Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Verbundvorhaben
DigiBody – Digitale Prozesskette zur Abbildung und Optimierung der Fügetechnik im Rohbau

Partnerspezifischer Schlussbericht zum Teilvorhaben
Simulative Absicherung der Maßhaltigkeit des Falzklebprozesses

Förderkennzeichen
19I19003C

Autoren
Dr.-Ing. Florian Bohne
Dr.-Ing. Kim Kose
Prof. Dr.-Ing. Henning Gleich

Weitere Zuwendungspartner

- Mercedes-Benz AG (Konsortialführer)
- DYNAmore Gesellschaft für FEM Ingenieurdienstleistungen mbH
- Universität Paderborn, Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF)
- Universität Stuttgart, Institut für Flugzeugbau (IFB)
- DuPont Specialty Products GmbH & Co KG (assoziierter Partner)

Laufzeit
01.04.2019 bis 30.09.2022

Das diesem Bericht zugrundeliegende Teilvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 19I19003C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

I Kurze Darstellung 3

1 Aufgabenstellung 3

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 4

3 Planung und Ablauf des Vorhabens 4

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens 5

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 5

II Eingehende Darstellung 6

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse 6

1.1 Rollfalzsimulation mit vollständig bedateter Klebstoffraupe 6

1.2 Aufbau der Gesamtsimulation des KTL-Prozesses auf Basis der Daten und Material-parameter von den Verbundpartnern 18

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 27

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 27

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 28

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 29

6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse 29

I Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Der hybride Leichtbau ist eine der Schlüsseltechnologien zukünftiger, effizienzoptimierter und emissionsarmer Fahrzeugkonzepte. Ziel ist dabei die optimale Kombination verschiedener Materialien. Hybrider Leichtbau kann vor dem Hintergrund geforderter Sicherheits- und wirtschaftlicher Aspekte ohne adäquate Fügetechnologie nicht realisiert werden. Insbesondere im Fall des Fahrzeug-Crash sind Fügestellen einer sehr hohen dynamischen Belastung ausgesetzt und müssen dabei die Integrität der Struktur gewährleisten. Dies bedingt derzeit eine hohe Anzahl an mechanischen und geschweißten Fügestellen.
Durch den vermehrten Einsatz von Klebflächen können die Steifigkeit und Dichtigkeit erhöht sowie eine flächige Kraftübertragung erreicht werden. Es ergeben sich nun jedoch neue Herausforderungen im Fertigungsprozess. Durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten im hybriden Strukturdesign kommt es zu hohen Relativbewegungen der Fügepartner im KTL-Trocknungsprozess. Dies kann zur Schädigung der Klebverbindung führen. Um die Substitution mechanischer Fügestellen durch Klebungen zu ermöglichen, ist eine entsprechende Güte der Vorhersagbarkeit des Verbindungsverhaltens erforderlich. Hierfür müssen die Kleb- und mechanischen Fügestellen charakterisiert und berechnet werden können. Der Aufbau bisheriger Berechnungsmodelle betrachtet die Struktur in einem „idealen Zustand". Dieses Vorgehen ist jedoch nicht ausreichend.

Ziel des Vorhabens DigiBody war die digitale Vorhersagbarkeit der Güte von Verbindungen in komplex belasteten Bauteilen, unter Berücksichtigung der realen Produktions-, Produkt- und Betriebsinformationen in der Fahrzeugentwicklung und deren Wechselwirkungen. Folgende wesentliche Unter-Ziele wurden im inpro-Teilvorhaben „Simulative Absicherung der Maßhaltigkeit des Falzklebprozesses" bearbeitet:

1. Virtuelle Abbildung der Fügeprozesse für Klebstoff und mechanische Fügetechnik
2. Entwicklung und Validierung eines Simulationsverfahrens zur virtuellen Beschreibung des Klebstoff-Fließprozesses beim Rollfalzklebprozess
3. Zuverlässige Aussage bei der digitalen Funktionsabsicherung

Innerhalb des Teilvorhabens sollten im Arbeitspaket AP2 insbesondere das Zusammenspiel zwischen Falzgeometrie und Deformation der Klebstoffraupe sowie das Herausdrängens des Klebstoffes aus der Fuge während des Rollfalzens simulativ berücksichtigt werden. Hier existierte vor Projektbeginn keine abgesicherte Simulationstechnik.
Im Arbeitspaket AP3 sollte dann der Aufbau der Gesamtsimulation des KTL-Prozessschrittes auf Basis der seitens der Projektpartner bereitgestellten Daten und Materialparameter erfolgen.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundvorhaben „DigiBody“ wurde im Forschungsschwerpunkt „Innovative Fahrzeuge“ im Rahmen des Förderprogramms „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ im Themenfeld „Effizienzsteigerung durch Leichtbau“ des BMWK gefördert.

Die Entwicklung von Material- und Simulationsmodellen ist ein langjähriger Schwerpunkt der Arbeiten von inpro, sowohl auf dem Gebiet der metallischen als auch auf dem Gebiet der faserverstärkten, polymeren Werkstoffe. Dazu gehört auch die virtuelle Abbildung von Fertigungsprozessketten. Im Zuge der Tätigkeiten auf diesem Gebiet ist bereits vor Beginn des Vorhabens DigiBody ein Simulationsdatenmanager entwickelt worden, der den Datentransfer zwischen unterschiedlichen Berechnungsmodellen ermöglicht. Dieser Simulationsdatenmanager ermöglicht es, nicht nur die Geometriedaten, sondern auch die werkstofftechnischen Eigenschaften der zu untersuchenden Bauteile in der virtuellen Welt von einem Fertigungsschritt zum nächsten mitzunehmen. So können beispielsweise Eigenspannungen und Verfestigungen aber auch Schädigungen aus einer Umformsimulation (Rollfalzklebprozess) an eine folgende Struktursimulation mit übergeben werden.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Planung und Ablauf des Vorhabens sind im gemeinsamen Schlussbericht beschrieben. Die seitens inpro bearbeiteten Arbeitspakete sind im Folgenden dokumentiert.

In den ersten 2,5 Projektjahren untersuchte inpro, inwieweit sich der Rollfalzklebprozess mit vollständig bedateter Klebstoffraupe ohne weitere Vereinfachungen simulativ abbilden lässt. Dieser Ansatz, der wesentlich über den im Projektantrag geschilderten Ansatz „Die einzelnen Bauteile werden aus einer vorab bei MB durchgeführten Umformsimulation digital bereitgestellt und unter Berücksichtigung eines vereinfachten Modells der jeweiligen Fügemethode zusammengebaut“ hinausgeht, hat sich für praxisrelevante Anwendungen als numerisch gegenwärtig nicht machbar herausgestellt. Dieser Versuch, eine hochgenaue Simulation des Falzklebens aufzubauen, war im Projektantrag als „mit einem unkalkulierbaren technischen Risiko behaftet“ beschrieben worden. Obwohl Untersuchungen an kleinen Falzabschnitten eine prinzipielle Machbarkeit gezeigt haben, ist die untersuchte und immer weiter entwickelte Methodik für komplette Bauteile jedoch aktuell nicht praxistauglich einsetzbar. Die erheblichen Aufwände, die in diesen Forschungsanteil geflossen sind, führten zu einer Projektverzögerung in der Bearbeitung des AP 3 und damit auch des gesamten Projekts.

In Abstimmung mit den übrigen Vorhabenpartnern wurde eine sechsmonatige Verlängerung beantragt und seitens des Projektträgers auch bewilligt, so dass die Bearbeitung des AP 3 ebenfalls im Rahmen der verlängerten Projektlaufzeit abgeschlossen werden konnte.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens

Fertigungssimulation Rollfalzkleben

Bezüglich der experimentellen, analytischen und numerischen Untersuchung des Klebstoffverhaltens sowohl in Stahlbauweisen als auch metallischen Mischbaustrukturen existieren diverse Veröffentlichungen, die sich weitgehend auf das Verhalten von Klebstoffen nach Erreichen des Gelpunktes eingrenzen lassen.

Bekannte Probleme beim Rollfalzkleben wie z. B. nicht ausgefüllte Klebstofffuge oder auch herausgedrückte Klebstoffreste auf einzelnen Fügepartnern, die anschließend manuell entfernt werden müssen, waren zu Beginn des Vorhabens noch nicht virtuell abbildbar.

Hier galt es, sowohl die mechanische Verformung der an der Falzung beteiligten Bleche, als auch die Deformation der noch nicht ausgehärteten Klebstoffraupe unter industriellem Maßstab virtuell zu prognostizieren.

Zum Ende des Vorhabens wird der Klebstoff als inkompressible Flüssigkeit (ICFD) modelliert. Dieser Ansatz zeigt prinzipiell ein sehr gutes Lösungsverfahren für den simulativen Rollfalzklebprozessschritt, allerdings beschränkt sich die ICFD-Simulation momentan noch auf nur eine Kontaktfläche und erfordert sehr lange Rechenzeiten. Das im Projektantrag bereits benannte Risiko hat sich bewahrheitet. Aus heutiger Sicht kann Abhilfe nur durch ANSYS als Code-Eigentümer von LS-DYNA geleistet werden. Dabei wird der erforderlicher Aufwand als relativ hoch eingeschätzt.

KTL-Prozess und Trocknersimulation

Zu Vorhabenbeginn wurde das gesamte Fahrzeug in der Fertigungssimulation immer auf Basis der CAD-Daten berechnet.

Nach Abschluss des Vorhabens werden auch für metallische Mischbauweisen alle relevanten und prozessbedingten Toleranzen und Fehlermöglichkeiten berücksichtigt und in der entwickelten virtuellen Prozesskette nicht mehr alleinig die CAD-Daten zugrunde gelegt, sondern auch die sich aus dem Prozess ergebenden Geometrien.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern in Form regelmäßiger Projektbesprechungen soweit möglich physisch, sonst via Videokonferenzen, realisiert.

II Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Innerhalb des Verbundvorhabens „DigiBody" war inpro für die Organisation der Arbeitspakete AP 2 „Zusammenbau-Simulation" und AP 3 „Belastung im KTL-Prozess" sowie mit der inhaltlichen Bearbeitung des AP 2.1 „Rollfalzsimulation mit vollständig bedateter Klebstoffraupe" und des AP 3.1 „Aufbau der Gesamtsimulation des KTL-Prozesses auf Basis der Daten und Materialparameter von Mercedes Benz, DuPont und LWF" verantwortlich.

1.1 Rollfalzsimulation mit vollständig bedateter Klebstoffraupe

Im AP 2.1 dieses Projektes sollten insbesondere das Zusammenspiel zwischen Rollfalzgeometrie und Deformation der noch flüssigen Klebstoffraupe sowie das Herausdrängen des Klebstoffes aus der Fuge zwischen Außen- und Innenblech während des Rollfalzens simulativ berücksichtigt werden. Hier existiert auch gegenwärtig keine abgesicherte Simulationsmethode. Zusätzlich sollten auch Variationen in der Geometrie berücksichtigt werden, wie sie z. B. durch die Umformung im vorhergehenden Prozessschritt entstehen. Damit ergeben sich die ersten Schritte zu einer Fertigungssimulation unter Berücksichtigung aller möglichen Parametervariationen. Hierzu musste ein Verständnis für die Aufsummierung der Schädigungen an Fügestellen und Bauteil über den gesamten Herstellungsprozess erarbeitet werden und es sollte die Schaffung einer durchgängigen Simulationsmethodik für die relevanten Herstellungsprozesse mit Fokus auf Schädigungen an Fügestellen und Bauteil erfolgen.
Zur Überprüfung der zu entwickelnden Simulationsverfahren wurde in Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner Mercedes Benz eine Rechteckplatte als geeigneter Coupon-Test definiert. Ebenfalls wurden in Zusammenarbeit mit allen Verbundpartnern die Anforderungen an die Simulation und eine prinzipielle Einigung über die simulative Darstellung der applizierten, noch nicht ausgehärteten Klebstoffraupe abgestimmt.
Daraufhin führte inpro erste Prinzipsimulationen zum Rollfalzklebprozess mit vollständig bedateter Klebstoffraupe durch. Hierfür sind nicht nur die Eigenschaften der zu falzenden Blechbauteile wichtig, sondern auch die Eigenschaften des nicht ausgehärteten, niedrigviskosen Klebstoffs. Für die Folgeschritte „Montage" und „KTL-Durchlauf" werden zusätzlich die in einer Materialkarte parametrisierten Materialeigenschaften des teilweise bzw. vollständig ausgehärteten Klebstoffs benötigt. In den Diskussionen mit den Projektpartnern einigte man sich vorerst, dass der Klebstoff nicht als Flüssigkeit, sondern als Festkörper dargestellt werden soll. Für die Entwicklung des Simulationsmodells war diese Einigung ein entscheidender Schritt. Das Verhalten des flüssigen Klebstoffs könnte entsprechend seinem Zustand auch mit einem CFD (Computational Fluid Dynamics) Programm berechnet werden. Diese Vorgehensweise würde jedoch zu sehr zeitaufwändigen Rechnungen führen. Da z. B. die bei CFD mit berücksichtigten, im Klebstoff entstehenden Verwirbelungen für die makroskopische Simulation unerheblich sind, ist diese aufwändige Rechenweise für die Erreichung der Projektziele nicht erforderlich.

Um in der Simulation eine erfolgreiche Vereinfachung des Klebstoffs zu erreichen, muss der auf diese Weise in der Simulation abgebildete Klebstoff trotz dieser einschränkenden Modellierung zu den experimentell gewonnenen Ergebnissen analoge simulative Resultate zeigen. Zusätzlich soll das aufgebaute Simulationsmodell auch numerisch stabil bleiben.
Mit diesem Ziel wurden während der Projektlaufzeit verschiedene Modellierungsansätze für den Klebstoff untersucht:

- Festkörper, also eine lagrangesche Modellierung des Klebstoffs
- ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian), eine immer noch lagrangesche Modellierung des Klebstoffs bei gleichzeitiger fortlaufender angepasster Neuvernetzung des Gebietes
- SPH (Smooth Particle Hydrodynamics), das Klebstoffgebiet wird als große Anzahl kleiner miteinander agierender Partikel dargestellt, dadurch können sehr große Deformationen innerhalb eines lagrangeschen Rahmens abgebildet werden
- ICFD (Incompressible Computational Fluid Dynamics) Der Klebstoff wird vereinfacht als inkompressible Flüssigkeit dargestellt und in ein lagrangesches Gebiet eingebettet, wobei in jedem Schritt die lagrangesche Lösung der gefalzten Bleche den Rahmen für die CFD-Lösung des Klebstoffs setzt.

