

Experimentelle und numerische Untersuchungen des Crashverhaltens hybrid gefügter Verbindungen

Dipl.-Ing. Alexander Nelson, Prof. Dr.-Ing. Anton Matzenmiller, Institut für Mechanik (IfM), Universität Kassel –

Dr.-Ing. David Hein, Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut, Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik (LWF), Universität Paderborn

1 Einleitung und Motivation

Bei den steigenden Anforderungen im Automobilbau hinsichtlich Karosseriesteifigkeiten bei gleichzeitiger Fahrzeuginsassenabsicherung unter Crashbelastungen aber auch im Zuge der Weiterentwicklung des Fahrzeugleichtbaus kommt insbesondere der Füge-technologie Kleben unter Verwendung von Strukturklebstoffen in Kombination mit mechanischen Füge-verfahren, dem sogenannten Hybridfügen, eine Schlüsselfunktion zu.

Im gefügten und ausgehärteten Zustand ist das Tragverhalten der einzelnen Fügeverbindungen dabei i. d. R. sehr unterschiedlich, vgl. Abbildung 1. Die Steifigkeiten und Festigkeiten sind bei Klebverbindungen relativ zu Nietverbindungen hoch, während das spröde Versagensverhalten plötzlich und bei kleinen Wegen auftritt. Das duktile Verhalten der Nietverbindung nach dem Klebschichtversagen hat für die hybrid gefügte Struktur eine Resttragfähigkeit zur Folge und stellt damit einen Sicherheitsaspekt dar.

Aussagen über die Tragverhalten der hybrid gefügten Verbindung auf der Kenntnis der Eigenschaften der elementaren Verbindungen zu machen ist problematisch, da diese sich aufgrund aufeinanderfolgender Prozessschritte gegenseitig in ihrer geometrischen Ausprägung und damit auch in ihren mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Für den effektiven Einsatz dieser Hybridfügeverfahren in crashrelevanten Bereichen fehlen jedoch bislang ein experimentell fundiertes Verständnis für die Wechselwirkungen sowie die Bereitstellung einer geeigneten Berechnungsmethode für eine Vorhersage des Tragverhaltens unter hohen Belastungsgeschwindigkeiten.

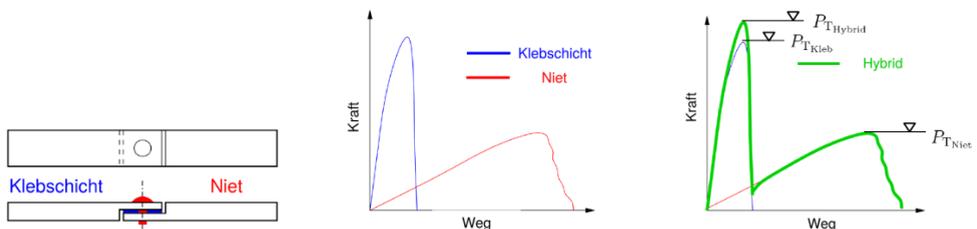


Abbildung 1: Qualitatives Tragverhalten von Niet-, Kleb- und hybrid gefügten Verbindungen

2 Problemstellung

Für die zuverlässige Prognostizierung des Tragverhaltens großer hybrid gefügter Strukturen müssen neue Methoden sowohl für die experimentelle Ermittlung von Verbindungskennwerten als auch für die Berechnung zur rechnergestützten Optimierung und Auslegung in frühen Entwicklungsphasen von Bauteilen bereitgestellt werden, was Ziele des titelgebenden Forschungsvorhabens [1] sind. Die Entwicklung praxistauglicher und effizienter Berechnungsmethoden im Sinne des Computer-Aided-Engineering, insbesondere unter Verwendung der FEM, ist immer eine kombinierte experimentell-analytisch-numerische Aufgabe. Bei der Betrachtung von hybrid gefügten Verbindungen müssen das Verhalten der Niet- und Klebverbindung sowie insbesondere die gegenseitigen Wechselwirkungen zunächst experimen-

