung des flächenbezogenen Versagensverhaltens beschreibt. Das Makromodell bildet das Verhalten der Fügezone auf Bauteilebene ab und ist die Sichtweise eines Konstrukteurs bei der BauteilAuslegung.

Durch diese Vorgehensweise wird der Rechenaufwand bei der Auslegung der Fügefläche enorm reduziert, so dass hierdurch ein essenzieller Zeit- und damit verbunden ein Kosteneinsparfaktor erzielt wird.

Bei der Herleitung der Simulationsmodelle werden für den gesamten Produktentstehungsprozess die Einflüsse der variablen Prozessfaktoren in den einzelnen Produktionsschritten, wie Laserstrukturierung und Spritzgießen auf die Fügequalität berücksichtigt. Diese Größen fließen dann als mechanische Eigenschaften in ein Materialmodell für die simulationsgestützte Füge-/ Bauteilgeometrieauslegung ein. Über eine physikalische Erprobung von definierten Lastfällen an gefügten Probekörpern werden die Simulationsgüte validiert bzw. die Modelle kalibriert.

Projektergebnisse:

Für die TailoredJoints-Fügeverbindung wurden ein geeigneter Probekörper und Einspannvorrichtungen entwickelt, um die Einflussfaktoren des Fügeverfahrens und die mechanischen Eigenschaften der Verbindung identifizieren zu können. Durch die Prüfung und Bewertung 16 unterschiedlicher Fügekonfigurationen in Kopf-, Scher- und Schälzuglastfällen auf einer quasistatischen Zugprüfmaschine wurden die Fertigungseinstellung mit den mechanisch günstigsten Eigenschaften ausgewählt und weiterführend Proben mit einer lastfallangepassten Struktur untersucht.

Um in virtuell gestützten Produktentwicklungen die Fügeverbindung prognosesicher simulieren zu können, wurde im Solver LS-Dyna eine Modellierungsmethode erarbeitet und validiert. Mit Abbildung der Fügepartner durch Schalenelementnetze mit einer Kantenlänge von ca. 3 mm und Kopplung mittels einer Fügeschicht in Form von Kohäsivelementen und einer *MAT_240 Materialdefinition ließ sich ein guter Kompromiss aus Rechenaufwand und Ergebnisgenauigkeit finden, der als Makromodell sowohl auf Coupon- wie auch auf Bauteilebene anwendbar ist. In der Parameterdefinition des Fügezonematerialmodells wurden zwei unterschiedliche Vorgehensweisen dargestellt, die Übernahme von Ergebnisdaten einer Mikromodellsimulation, sowie die iterative Parameterkalibrierung anhand von Versuchsergebnissen. Ein entwickelter Demonstrator wurde durch Anwendung der Methode zur Übertragung eines Drehmoments von 300 Nm ausgelegt.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein Konstruktionsleitfaden und gemeinsam mit externen Stakeholdern ein Normenvorschlag mit Leitlinien zur Auslegung, Anfertigung, Prüfung und Simulation der untersuchten Fügeverbindung erarbeitet.

Short Project Description

Beneficiary: EDAG Engineering GmbH Kreuzberger Ring 40 65205 Wiesbaden	Project number: 03XP0277C
Project title: TailoredJoints - Methods and design criteria of laser-based plastic-metal hybrid joints for customised joining connections	
Project : Grant period: 01 April 2020 to 30 September 2022 Grant project extension: 01 October 2022 to 31 December 2022	

Project objective:

Development of a design method for a hybrid joint between a laser-structured metallic component and a thermoplastic component added via an injection moulding process for a structural application in the automotive industry.

It is essential here to derive a joining surface that meets the requirements and represents the optimum between a joining geometry that is suitable for the load case in order to fulfil the structural requirements and a cost-efficient design, manufacturing and production. For the cost efficiency, the laser-based generation of a structuring on the metallic side is the crucial cost driver.

The simulation-based design of the joining surface is carried out using a three-stage simulation model:

A micromodel describes the material and force behaviour at the level of the microcavities created by a laser. A meso model is derived from this, which describes the behaviour of the joining surface as a boundary layer model, taking into account the surface-related failure behaviour. The macro model maps the behaviour of the joining zone at component level and is the designer's point of view for component design.

This approach enormously reduces the computational effort in the design of the joining area. Thus, an essential time and cost saving factor is achieved.

When deriving the simulation models, the influences of the variable process factors in the individual production steps, such as laser structuring and injection moulding parameters, on the joining quality are taken into account for the entire product development process. These variables are then incorporated as mechanical properties into a material model for the simulation-supported joining/part geometry design.

The simulation quality is validated and the models calibrated by physically testing defined load cases on joined test specimens.

Project results:

A suitable test specimen and test fixtures were developed for the TailoredJoints joint in order to be able to identify the influencing factors of the joining process and the mechanical properties of the joint. By testing and evaluating 16 different joint configurations in tensile, shear and peel test load cases on a quasi-static tensile testing machine, the manufacturing setting with the best mechanical properties was selected and samples with a load case-adapted structure were further investigated.

A modelling method was developed and validated in the LS-Dyna solver in order to be able to reliably simulate the joint in virtually supported product developments. With the representation of the joining partners by shell element meshes with an edge length of approx. 3 mm and coupling by means of a joining layer in the form of cohesive elements and a *MAT_240 material definition, a good compromise between computational effort and result accuracy could be found, which is applicable as a macro model both at coupon and component level. In the parameter definition of the joining zone material model, two different procedures were presented, the transfer of result data from a micromodel simulation and the iterative parameter calibration based on test results. A developed demonstrator was designed by applying the method for the transmission of a torque of 300 Nm.

Based on the knowledge gained a design guideline and together with external stakeholders, a proposal for a standard with guidelines for the design, manufacturing, testing and simulation of the investigated joint were developed.