Während mit einer lagrangeschen Rechnung keine erfolgreiche Lösung der Klebstoffdeformation im Falzprozess erwartet werden konnte, sondern grundsätzliche Phänomene wie z. B. Haftung des Klebstoffes am Blech bei Rückfederung untersucht wurden, traten mit den weiteren Lösungsmethoden unerwartete Phänomene auf, die letztendlich das im Antrag beschriebene „unkalkulierbare technische Risiko" bestätigten.

<u>Lagrangesche Modellierung des Klebstoffs</u>
Ein zentraler Punkt in der realitätsgetreuen Simulation des Rollfalzklebprozesses ist die Erfassung der Kontaktsituation zwischen Blech und Klebstoff sowohl bei als auch nach erstem Kontakt zwischen Blech und Klebstoff, sowie des Erhalts des Kontaktes zwischen Blech zu Klebstoff bei Rückfederung des Bleches, wenn der Falzdruck aufgehoben wird. Das Blech federt bei jedem Umformschritt minimal zurück. Dabei wird der zusammengedrückte Klebstoff, der die Haftung zu beiden Blechen aufrechterhält, auseinandergezogen. Bei sehr großen Wegen schnürt sich der Klebstoff stark ein, es kann sich dann ein sogenanntes Viscous Fingering ausbilden.
Simulativ konnte in einer Prinzip-Simulation gezeigt werden, dass sich diese Effekte mit LS-Dyna darstellen lassen.
In den Abbildungen 1 bis 3 werden die Ergebnisse der Untersuchung zur Machbarkeit der Simulation gezeigt. Abbildung 1 repräsentiert die Klebstoffraupe zwischen den beiden Blechen vor dem Falzen, in Abbildung 2 ist die zwischen den Blechen zusammengedrückte Klebstoffraupe und in Abbildung 3 der Zustand nach Rückfederung mit der eingeschnürten Klebstoffraupe dargestellt.

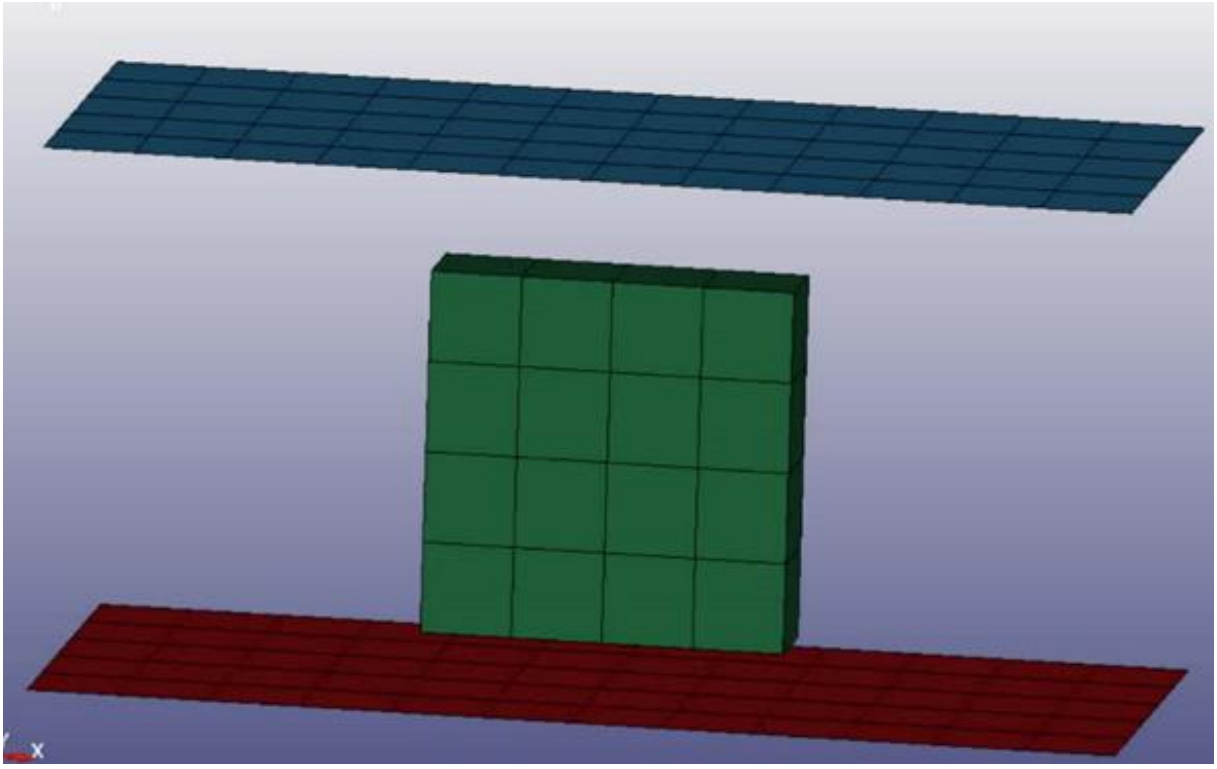

Abbildung 1: Klebstoffraupe vor Falzen

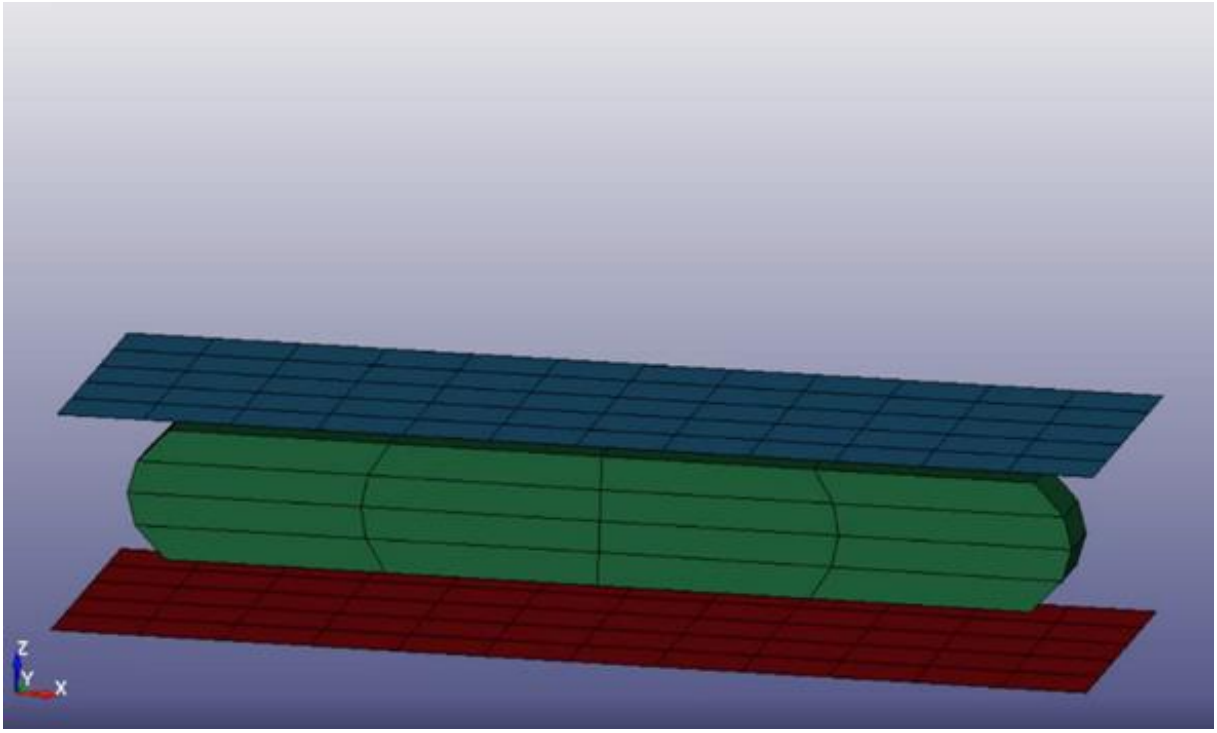

Abbildung 2: Klebstoffraupe maximal zusammengedrückt

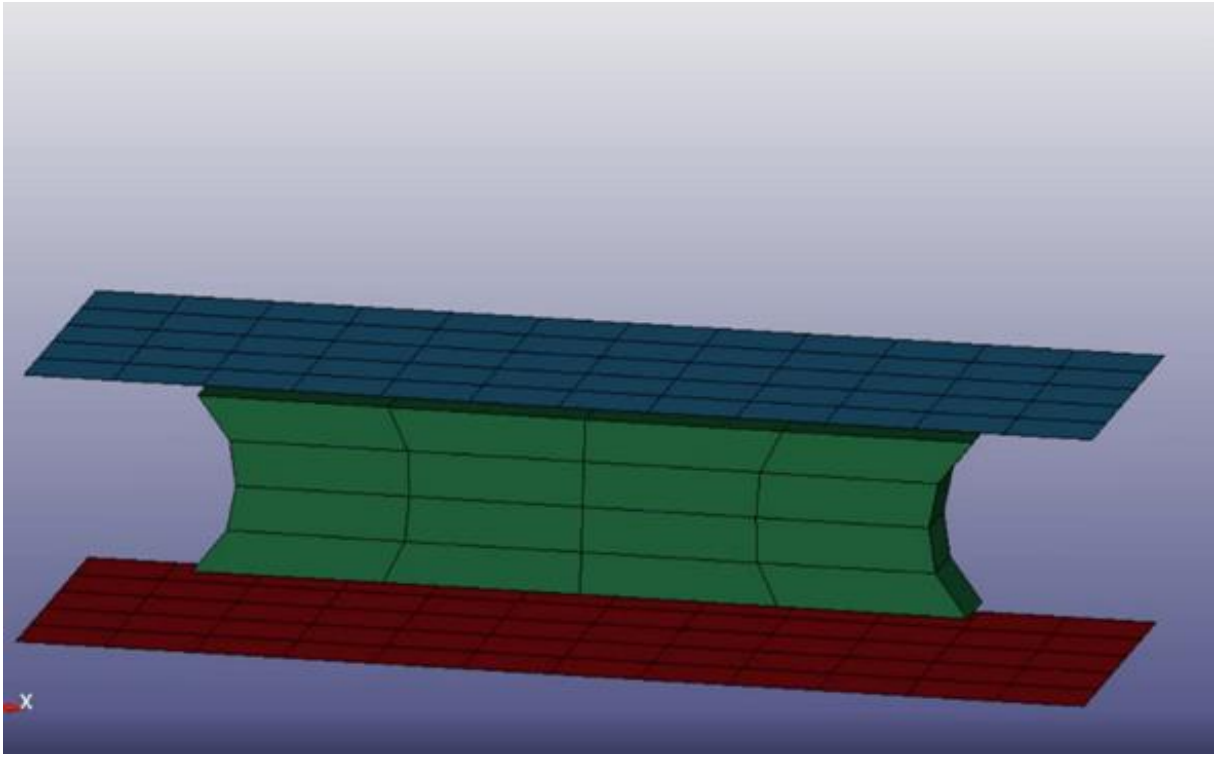

Abbildung 3: Klebstoffraupe nach Rückfederung des Bleches

Im Folgenden wurden anhand eines vom Projektpartner Mercedes-Benz bereitgestellten Probekörpers bestehend aus einem Innen- und Außenblech, das an der Längsseite mit drei Schritten durch Rollen gefalzt wird, SPH- und ALE-Modellierungen für den Klebstoff untersucht. In beiden Fällen zeigten sich unerwartete Ergebnisse, obwohl sich ein einfaches Zusammendrücken des Klebstoffes zwischen zwei Platten gut darstellen ließ, was allerdings auch für eine Modellierung mit Lagrange-Elementen gilt.

Der Falzprozess besteht aus folgenden Schritten (vgl. Abbildungen 4-7):

- leichtes Zusammendrücken des Klebstoffes durch Einlegen des Innenblechs,
- erstes Rollfalzen der Außenschale um 30°, dadurch Aufbringen von Druck aus einer weiteren Raumrichtung,
- weiteres Rollfalzen der Außenschale um 60°,
- Zusammendrücken der gefalzten Außenschale (90° Rollfalzen) mit dem eingeschlossenen Innenblech.

Sowohl in der SPH- als auch in der ALE-Modellierung des Klebstoffs geht seine Integrität während des simulierten Prozesses verloren. Dies liegt daran, dass weder SPH- noch ALE-Modellierung ein kohäsives Material abbilden können. Aus diesem Grund können in beiden Modellen die beteiligten Bleche auch keine Zugkräfte auf den Klebstoff ausüben, wie es beim Viscous Fingering auftritt. Damit wäre in der Folge eine Übereinstimmung von detaillierter mikroskopischer Simulation (AP 1) und der makroskopischen Simulation des vollständigen Falzklebprozesses nicht möglich und somit auch eine Übertragung der in AP 1 gewonnenen Parameter auf AP 2 unwahrscheinlich.