tell charakterisiert werden. Hinsichtlich geometrischer Gesichtspunkte kann die Klebschichtdicke durch die punktuellen Nietverbindungen nicht konstant eingestellt werden, weshalb bei Belastungen inhomogene Spannungszustände über der Klebfläche vorliegen und somit kein ideales flächiges Tragverhalten möglich ist. Zudem wird die Klebschicht durch das Nieten reduziert, wodurch eine Reduktion der wirksamen Klebfläche bewirkt wird. Andererseits wird mit dem Niet ein zusätzliches tragfähiges Element hinzugefügt. Dabei wird jedoch die Aufspreizung des Niets beim Fügeprozess durch die hochviskose Klebschicht beeinflusst, was wiederum die Verformung und damit das Tragverhalten des selbigen prägt. Als Schlussfolgerungen dieser Wechselwirkungen kann bezüglich der mechanischen Eigenschaften der hybrid gefügten Verbindung nicht von einer Superposition der Eigenschaften der elementaren Verbindungen ausgegangen werden. So ist die Festigkeit der hybrid gefügten Verbindung keine lineare Überlagerung der Festigkeiten der elementaren Fügeverfahren. Bei der Entwicklung von Berechnungsmethoden müssen diese gegenseitigen Wechselwirkungen des Klebens und des Halbhohlstanznietens berücksichtigt werden. Die Grundlage bilden dabei mathematische Modelle des mechanischen Verhaltens der jeweiligen Verbindungstechnologie, die mit Methoden der numerischen Mathematik umformuliert und zur praktischen Anwendung in FE-Programme implementiert werden müssen. Die wesentlichen Unterschiede des Klebens als stoffschlüssiges Fügeverfahren mit flächigem Tragverhalten und des Halbhohlstanznietens als formschlüssiges Verfahren mit punktueller Kraftübertragung ermöglichen unter Berücksichtigung bestimmter Annahmen eine Überlagerung der FE-Modelle der einzelnen elementaren Fügeverfahren zu einem hybriden Modell, Abbildung 2.

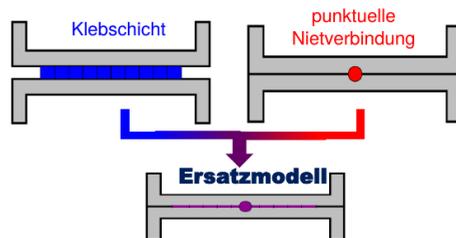


Abbildung 2: Grundidee für Berechnungsmethoden von hybrid gefügten Verbindungen

Modellierungstechnisch sind im Rahmen der numerischen Untersuchungen mit der FEM zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze zu unterscheiden. Bei der Detailmodellierung wird die Fügeverbindung mit vielen finiten Elementen aufgelöst, um den Spannungszustand in der Klebschicht bzw. im Nietelement und in den Fügeteilen abzubilden. Aufgrund der notwendigen feinen Vernetzung und damit verbundenen kleinen Kantenlängen der verwendeten Elemente lassen sich mit derartigen Modellierungsansätzen nach gegenwärtigem Stand der Computerleistungsfähigkeit jedoch keine großen Strukturen berechnen, da die Rechenzeiten maßgeblich von der Diskretisierung abhängen. Hierfür kommen Ersatzmodelle zum Einsatz, die sich durch eine Reduktion der Fügeverbindung auszeichnen, durch die eine phänomenologische Beschreibung des mechanischen Verhaltens bei gleichzeitig hoher Effizienz hinsichtlich Modellierungsaufwand, Kalibrierbarkeit der Modellparameter und numerischer Verarbeitung möglich ist. Für reine Klebverbindungen mit dünnen Klebschichten, wie sie üblicherweise in Fahrzeugkarosserien zum Einsatz kommen, wurden geeignete Berechnungsmethoden in bereits abgeschlossenen Forschungsprojekten erarbeitet. Neben der Formulierung der konstitutiven Gleichungen in [2] wurden diese durch eine Reduktion auf die Kinematik der Grenzflächenelemente im Rahmen des Projekts [3] für die praktische Anwendung effizienter gemacht und in die Berechnungssoftware LS-DYNA implementiert, vgl. [8] (*MAT_252). Bei den formschlüssigen Nietverbindungen ist die Ersatzmodellierung abstrakter, wie aus Abbildung 3 hervorgeht. Dabei wird der genietete Bereich, bestehend

aus Niet und den Fügeteilen, zu einem einzigen Element homogenisiert. Aus Sicht der praktischen Anwendung werden drei Anforderungen an das resultierende Ersatzmodell gestellt:

- Durch die Einbringung der Fügepunkte in das FE-Modell soll keine Neuvernetzung der Fügeteile erforderlich sein
- Die Anwendung soll sowohl in Verbindung mit Schalen- als auch mit Hexaederelementen möglich sein
- Es soll eine Netzunabhängigkeit bzgl. der Diskretisierung der Fügeteile gegeben sein

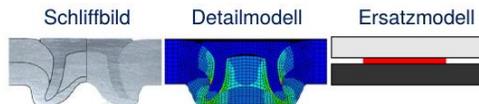


Abbildung 3: Modellvorstellung für Ersatzmodelle mechanisch gefügter Verbindungen

3 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise

Das übergeordnete Ziel besteht in der Bereitstellung einer praxistauglichen und effizienten Methode zur Simulation des Tragverhaltens hybrid gefügter Verbindungen im Rahmen der Prognose des mechanischen Verhaltens großer Strukturen bis hin zum Einsatz in der Crashsimulation von Gesamtfahrzeugen. Die methodische Vorgehensweise ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

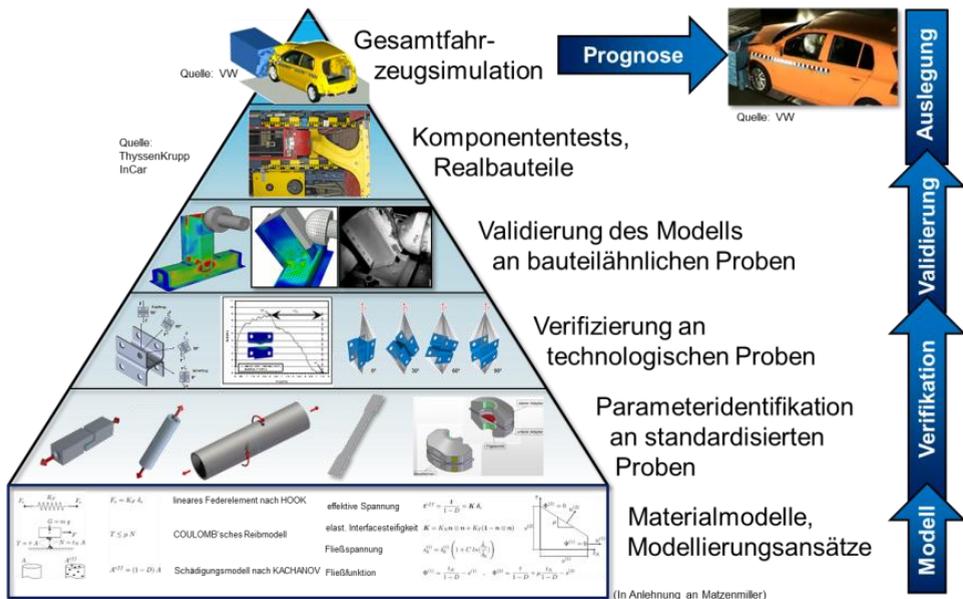


Abbildung 4: Vorgehen bei der Neu- und Weiterentwicklung von Berechnungsmethoden für Fügeverbindungen

Der erste Schritt ist die experimentelle Kennwertermittlung anhand von Grundversuchen und die Formulierung bzw. Auswahl der Modellgleichungen, wobei diese beiden Punkte verbunden und deshalb als gekoppeltes Problem zu verstehen sind. Beim phänomenologischen Modellierungsansatz werden die Gleichungen für experimentell messbare Phänomene for-

muliert. Die zu Grunde liegenden Versuche sollen diese Phänomene dabei umfassend und möglichst isoliert beschreiben. Konkrete Aussagen lassen sich nur für bestimmte zu modellierende Probleme machen.