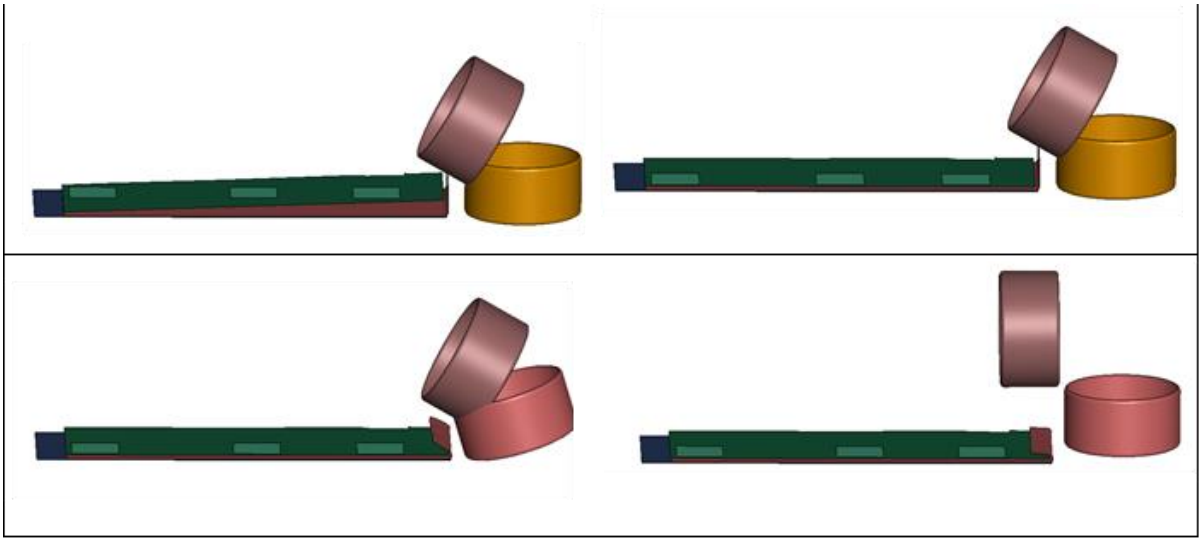

Abbildung 4: Rollfalzprozess ohne Klebstoff - zu Beginn (oben links), nach Einlegen des Innenbleches (oben rechts), Rollfalzen nach 60° (unten links) nach Fertigrollfalzen (unten rechts)

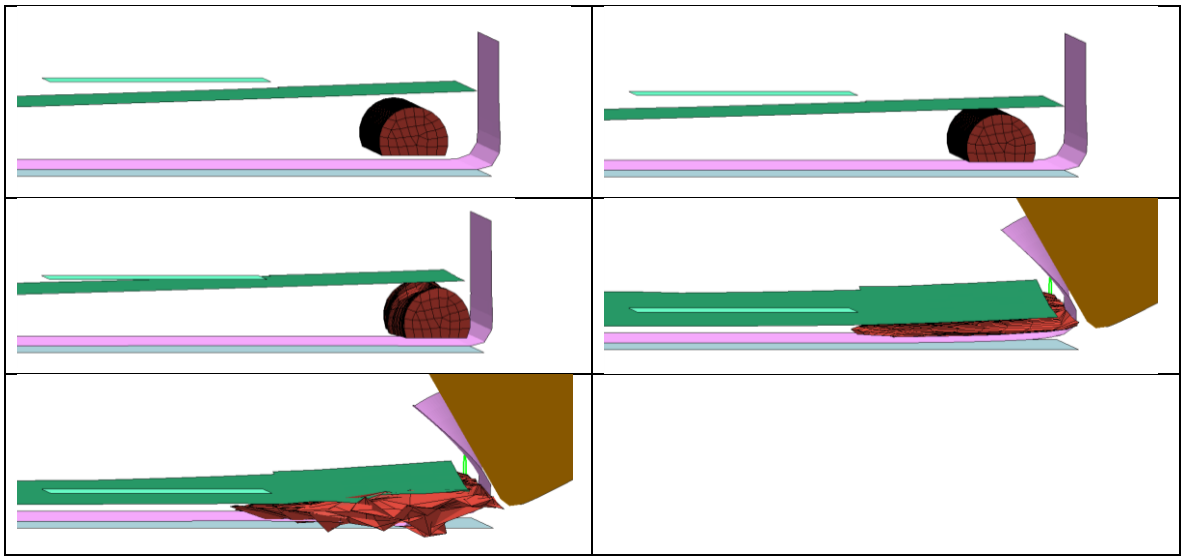

Abbildung 5: Rollfalzprozess mit Klebstoff in Lagrange-Elementen - zu Beginn (oben links), nach Erstkontakt von Innenblechs und Klebstoff (oben rechts), direkt vor Rollfalzbeginn (Mitte links), vor Abbruch der Rechnung vorletzter Schritt (Mitte rechts) und letzter Schritt, Rechnung abgebrochen (unten links)

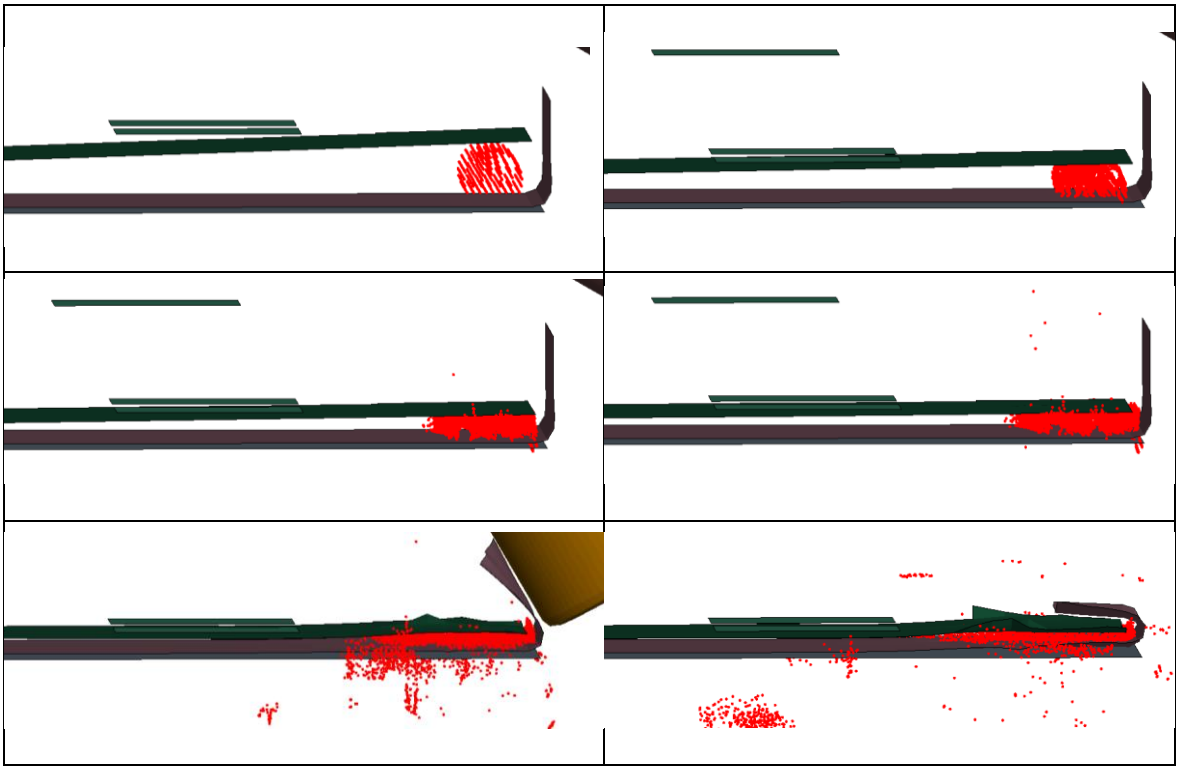

Abbildung 6: Rollfalzprozess mit Klebstoff in SPH modelliert – Situation zu Beginn (oben links), bei Herunterfallen des Einlegerbleches (oben rechts), Klebstoff wird heruntergedrückt (Mitte links), Situation vor Rollfalzen (Mitte rechts), Rollfalzen nach 30° (unten links), Rollfalzen abgeschlossen bei 90° (unten rechts)

Da die ursprünglich favorisierten numerischen Ansätze SPH und ALE für diese Aufgabe die Deformation des Klebstoffs während des Rollfalzprozesses abzubilden, nicht geeignet sind, wurde auch, entgegen bereits genannter Vorbehalte gegenüber CFD-Rechnungen, der ICFD–Ansatz untersucht. Dabei zeigte sich, dass sich mit diesem Ansatz prinzipiell aussagekräftige Lösungen erzeugen lassen, die dafür benötigten Ressourcen Zeit und Computerpower für realitätsnahe Probleme jedoch erstmal prohibitiv groß werden. Beim ICFD-Verfahren wird eine gekoppelte Simulation durchgeführt, wobei der „flüssige" Bereich mit einer CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) und der feste Bereich der umzuformenden Fläche über lagrangesche Elemente erfasst wird. In der Software LS-DYNA ist hierbei ein implizites Lösungsverfahren notwendig, bei dem in jedem Schritt der Gleichgewichtszustand aus Kräften und Verschiebungen in einem linearen Gleichungssystem gelöst wird.
Der Bereich, in dem sich die fluide Phase aufhalten kann, wird als Volumen vernetzt. Dabei ist die Netzgröße von der endgültigen Dicke des Klebstoffspalts (Klebschichtdicke) zwischen den beiden Blechen abhängig. Im automobilen Rohbau beträgt die Klebschichtdicke 0,2 bis 0,3 mm. Damit hier in der numerischen Darstellung noch ein Fließen möglich ist, ist eine Elementfeinheit von mindestens 5 Elementen für die Spaltdicke notwendig. Zusammen mit einer dynamischen Neuvernetzung zwischen den einzelnen Simulationsschritten ergibt sich ein Ansatz für die Elementgröße des fluiden Bereichs von 0,1 mm.

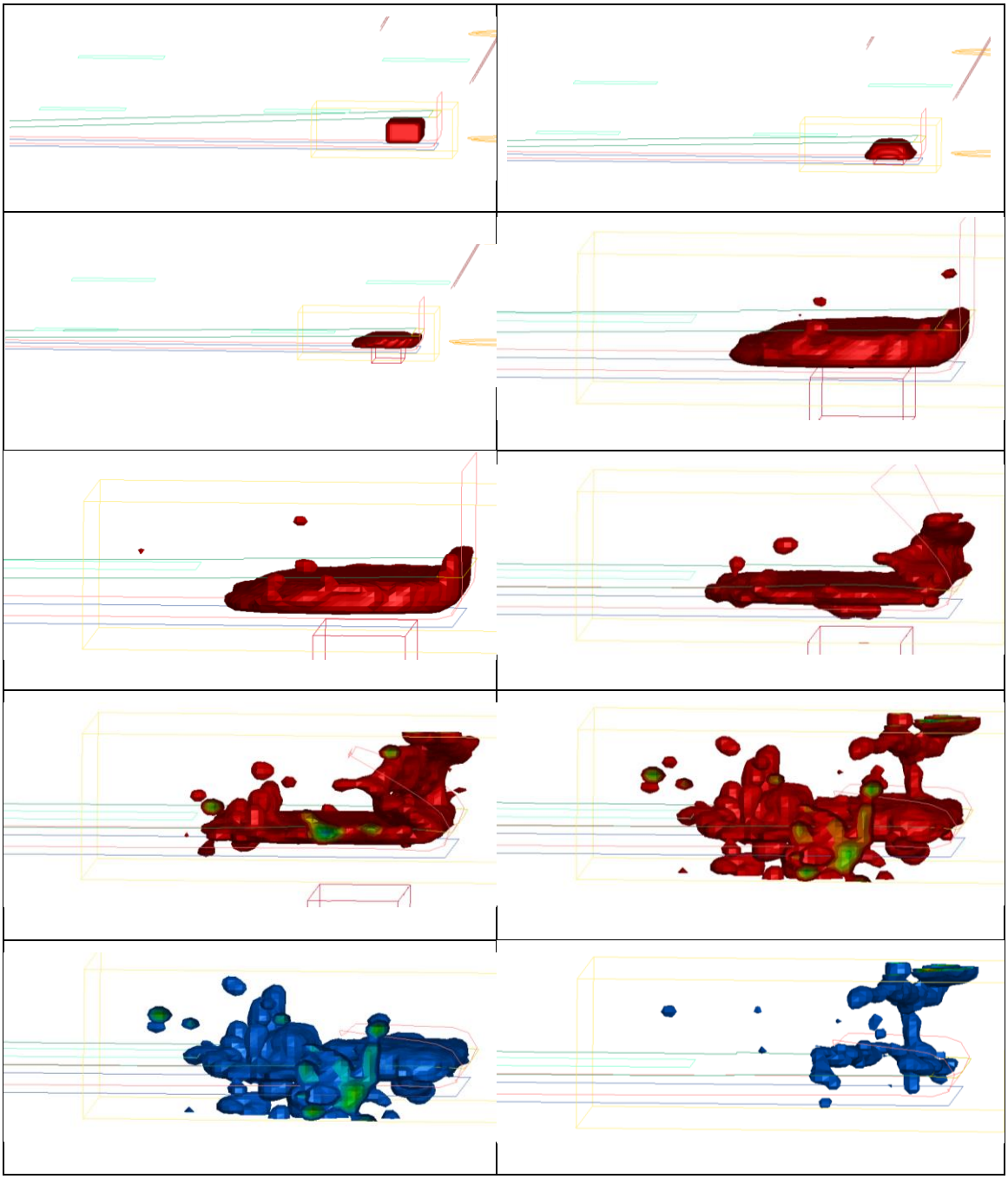

Abbildung 7: Rollfalzprozess mit Klebstoff in ALE modelliert – Situation zu Beginn (oben links), bei Herunterfallen des Einlegerbleches (oben rechts), Klebstoff wird weiter heruntergedrückt (zweit Zeile links, Einlegeblech wird weiter heruntergedrückt (zweite Zeile rechts), Situation vor Rollfalzen (dritte Zeile links), nach erstem Rollfalzen (dritte Zeile rechts), Rollfalzen nach 60° (vierte Zeile links, Rollfalzen abgeschlossen (vierte Zeile rechts), Materialanteil, der nicht durch den Schlitz zwischen Innenblech und Außenschale gegangen ist (unten links), Materialanteil der durch den Schlitz zwischen Innenblech und Außenschale gegangen ist (unten rechts)

Die Bleche können dagegen wesentlich gröber vernetzt werden; entscheidend ist, dass das Blech im Bereich des Falzradius fein genug dargestellt wird.
Die Kopplung zwischen Festkörper und Fluid wird im ICFD-Verfahren durch imaginäre Koppelflächen erzeugt. Mit diesen werden im CFD-Schritt des Verfahrens die Kräfte zwischen Fluid und Festkörper ausgetauscht und die Verschiebungen des Festkörpers repräsentiert. Während der Festkörpersimulation, bei der hier die Falzrollen ihre Kräfte auf die Bleche aufbringen, ist dagegen keine Repräsentation des Fluids notwendig. Bei einer starken Koppelung von Festkörper und Fluidsimulation können jedoch mit den Koppelflächen auch Kräfte vom Fluid auf den Festkörper übertragen werden. Der dafür aufzubringende Aufwand ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn das Fluid in der Lage ist, den Festkörper zu deformieren. Für einen sehr kleinen Ausschnitt des Bleches ist die Rollfalzklebsimulation in einer Voruntersuchung, bei der die Bleche durch dünne Schalenelemente repräsentiert werden, in Abbildung 8 dargestellt.
Entwicklungen zur Reduzierung des Simulationsaufwands zeigten, dass der Fluidbereich nicht den vollständigen Festkörperbereich umschließen muss, sondern nur die Koppelflächen. Diese Koppelflächen können sich allerdings auch nur auf Teilbereiche eines Festkörpers erstrecken. Dadurch kann der Fluidbereich wesentlich kleiner gehalten werden, als anfangs vermutet und es ergibt sich in den Anforderungen an Hauptspeicher, Festplattenspeicher sowie der benötigten Rechenzeit eine wesentliche Ersparnis. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wurde nun ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem nur der Bereich der Bleche, der tatsächlich eine Deformation erfährt, durch Fluidbereiche abgedeckt wird. Da sich die Simulation abschnittsweise einteilen lässt, wäre also nur ein verhältnismäßig kleiner Abschnitt des Falzbereiches überhaupt durch einen Fluidbereich abzudecken. In Abbildung 9 sind dazu die ersten Schritte dargestellt.

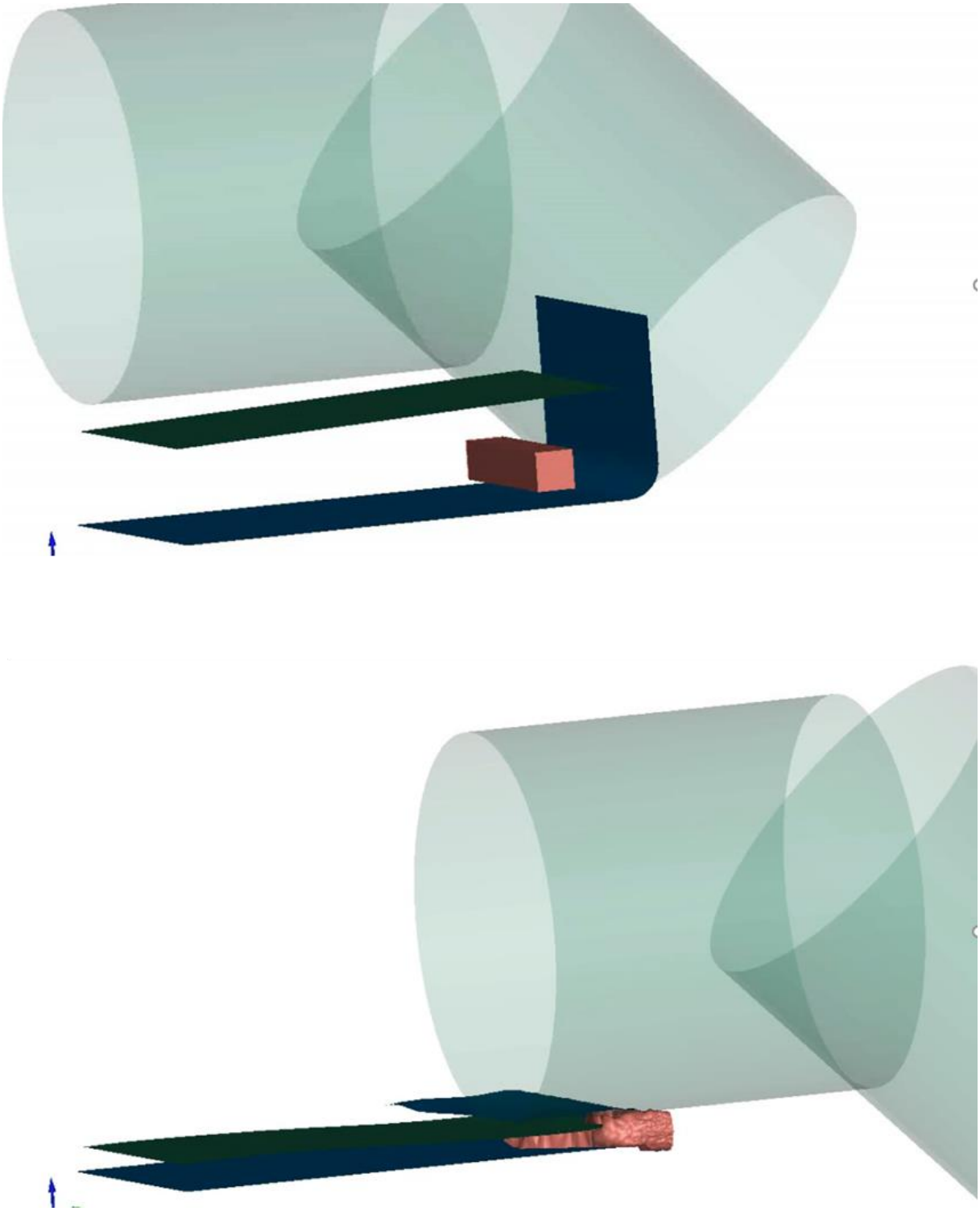

Abbildung 8: ICFD-Simulation: Klebstoff rot, Innenblech grün, Außenschale blau, und Falzrollen, Situation zu Beginn oben, Endergebnis unten

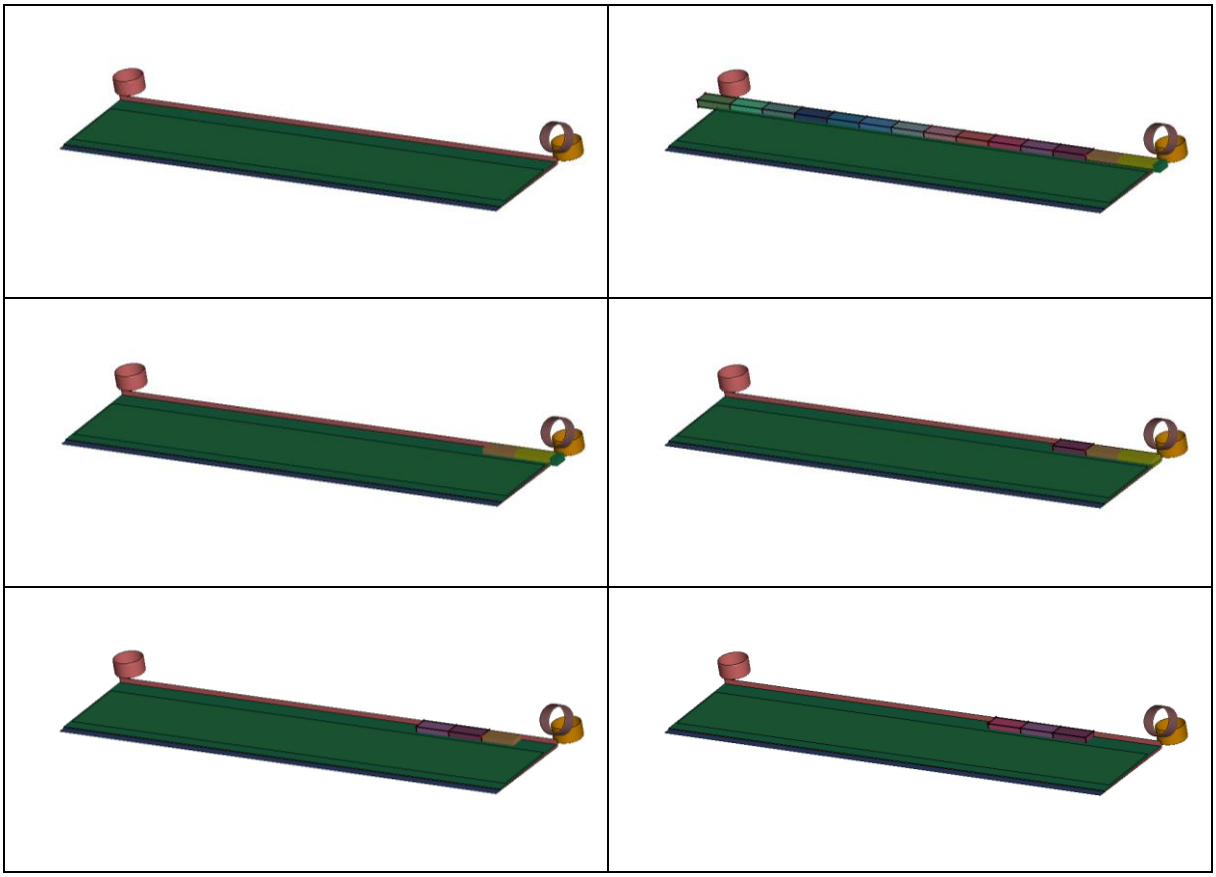

Abbildung 9: Aufbau des Rollfalzklebprozess als ICFD-Simulation mit Klebstoff – zu Beginn (oben links) Eingangsdaten ohne Klebstoff, Aufteilung und Überdeckung des Falzbereiches mit ICFD-Bereichen (oben rechts), eingeschränkter ICFD-Simulationsbereich im ersten Schritt (Mitte links), im zweiten Schritt (Mitte rechts), im dritten und vierten Schritt (unten links und rechts)

Eignung des ICFD-Verfahrens:

Mit dem ICFD-Verfahren wird in LS-Dyna eine Kopplung zwischen einer eulerschen Modellierung für die flüssige Phase (Klebstoff) und einer lagrangeschen Modellierung (Bleche) hergestellt und der Klebstoff wird in seiner flüssigen Phase als Flüssigkeit mit einer realistischen Viskosität modelliert. Die Darstellung der Bleche ist identisch der Darstellung bei einer Rollfalzsimulation ohne Berücksichtigung des Klebstoffs, mit der Ausnahme, dass für die ICFD-Simulation „dicke Schalen" verwendet werden müssen. Dicke Schalen sind Schalenelemente, die eine obere und eine untere Deckfläche haben, deren Abstand genau der Dicke des verwendeten Bleches entspricht. Simulationen mit „dünnen Schalen", bei denen das verwendete Blech durch Schalen, deren Knoten alle in einer Ebene liegen, repräsentiert wird, erfordern aufgrund der geringeren Anzahl von Freiheitsgraden weniger Rechenaufwand als Simulationen mit dicken Schalen. Die Schalendicke muss dann geometrisch durch einen Kontaktabstand korrekt berücksichtigt werden, so dass übereinanderliegende Bleche sich nicht in der Simulation mit-einander überdecken.

Bei der ICFD-Simulation wird bei Verwendung von dünnen Schalen die Kontaktdicke (Blechdicke) nicht berücksichtigt. Deshalb müssen hier in der Simulation die Bleche durch dicke Schalen repräsentiert werden, um die geometrische Situation korrekt wiederzugeben. Abbildung 10 zeigt den Aufbau der Rechnung mit dicken Schalenelementen. Es hat sich dann herausgestellt, dass mit einer Kontaktfläche die ICFD-Rechnung mit Blechen und Klebstoff funktioniert, allerdings sofort abbricht, wenn zwei oder mehr Kontaktflächen benötigt werden. Dies ist hier jedoch der Fall, da der Klebstoff sowohl mit dem Außenblech als auch mit dem innen eingelegten Blech in Kontakt kommt. Abbildung 11 zeigt das Zwischenergebnis einer Rechnung mit nur einer Kontaktfläche.

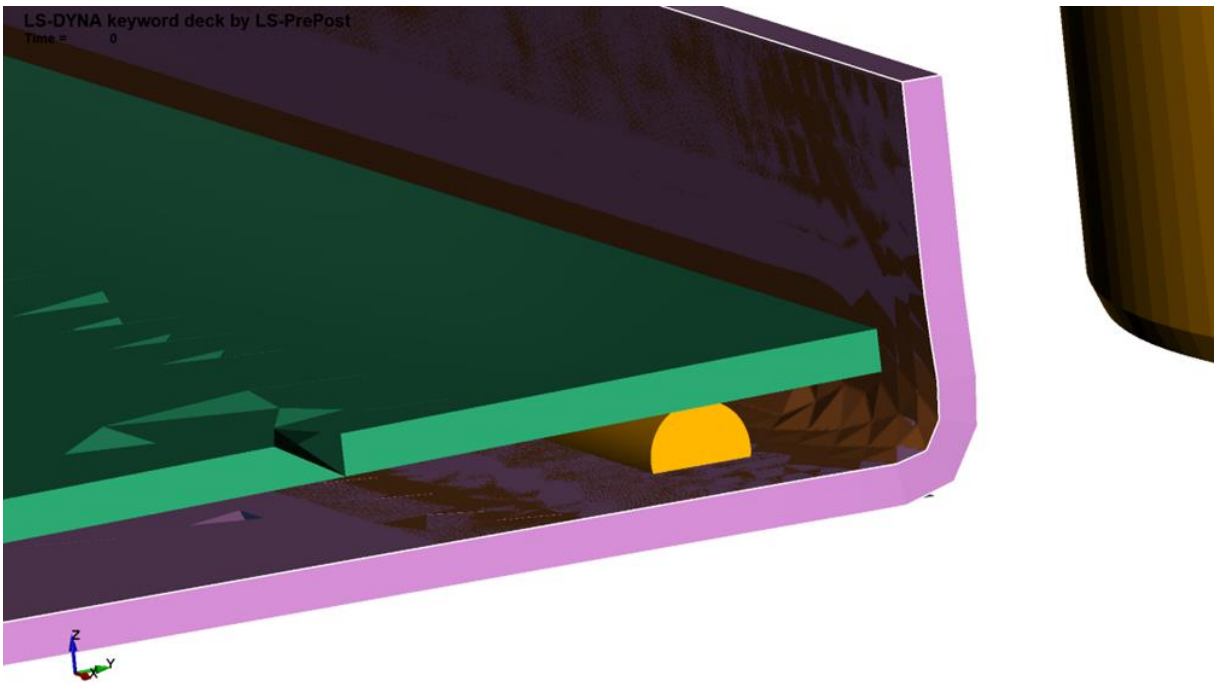

Abbildung 10: ICFD-Simulationsaufbau mit dicken Schalen. Gelb ist der Klebstoff, rot-schattiert der Kontaktbereich gekennzeichnet. Die Ursache der Fehldarstellungen in den Blechen ist ungeklärt.

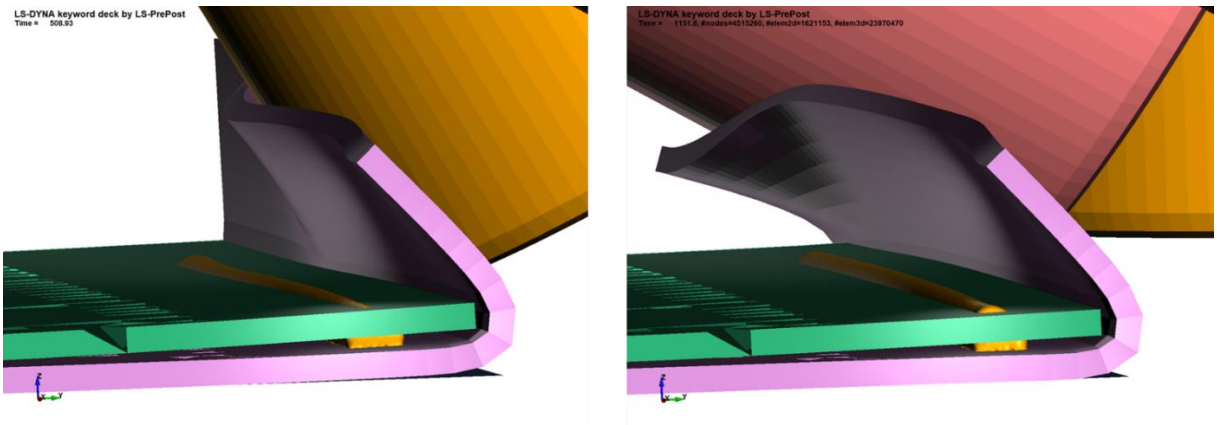

Abbildung 11: ICFD-Simulationsverlauf mit dicken Schalen. Bei nur einer Kontaktfläche (hier die äußere Schale, funktioniert das Simulationsverfahren.

Lange Rechenzeiten:

Gegenwärtig ergeben sich in der Simulation des Rollfalzprozesses mit ICFD sehr große Rechenzeiten. Diese treten nicht auf, wenn das gleiche Modell, ohne Klebstoff und damit auch ohne Kopplung zur flüssigen Phase gerechnet wird.

Da die flüssige Phase während der Rechnung regelmäßig dynamisch neuvernetzt wird und zusätzlich die Kontaktsituation zwischen Klebstoff und Blech immer wieder neu bestimmt werden muss, kann sich zwischen den einzelnen Inkrementen der Rechnung ein erheblicher Rechenaufwand ergeben. In LS-Dyna wird dieser Aufwand auch bei kleineren Aufgabenstellungen teilweise sehr hoch, so dass ein vollständiger Durchlauf einer Rechnung gegenwärtig nicht möglich ist. Als Grund für die großen Rechenzeiten wird wegen der sich ergebenden Auslastung der Prozessoren vermutet, dass diese Arbeit (Kontaktbestimmung und Neuvernetzung) auch bei einer parallelen Rechnung nur von einem Prozessor erledigt wird. Dies konnte auch nicht durch Bereitstellung eines 256 GB Hauptspeichers behoben werden. Auch auf dem Rechencluster des Projektpartner Mercedes-Benz wurde dieser Sachverhalt mit denselben Schlussfolgerungen nachvollzogen.

Unkalkulierbares technisches Risiko:

Bereits in der Antragstellung zu diesem Projekt wurden die möglichen Modellansätze als „nicht ausreichend belastbar und für die Ingenieurpraxis mit einem unkalkulierbaren technischen Risiko behaftet" dokumentiert. Dieses Risiko hat sich hinsichtlich der Simulation des Rollfalzklebprozesses somit dahin bewahrheitet, dass dies noch nicht vollständig möglich ist. Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse zeigen jedoch, dass offensichtlich keine unüberwindlichen Hindernisse in der Programmentwicklung von LS-Dyna zu bewältigen wären. Es ist dabei jedoch zu bemerken, dass das ICFD-Modul des Programmsystems von LS-Dyna in den USA weiterentwickelt wird, außer für Routinen zur Materialdarstellung des Klebstoffs jedoch innerhalb des Projektes keine zusätzlichen Mittel für die Weiterentwicklung von Software vorgesehen waren. Das Gleiche gilt für die numerische Performance der ICFD-Simulation, die ebenfalls zwar prinzipiell funktioniert, jedoch für größere Aufgabenstellungen nicht verwendet werden kann. Auch hierfür wurden bei der Projektplanung keine Mittel vorgesehen.

Schlussfolgerung:

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden verschiedene numerische Ansätze, den Rollfalzklebprozess zu simulieren, sehr umfassend untersucht. Dabei konnten sehr gute Ansätze zur Simulation des vollständigen Rollfalzklebens einschließlich Klebstoff identifiziert werden. Um diese tauglich für einen industriellen Einsatz zu gestalten, ist jedoch noch ein Programmieraufwand beim Programmhersteller erforderlich, dessen Umfang sich noch nicht einschätzen lässt.

Die für das Projekt geplanten Aufgaben und Untersuchungen wurden erfüllt und abgeschlossen, das gestellte Ziel, Erhöhung des TRL von 2 auf 4, damit erreicht.

1.2 Aufbau der Gesamtsimulation des KTL-Prozesses auf Basis der Daten und Materialparameter von den Verbundpartnern

Im Hinblick auf das im AP 3 angestrebte Ziel, sowohl den kompletten Fertigungsprozess als auch die im Nutzungszyklus eines Fahrzeugs wirkenden Lastfälle einschließlich Crash, digital berechnen und optimieren zu können, ist die realistische Berücksichtigung von Klebverbindungen zwingend notwendig. Die Implementierung der in diesem Projekt entwickelten Klebstoffmodelle in die Trockner-Verzugssimulation soll in der Lage sein, sowohl die Aushärtekinetik des Klebstoffs detaillierter abzubilden als auch das Versagen der Klebverbindung zu prognostizieren. Die Berücksichtigung von Letzterem wird dazu beitragen, frühzeitig im Entwicklungsprozess neuer Fahrzeuge Optimierungen im Fertigungsprozess hinsichtlich Dauerfestigkeit, Korrosionsschutz und Insassensicherheit vornehmen zu können. Als Projektergebnis wurde prototypisch eine Berechnungsmethode bereitgestellt, die in der bestehenden Simulationsumgebung angewendet werden kann.

Da die durchgängig simulative Abbildung des Rollfalzklebprozesses mit bedateter Klebstoffraupe mit den gegenwärtig verfügbaren Versionen der Software LS-Dyna nicht erfolgreich zum Abschluss gebracht werden konnte, wurde für den KTL-Durchlauf ein Seitenschweller anstatt eines Bauteils mit Rollfalzen gewählt. Der Schwerpunkt liegt auch dabei auf den lokalen Temperaturen, der sich daraus ergebenden lokalen Zeit-Temperatur-Festigkeit des Klebstoffs und dem finalen Verzug des Bauteils, wobei letzteres zu vermeiden bzw. zu minimieren ist.

Den seitens Mercedes-Benz gewählte Seitenschweller mit Verstärkung zeigt Abbildung 12. Dabei ist die innere Schale aus Stahl (CR780Y980T), die Äußere aus Aluminium (AW 6082) und beide Schalen sind miteinander geklebt (Strukturklebstoff BETAMATE™ 1640) und mechanisch gefügt. Damit bleiben die Arbeitsinhalte von AP 3 unverändert.

Abbildung 12: Schwellerstruktur aus Stahl und Aluminium (Bild: Mercedes-Benz)

Im AP 3.1 befasste sich inpro mit dem Aufbau eines Simulationsmodells zur Abbildung des KTL-Durchlaufs. Es wurde angestrebt, eine robuste Modellierungsmethodik des KTL-Durchlaufs zur Abbildung des mechanischen Ausdehnungsverhaltens und der Interaktion der Bauteilkomponenten sowie der

Klebstoffraupe im Simulationsprogramm LS-Dyna zu ermitteln. Hierfür wurde ein zweiphasiger Ansatz gewählt.
Im ersten Schritt erfolgte die Methodenentwicklung im ausführlichen Austausch mit dem Projektteam. In der zweiten Phase im Anschluss an die experimentellen Untersuchungen erfolgte die Validierung der entwickelten Methodik.
Für die ersten Untersuchungen wird eine exemplarische zeitabhängige inhomogene Temperaturverteilung eingesetzt und das Ausdehnungsverhalten simuliert. Die Simulation wurde mit zwei zur Verfügung gestellten Materialkarten MAT_277 (*MAT_ADHESIVE_CURING_VISCOELASTIC) und MAT_307 (*MAT_GENERALZED_ADHESIVE_CURING) des Strukturklebstoffes und zwei Solver-Typen (SMP und MMP) durchgeführt.

Geometrie und räumliche Diskretisierung

Das Zielbauteil ist ein Abschnitt des in Abbildung 12 gezeigten Schwellers, der daraus gebildete Längsträger wird in Abbildung 13 dargestellt. Beide Hauptkomponenten werden durch Mittelflächenmodelle repräsentiert und mithilfe von Vierecks-Shell-Elementen diskretisiert. Die Klebstoffraupe erstreckt sich von Punkt 1 zu Punkt 2 und wird als Volumenmodell repräsentiert, das mit Quader-Elementen vernetzt ist. Die diskretisierte Baugruppe wurde durch den Projektpartner Mercedes-Benz zur Verfügung gestellt.

Randbedingungen und Modellaufbau

Es wurde eine exemplarische, mechanische Randbedingungskonfiguration gewählt, die große Relativverschiebungen und somit eine Validierung der Modellrobustheit ermöglicht. Deshalb wurde eine einseitige Einspannung des Längsträgers gewählt (siehe Abbildung 13), so dass am gegenüberliegenden Ende maximale Verschiebungen auftreten.
Die exemplarische zeitabhängige sowie inhomogene Temperaturverteilung im KTL-Durchlauf wurde durch Mercedes-Benz im Rahmen einer Strömungssimulation ermittelt, auf die Stützstellen des Mittelflächennetzes übertragen und inpro zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 14).

Zur Modellierung des Ausdehnungsverhaltens wurde ein thermo-mechanisches Modell in LS-Dyna aufgebaut. Hierbei erfolgte eine unidirektionale Kopplung des Temperatur- und Verschiebungsfeldes. Dazu wurde das separat als Binär-Datei abgespeicherte Temperaturfeld mit Hilfe der Anweisung *LOAD_THERMAL_BINOUT ins Modell integriert. DuPont stellte zwei Materialkarten zur Abbildung des Klebstoffs bereit (MAT_277 und MAT_307), Mercedes-Benz für die Materialien Stahl und Aluminium entsprechende elasto-plastische Materialmodelle. Alle Materialkarten wurden nach einer Einheitenanpassung in das Simulationsmodell integriert.

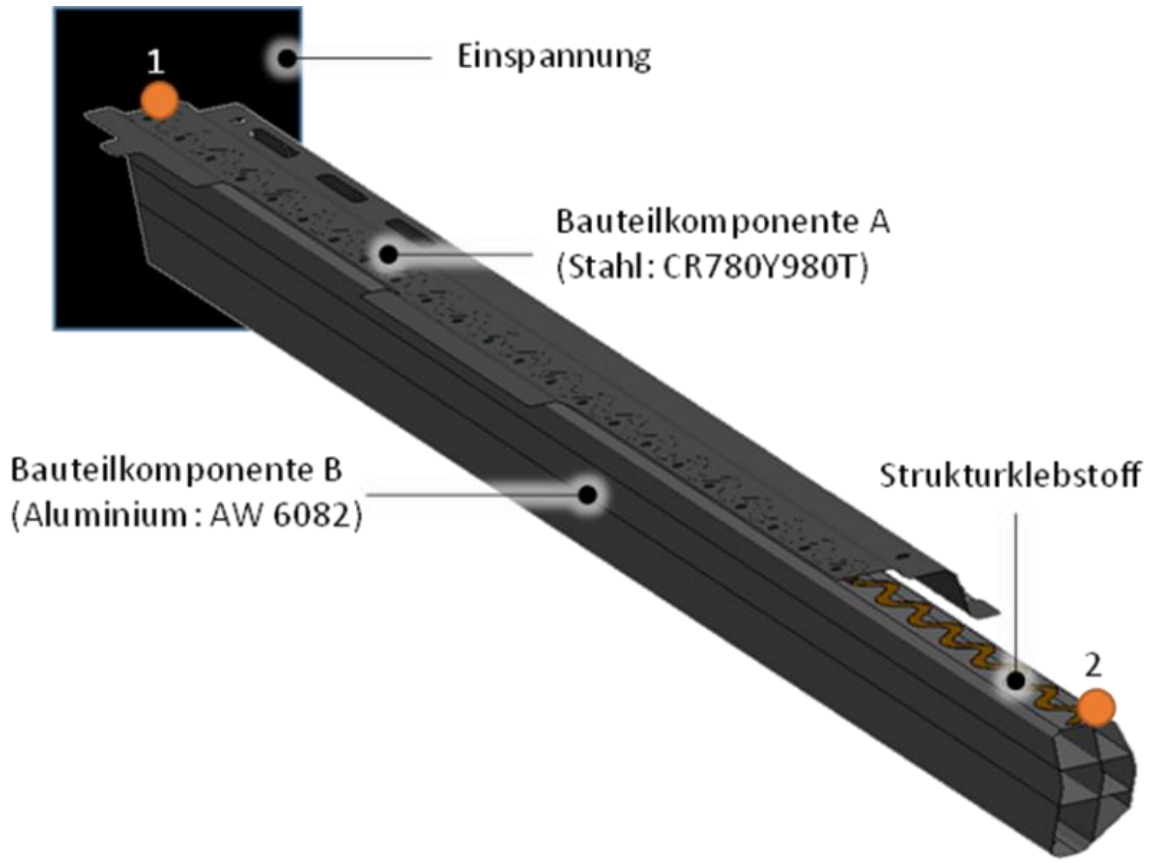

Abbildung 13: Zielbauteil Längsträger

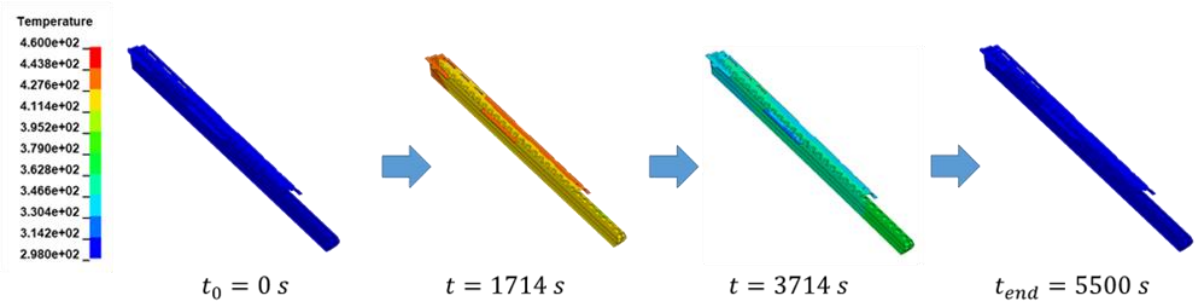

Abbildung 14: Temperaturverteilung des Längsträgers zu ausgewählten Zeitpunkten

Die Kontaktmodellierung (Haftung) zwischen Klebstoffraupe und Metallkomponenten erfolgt mit Hilfe eines hart gekoppelten Kontaktes, so dass trotz unterschiedlicher Elementierungen keine relative Bewegung der Kontaktoberflächen zueinander auftritt. Der betrachtete Zeitraum (KTL-Durchlauf) beträgt ca. 90 min. Dabei werden lediglich geringe Dehnungsgeschwindigkeiten infolge von thermischer Dehnung erwartet. Um die Berechnungszeit auf ein Minimum zu reduzieren, wird eine implizite

Zeitintegration mit variabler Zeitschrittweite eingesetzt. Zur Stabilisierung der Integration wird Elementlöschung aktiviert, so dass eine Löschung stark deformierter Elemente automatisch erfolgt. Es werden jeweils MPP- als auch SMP-Solver zur Integration eingesetzt.

Ergebnis

Die Simulation wird für beide zur Verfügung gestellten Materialkarten des Strukturklebstoffes durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass unter Verwendung des MPP-Solver ein stabiler Simulationsdurchlauf erfolgt und das Ziel der Erarbeitung einer robusten Modellierungsmethodik erfüllt werden konnte.

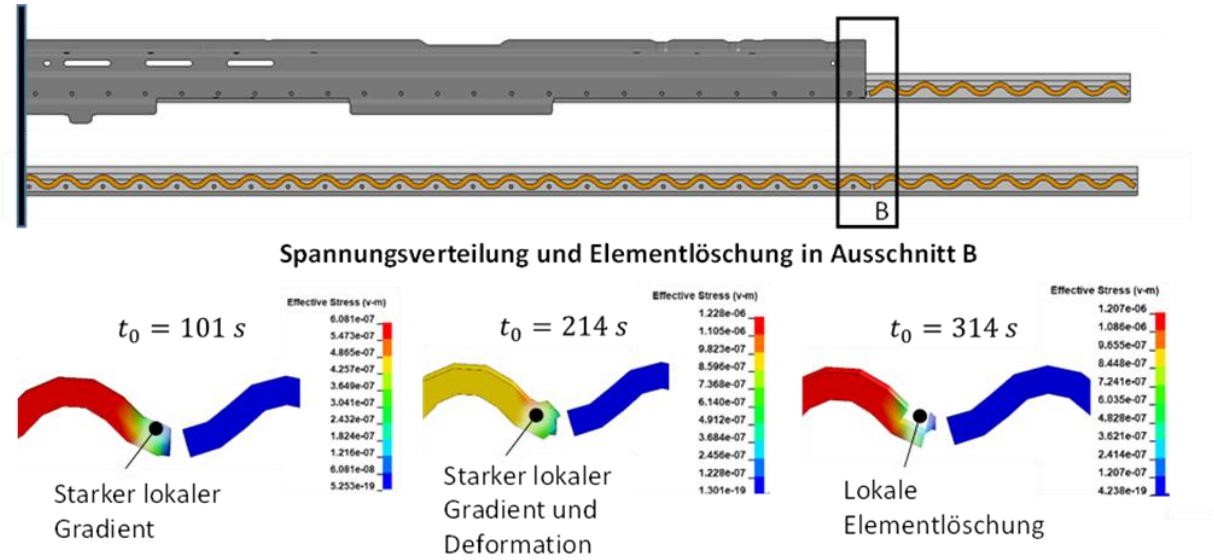

Abbildung 15: Spannungsverteilung und Elementlöschung

Wie in Abbildung 15 dargestellt, treten im Übergangsbereich von beidseitigem Blechkontakt der Klebstoffraupe zu nur einseitigem Kontakt (Ausschnitt B) große Spannungsgradienten auf. Daraus resultierend entstehen signifikante Elementdeformationen der Klebstoffraupe. Dies hat eine lokale Elementlöschung zufolge. Da jedoch nur eine sehr geringe Anzahl an Elementen gelöscht wird und somit nur vernachlässigbare Auswirkungen auf das Gesamtergebnis erfolgen, wird dieses als hinnehmbar erachtet.

Die eingesetzte Materialkarte ermöglicht die Berücksichtigung und Darstellung des lokalen Aushärtegrades. In Abhängigkeit des lokalen Temperatur-Zeit-Profils erfolgt eine inhomogene Aushärtung des Klebstoffes. Der Aushärtezeitraum scheint nur geringfügig zu schwanken.

Während der Erwärmungsphase bewirken die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen der Stahl- und Aluminiumkomponente eine Relativverschiebung beider Komponenten zueinander (siehe Abbildung 16). Die zeitgleich ablaufende Aushärtung der Klebstoffschicht führt jedoch zu einem Einfrieren des thermisch ausgedehnten Zustandes, so dass sich die beiden Komponenten aus Stahl und

Aluminium bei der anschließenden Abkühlung gegenseitig in ihrer negativen Ausdehnung (Schrumpfung) behindern. Als Folge treten in der Klebschicht und den beiden Grenzflächenschichten thermisch induzierte Spannungen auf, die einen Verzug (Scherung) der Klebschicht verursachen und im schlimmsten Fall sogar zum Versagen der Klebung führen können.

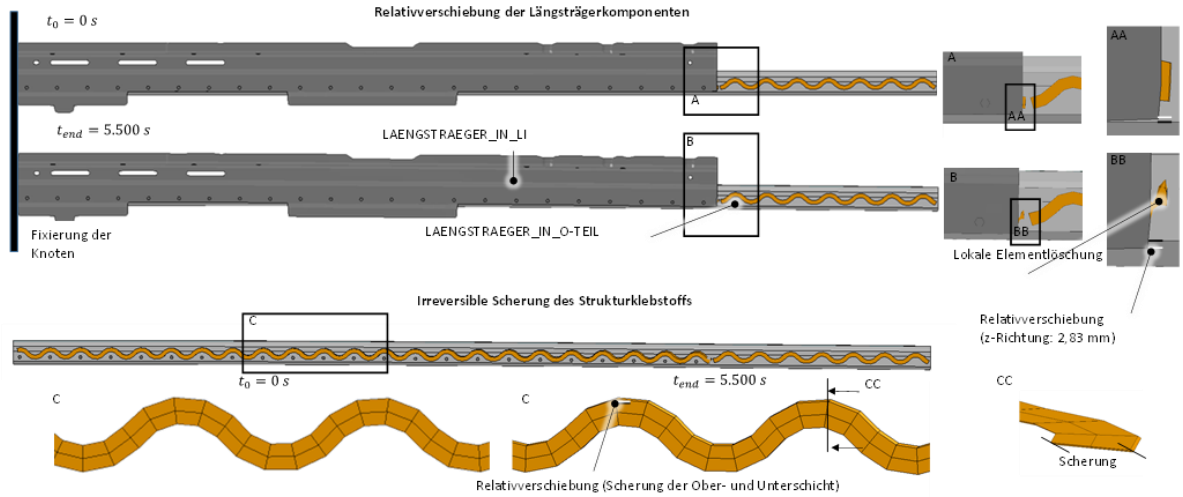

Abbildung 16: Relativverschiebung der Längsträgerkomponenten und Scherung der ausgehärteten Klebschicht

Durch den Projektpartner DYNAmore wurde zusätzlich eine weitere Modellierungsmethodik angeregt. Diese umfasst eine alternative Modellierung der Klebschichtgeometrie, der eingesetzten Elementform und des Kontaktalgorithmus. Die Klebschicht wird aufgedickt, bis sie bündig mit den Blechen im Kontakt steht. Dies ermöglicht den Einsatz eines direkten hart gekoppelten Kontaktes ohne Abstandsvorgabe. Die Modellierungsmethode wurde erfolgreich für eine transiente homogene Temperaturverteilung eingesetzt. Somit stehen zwei Methoden zur Abbildung der Klebstoffaushärtung zur Verfügung.

Im nächsten Schritt erfolgte die Validierung der erarbeiteten Simulationsmethoden. Hierzu wurden seitens MB experimentelle Aushärtungsversuche im KTL-Prozess am Längsträger durchgeführt und die gewonnenen experimentellen Daten zur Verfügung gestellt. Auf Basis der zeitlichen Temperaturverteilung und Testgeometrie wurde ein Simulationsmodell erstellt. Die entsprechenden Geometrie- sowie Modellierungsdetails hinsichtlich eingesetzter Elementform und eingesetztem Materialmodell sind in Abbildung 17 dargestellt.

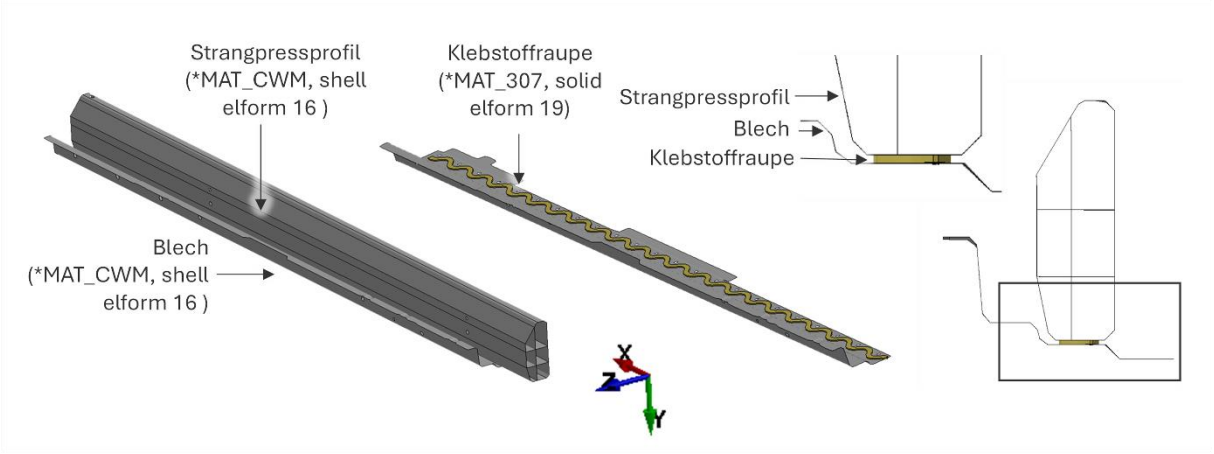

Abbildung 17: Simulationsmodell der experimentell untersuchten Längsträgergeometrie

Zusätzlich zur Klebung werden Verschraubungen zwischen dem Stranggussprofil und dem Blech vorgenommen. Hierfür werden die Fügekombinationen Rundloch-Langloch (Festlager - Loslager) und Rundloch-Rundloch (Festlager - Festlager) eingesetzt. Die letztere Kombination wird für den Zweck der Validierung herangezogen. Die entsprechende Modellierung ist in Abbildung 18 dargestellt und mithilfe eines Beam-Elementes und dem Befehl CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY umgesetzt worden.

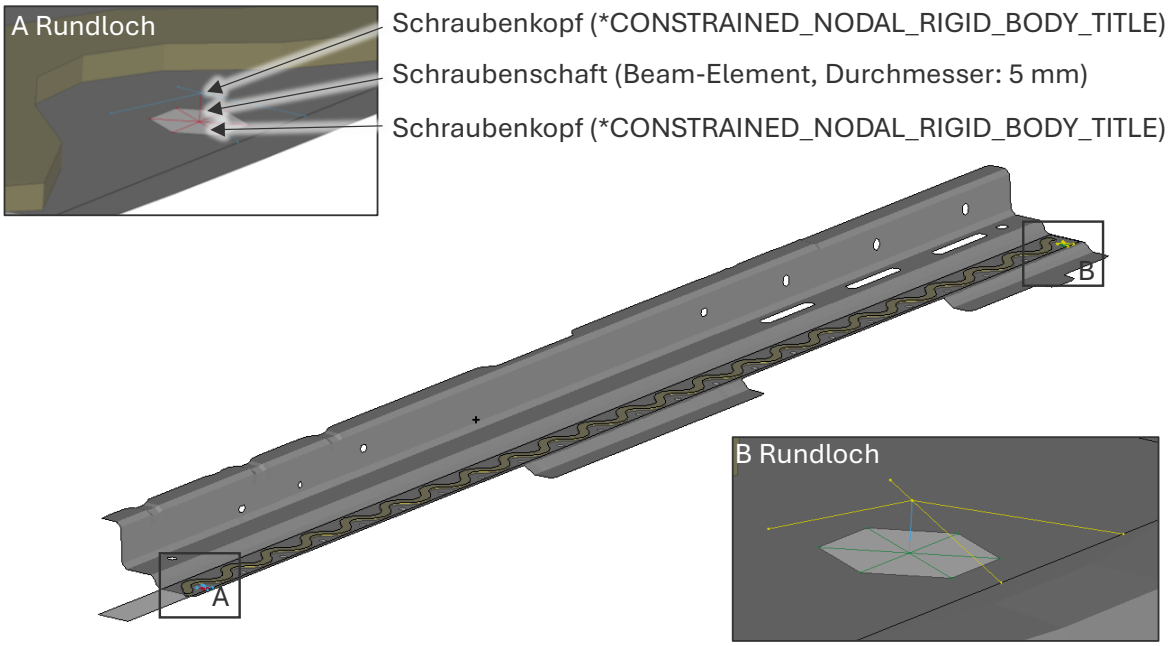

Abbildung 18: Modellierung der eingesetzten Schraubverbindungen

Um den ca. 90-minütigen Erwärmungs- und Abkühlprozess effizient zu simulieren, wird ein implizites Zeitintegrations-Schema eingesetzt. Im Rahmen der Auswertung der Simulationsergebnisse wurde im ersten Schritt überprüft, ob die modellierten Verschraubungen tatsächlich die gewünschte Blockie-

rung in alle Raumrichtungen induzieren. In Abbildung 19 ist das von-Mises-Spannungsfeld dargestellt. Die rundum verlaufende Spannungsverteilung entspricht den Erwartungen, so dass eine erfolgreiche Modellierung der Fügeverbindungen angenommen wird.

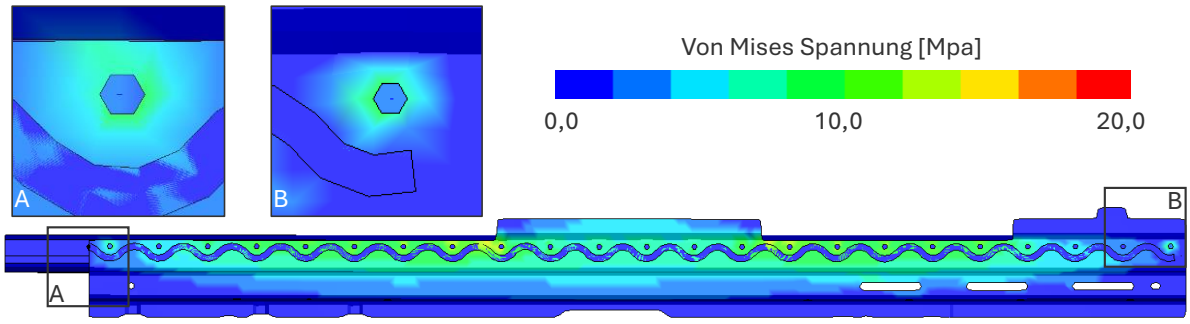

Abbildung 19: Vorhergesagte Spannungsverteilung zur Bewertung der modellierten Schraubverbindung

Zur Verbesserung der allgemeinen Vergleichbarkeit zwischen Messgeometrie und Mittelflächenmodell wurde in Python ein Algorithmus erstellt, der basierend auf der deformierten Mittelflächen-Geometrie des Simulationsmodells die Außenflächen erzeugt. Im Anschluss an eine Positionierung zur Messgeometrie erfolgte eine Analyse der Vorhersagegenauigkeit.

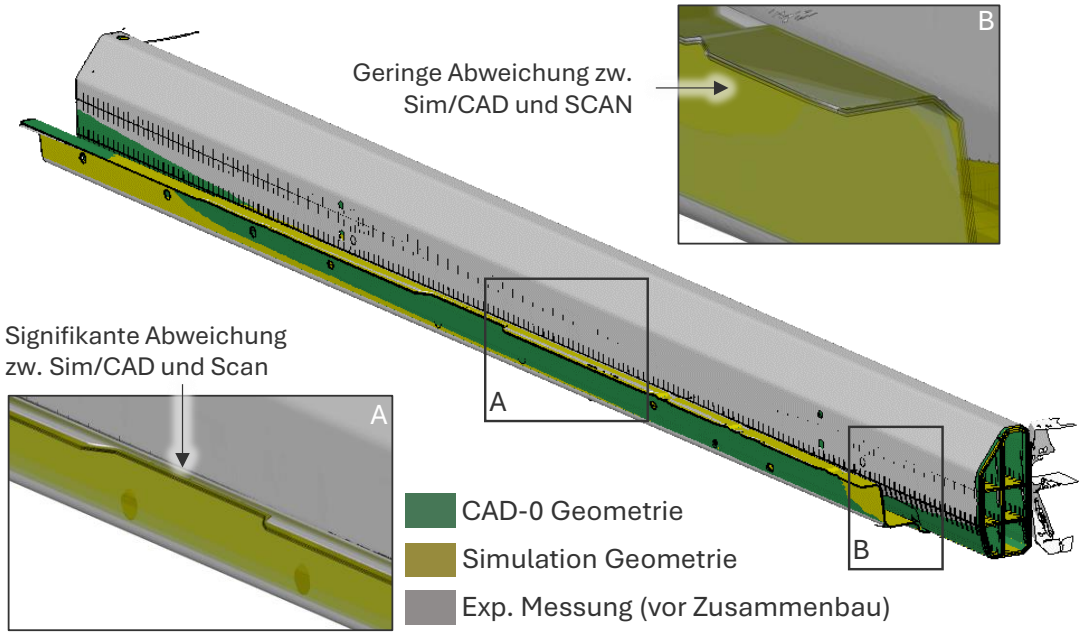

Abbildung 20: Vergleich des Scans und der CAD-0- sowie vorhergesagten Längsträgergeometrie

Es zeigte sich eine deutliche Abweichung der vorhergesagten und realen Blechgeometrie (siehe hierzu Abbildung 20). Dies ist wahrscheinlich auf die bereits stark deformierte Form der initialen Blechgeometrie vor dem Fügen zurückzuführen. Ein Vergleich zwischen der simulierten Ausgangs-

und Deformationsgeometrie mit der Messgeometrie lässt keinen finalen Rückschluss auf die Vorhersagegüte des Simulationsmodells zu, da die beobachteten Deformationen zu klein sind. Ferner lassen sich nur ungenaue Längenvergleiche beider Geometrien vornehmen, da geometrische Referenzmerkmale (Bohrlöcher und Stirnseiten) ungenügend aufgelöst sind (vergleiche hierzu Abbildung 21). Trotz dieser Nachteile gelingt eine Validierung mithilfe eines qualitativen Vergleichs der Flächenausrichtungen zwischen Experiment und Simulation.

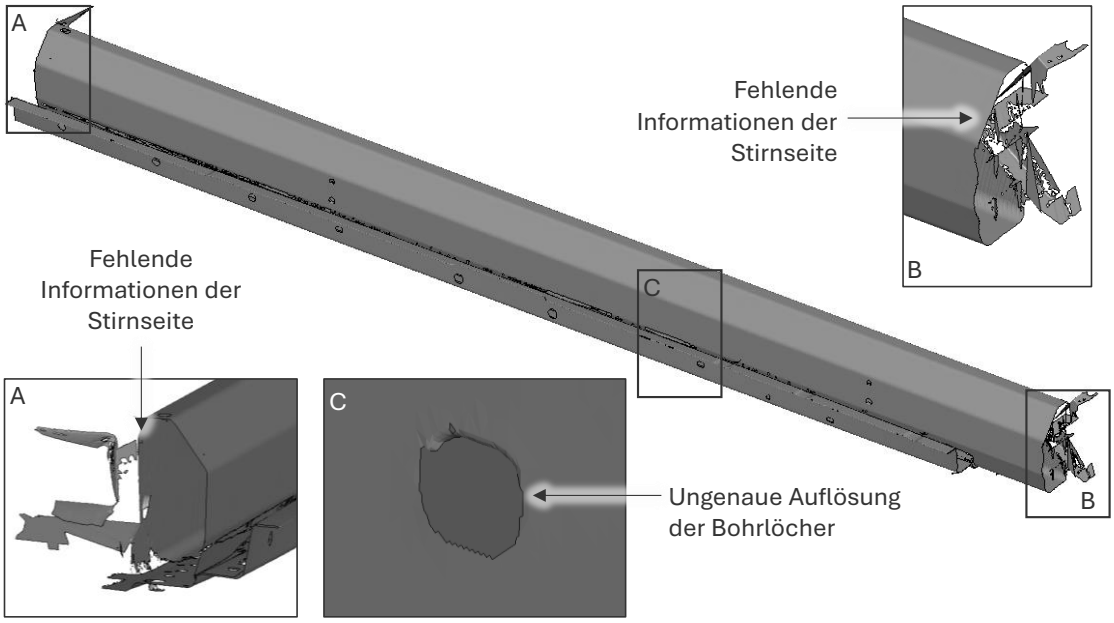

Abbildung 21: Mangelhafte Auflösung geometrischer Referenzmerkmale im Bauteilscan

In Abbildung 22 ist die Biegung des Bauteils um die z-Achse dargestellt. Eine Biegung des Stranggussprofils in negativer y-Richtung wurde vorhergesagt. Werden die Oberflächenvektoren der beiden Außenseiten der Messgeometrie vor und nach dem KTL-Prozess miteinander verglichen (in Abbildung 22 sind diese überzeichnet dargestellt), ist eine positive Rotation in Punkt A und eine negative Rotation in Punkt B festzustellen. Dies deutet auf eine leichte Krümmung des Stranggussprofils infolge einer durch den KTL-Prozess induzierten Biegung hin.

Eine entsprechende Biegung um die y-Achse der realen Geometrie ist in Abbildung 23 dargestellt. Auch hier zeigt sich eine leichte, der vorhergesagten Geometrie entsprechende Krümmung des Stranggussprofils. Die vorhergesagten Deformationen des Stranggussprofils, die durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten und die Aushärtung des Klebstoffes im KTL-Prozess induziert wurden, können in ähnlicher Weise im Experiment beobachtet werden. Die vorgenommene Modellierung des KTL-Prozesses ist also in Bezug auf die Deformation des Stranggussprofils valide.

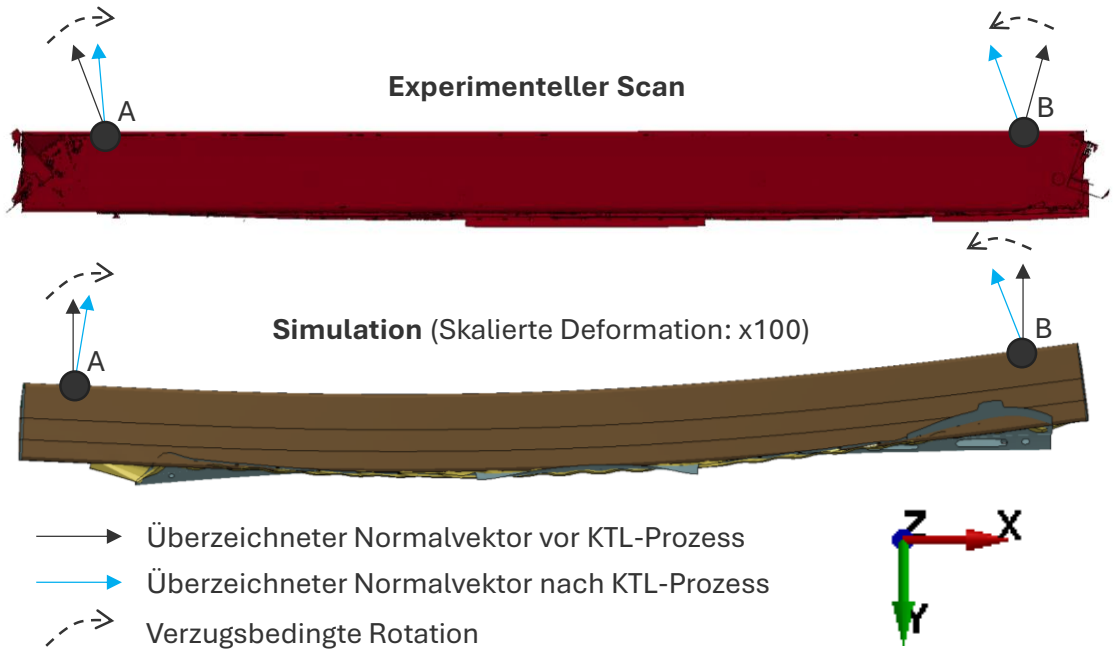

Abbildung 22: Qualitativer Flächenvergleich der Simulation und des experimentellen Scans (Biegung des Bauteils um die z-Achse.)

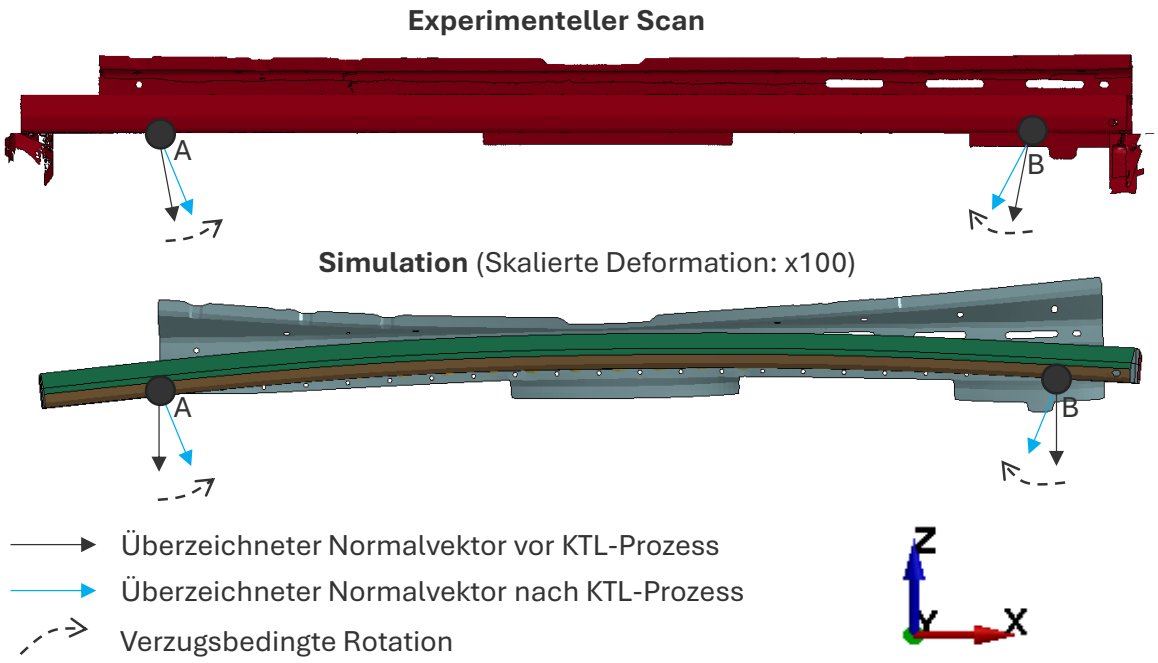

Abbildung 23: Qualitativer Flächenvergleich der Simulation und des experimentellen Scans (Biegung des Bauteils um die y-Achse.)

Eine entsprechende Biegung um die y-Achse der realen Geometrie ist in Abbildung 23 dargestellt. Auch hier zeigt sich eine leichte, der vorhergesagten Geometrie entsprechende Krümmung des

Stranggussprofils. Die vorhergesagten Deformationen des Stranggussprofils, die durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten und die Aushärtung des Klebstoffes im KTL-Prozess induziert wurden, können in ähnlicher Weise im Experiment beobachtet werden. Die vorgenommene Modellierung des KTL-Prozesses ist also in Bezug auf die Deformation des Stranggussprofils valide.
Ferner ist in Abbildung 22 zu beobachten, dass das Stahl-Deckblech eine Krümmung um die z-Achse besitzt. Diese ist visuell deutlich besser wahrzunehmen als die Krümmung des Stranggussprofils. Der Spalt zwischen Stranggussprofil und Deckblech in der vermessenen Geometrie ist jedoch deutlich größer ist als in der Vorhersage. Mögliche Gründe hierfür könnten eine nicht homogene Haftung des Klebstoffes im Experiment oder eine numerische Überschätzung der Steifigkeit in Dickenrichtung der Abschließend ist festzustellen, dass das qualitative durch den KTL-Prozess induzierte Deformationsverhalten vorhergesagt werden konnte. Somit ist auch im AP 3 die angestrebte Steigerung des TRL 3 auf TRL 7 gelungen.
Aussagen zur Qualität der quantitativen Vorhersage ließen sich im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht vornehmen.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Bei inpro wurde der überwiegende Teil der Zuwendungen für Personal aufgewendet (nahezu 100 %). Entgegen der Projektplanung stellte sich während der Projektlaufzeit heraus, dass inpro die Simulationsaufgaben fast ausschließlich mit bereits bei inpro zu Sonderkonditionen lizensierter Software bearbeiten konnte, so dass nur knapp 5 % der geplanten Lizenzkosten angefallen sind. Auch die tatsächlichen Reisekosten liegen durch COVID-19 bedingte Reisebeschränkungen bei nur rund 50 % des Planwerts. Weiterhin wurden die Eingangsgrößen (experimentelle Daten) für die Simulationsaufgaben von den übrigen Projektpartnern pandemiebedingt erst relativ spät im Projektverlauf an inpro geliefert, so dass inpro hier gezielt in konzertierten Arbeitsphasen besonders leistungsfähiges Personal einsetzen konnte, was gegenüber der Planung zu einer Einsparung von ca. 30 % der Personalkosten führte. Die Nutzung der gewohnten Software stellte ebenso eine deutliche Aufwandsreduktion dar. Eine detaillierte Aufschlüsselung des gesamten Zuwendungsbetrags nach einzelnen Kostenarten wird im Rahmen des Verwendungsnachweises erfolgen.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

In dem Verbundprojekt wurden Synergieeffekte zwischen der anwendungsorientierten Expertise der Industriepartner und den wissenschaftlich-methodischen Kompetenzen der Forschungsinstitute produktiv genutzt, so dass die geleisteten Aufwände zu guten Ergebnissen führten. Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang der Vorhabenbeschreibung und war daher für die Durchführung des Projektes notwendig und angemessen. Insgesamt waren die durchgeführten Arbeiten zur Erreichung der einzelnen Ziele innerhalb der Arbeitspakete wie auch zur Erreichung der übergeordneten Ziele des Forschungsprojektes erforderlich.

Eines der Hauptziele des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer ganzheitlichen Simulationsmethodik zur Beurteilung der Güte von Klebverbindungen im Automobilbau. Die zum Zeitpunkt der Antragsstellung existierenden Modellansätze konnten insbesondere das Klebstoffverhalten vor dem Gelpunkt nicht ausreichend abbilden, so dass das angestrebte Forschungsziel der virtuellen Abbildung des Rollfalzklebprozesses mit bedateter Klebstoffraupe sehr risikobehaftet war. Diese Herangehensweise war für die beteiligten Partner aufgrund des hohen finanziellen Risikos in einer eigenfinanzierten Entwicklung nicht zu bewältigen. Ohne die entsprechende Förderung für dieses anspruchsvolle und ökologisch zukunftsorientierte Forschungsvorhaben wäre es nicht möglich gewesen, die dargestellten Ergebnisse zu erzielen. Aufgrund der kostenneutralen Laufzeitverlängerung um sechs Monate konnten alle Arbeiten fristgerecht bis zum Ende der Projektlaufzeit durchgeführt werden. Die zugewiesenen Mittel wurden zweckbestimmt und sinnvoll eingesetzt.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

inpro als eine der führenden Institutionen in der Software-Entwicklung von Prozesskettenmodellierungen für Fertigungsverfahren insbesondere im Automobilbau kann mit der Erweiterung der simulierten Prozesskette bis nach dem KTL-Ofen ihr Angebotsspektrum nicht nur wesentlich ausbauen, sondern erhält durch die Projekteergebnisse einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil. Basis dafür bilden Programme zur Übertragung der Ergebnisse sowohl einzeln simulierter Fertigungsschritte als auch kompletter Fertigungsprozesse von einem Simulationsprogramm zum nächsten unter Beibehaltung einer maximalen Informationsmenge einschließlich der entsprechenden Neuvernetzung der FE-Geometrien bis hin zur Erzeugung von CAD-Daten aus Ergebnissen von Fertigungssimulationen.

Zusätzlich wurden die Kompetenzen hinsichtlich der Modellierung transienter Strömungsprozesse und davon abhängiger Wärmeleitung in den umströmten Körpern wesentlich gestärkt, was nach Ablauf des Verbundvorhabens die Grundlage für die Akquise weiterer Aufträge von inpro-Kunden bildet.

Mit Hilfe des DigiBody Projektes konnte durch eine verbesserte digitale Abbildung weiteres Vertrauen in die Klebtechnik geschaffen werden, was letztendlich zu einer Verbesserung der Marktdurchdringung von Klebverbindungen führen wird.

Die Detaillierung der virtuellen Abbildung des Rollfalzklebprozesses mit bedateter Klebstoffraupe konnte im Verbundvorhaben nicht komplett finalisiert werden, jedoch kann auf den entwickelten Teillösungen weiter aufgebaut werden. Andere Forschungsgruppen können den losgetretenen Faden aufnehmen und andere Wege versuchen, um zu besseren Ergebnissen zu gelangen. Das Interesse an diesen komplexen Themen ist geweckt. Bei ausreichender Nachfrage wurde DYNAmore ein Weg aufgezeigt, seine Software für den noch ausstehenden finalen Schritt zu ertüchtigen.

Um den Wissenstransfer der in DigiBody gewonnenen Erkenntnisse erfolgreich zu gestalten, wird sich inpro weiter in einschlägige Vereine, Arbeitsgruppen und Gremien einbringen und damit gewährleisten, dass die Vorhabenergebnisse eine breite Anschlussfähigkeit in der Wissenschaft und in der Wirtschaft erfahren.

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Keine

6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Während der Projektlaufzeit wurden Teile der inpro-Projektergebnisse veröffentlicht:

- S. Jamei, U. Prieske, F. Fürle, A. Droste, A. Haufe, H. Gleich, K. Kose, G. Meschut, T. Aubel, D. Sommer, S. Facciotto: „Digital Process Chain for Simulation and Optimizing of Joining Technology in the BiW", 24th International Dresden Lightweight Engineering Symposium, Dresden, 2021
- S. Jamei, N. Dölle, S. Lossau, F. Fürle, A. Droste, A. Haufe, M. Helbig, H. Gleich, K. Kose, G. Meschut, T. Aubel, F. Beule, M. Al Trjman, D. Sommer, S. Facciotto: „DigiBody - Digitale Prozesskette zur Abbildung und Optimierung der Fügetechnik im Rohbau", 22. Kolloquium: Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, Frankfurt am Main, 2022

Es wird angestrebt, den Prozess für die multidisziplinäre Optimierung der Schweißnähte in der Tür in einem Paper eines Journals oder einer internationalen Konferenz zu veröffentlichen.
Des Weiteren ist nach Abschluss des Vorhabens eine Veröffentlichung der Projektergebnisse in Form eines Beitrags in einem internationalen Journal geplant. Damit ergibt sich zusätzlich die Möglichkeit, die Ergebnisse dem relevanten Anwenderkreis auf einer internationalen Konferenz zu präsentieren.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Partnerspezifischer Schlussbericht der inpro
3. Titel Verbundvorhaben: DigiBody – Digitale Prozesskette zur Abbildung und Optimierung der Fügetechnik im Rohbau, Teilvorhaben: Simulative Absicherung der Maßhaltigkeit des Falzklebprozesses	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Bohne, Florian; Kose, Kim; Gleich, Henning	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2022
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Document Control Sheet
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) **inpro** Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH, Steinplatz 2, 10623 Berlin	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19I19003C
	11. Seitenzahl 29
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland Postanschrift: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 11019 Berlin	13. Literaturangaben 0
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 23
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Prof. Dr.-Ing. Henning Gleich, Berlin, 30.03.2023	

18. Kurzfassung

Im modernen Mischbau ist die Klebtechnik unverzichtbar, da sie nahezu unabhängig von der Art der Fügeteilwerkstoffe eingesetzt werden kann und oft die einzige Verbindungsmöglichkeit ist. Des Weiteren bieten Klebverbindungen den Vorteil, die Eigenschaften der Fügepartner in der Gesamtstruktur möglichst optimal einzusetzen. Das Ziel des Verbundprojektes „DigiBody" war es, die Güte von Klebverbindung in komplex belasteten Bauteilen mit Hilfe digitaler Modelle vorhersagen zu können. Dabei wurden die Wechselwirkungen der realen Produktions-, Produkt- und Betriebsinformationen in der Fahrzeugentwicklung berücksichtigt. Dies ermöglicht zukünftig eine virtuelle, kostengünstige Prozessoptimierung, sowie eine Minimierung der mechanisch gefügten Verbindungen. Durch die Reduktion der Fügeoperationen können entscheidende Kosten gesenkt und Leichtbaukonstruktionen aus strategischen Materialien effizient und flächendeckend zum Einsatz kommen. Das Projekt wird somit einen entscheidenden Beitrag leisten, den Trend der zunehmenden Anzahl von Fügestellen im Fahrzeugrohbau umzukehren, bis hin zur Vision eines vollständig geklebten Rohbaus.

Innerhalb des inpro-Teilvorhabens wurde insbesondere das Zusammenspiel zwischen Falzgeometrie und Deformation der Klebstoffraupe sowie das Herausdrängens des Klebstoffes aus der Fuge während des Rollfalzens simulativ berücksichtigt. Hier existierte vor Projektbeginn keine abgesicherte Simulationstechnik. Des Weiteren erfolgte danach der Aufbau der Gesamtsimulation des KTL-Prozessschrittes auf Basis der seitens der Projektpartner bereitgestellten Daten und Materialparameter.

19. Schlagwörter Automobilindustrie, Automobilproduktion, Digitalisierung, Fügetechnik, Klebtechnik, Simulation, CAE	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Partner-specific final report of the inpro
3. title Joint project: DigiBody - Digital Process Chain for Simulation and Optimizing of Joining Technology in the BiW: Simulative validation of the dimensional accuracy of the fold bonding process	
4. author(s) (family name, first name(s)) Bohne, Florian; Kose, Kim; Gleich, Henning	5. end of project 2022/09/30
	6. publication date
	7. form of publication Document control sheet
8. performing organization(s) (name, address) **inpro** Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH, Steinplatz 2, 10623 Berlin	9. originator's report no.
	10. reference no. 19I19003C
	11. no. of pages 29
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Protection of the Federal Republic of Germany Postal address: Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Protection, 11019 Berlin	13. no. of references 0
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 23
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Prof. Dr.-Ing. Henning Gleich, Berlin, 2023/03/30	
18. abstract Adhesive bonding technology is indispensable in modern mixed construction, as it can be used almost independently of the type of joining part materials and is often the only joining option. Furthermore, bonded joints offer the advantage of optimally utilizing the properties of the joining partners in the overall structure. The aim of the joint project "DigiBody" was to be able to predict the quality of bonded joints in components subject to complex loads with the aid of digital models. The interactions of real production, product and operating information in vehicle development were taken into account. In future, this will enable virtual, cost-effective process optimization and minimization of mechanically joined joints. By reducing the number of joining operations, crucial costs can be cut and lightweight constructions made from strategic materials can be used efficiently and across the board. The project will thus make a decisive contribution to reversing the trend of an increasing number of joints in vehicle body-in-white construction, leading to the vision of a completely bonded body-in-white. Within the inpro sub-project, the interaction between the hemming geometry and the deformation of the adhesive bead as well as the displacement of the adhesive from the joint during the roller hemming process were simulated. No reliable simulation technology existed here before the start of the project. Furthermore, the overall simulation of the cathodic dip coating process step was then set up on the basis of the data and material parameters provided by the project partners.	
19. keywords automotive industry, automotive production, digitalization, joining technology, adhesive bonding technology, simulation, CAE	
20. publisher	21. price