Als Werkstoff für alle aus Blech gefertigten Proben wird die mikrolegierte Stahllegierung HC340LA verwendet. Es ist bekannt, dass diese sich elasto-plastisch, weitestgehend isotrop und ratenabhängig verhält. Für die materialtheoretische Beschreibung wird dementsprechend ein elasto-viskoplastisches Materialmodell angenommen. Die experimentelle Kennwertermittlung erfolgte für den Werkstoff an Flachsulterproben im Zugversuch bei unterschiedlichen Dehnraten.

Zur Modellierung der Klebschichtverbindung wird das auf das Grenzflächenelement reduzierte TAPO-Modell aus [3] bzw. [5] verwendet, da übereinstimmend mit den Modellannahmen ausschließlich dünne Klebschichten zum Einsatz kommen. Damit lässt sich ein elasto-viskoplastisches Verhalten mit Schädigung beschreiben. Der ausgewählte Klebstoff ist der zähmodifizierte Epoxidharzklebstoff BETAMATE 1496V des Herstellers DOW. Um eine eindeutige Kennwertermittlung der Klebschicht unter verschiedenen Beanspruchungen zu ermöglichen, muss der Spannungszustand in der Fläche der Klebschicht homogen sein, weshalb massive und relativ zur Klebschicht steife Fügeiteile verwendet werden müssen. Zu diesem Zweck wurde die Doppelrohr-Probe nach DIN EN 14869-1 entwickelt, mit der eine Kennwertermittlung des quasistatisch-zügigen Verhaltens für die Klebschichtverbindung unter Torsion, Zug und zwei Kombinationen daraus mit unterschiedlichen Verhältnissen möglich ist. Die experimentelle Charakterisierung des ratenabhängigen Verhaltens unter reiner Schub- und reiner Zugbeanspruchung wird mit der dicken Zugscher-Probe nach DIN EN 14869-2 und der Kopfbzug-Probe nach DIN EN 26922 für variable Dehnraten realisiert.

Für die genietete Verbindung erfolgt die Kennwertermittlung anhand der LWF-KS-2- und Schälzugprobe nach [6] unter verschiedenen Lasteinleitungswinkeln und Prüfgeschwindigkeiten. Anders als bei der Klebschichtcharakterisierung wird damit eine Probe verwendet, deren Fügeiteile denen des realen Anwendungsfalls entsprechen, da die Verbindungseigenschaften der formschlüssigen Fügeverfahren immer von den Eigenschaften der verwendeten Fügeiteile abhängig sind und entsprechend bei der Charakterisierung zu berücksichtigen sind. Somit muss für jede Fügeiteilekombination eine neue Charakterisierung der Verbindung erfolgen.

In der Simulation wird die Nietverbindung durch ein einzelnes Grenzflächenelement als Nietersatz abgebildet. Das mechanische Verhalten der Verbindung wird mit den konstitutiven Gleichungen des Elements beschrieben. Hierfür werden die in [4] vorgestellten und in [5](Seite 89ff) sowie [7] modifizierten Gleichungen zu Grunde gelegt. Mit ihnen lässt sich unter allen Beanspruchungen ein trilineares Materialverhalten definieren, das als elasto-plastisch-schädigend interpretiert wird. Die Ortskurve des plastischen Fließens wird durch zwei lineare Fließfunktionen im Schubspannungs-Normalspannungsraum vorgegeben, deren Verlauf durch Modellparameter an Versuchsdaten angepasst wird. Das plastische Fließen wird durch Fließregeln bestimmt, wobei zur besseren Adaptivität an Versuchsdaten eine der beiden Fließfunktionen hierfür durch ein plastisches Potential ersetzt wird. Die die Plastizität treibende innere Variable ist dabei die Norm aus der Summe der akkumulierten plastischen Verschiebungssprünge in Normal- und in Schubrichtung. Das Versagen bzw. die Schädigungsinitiierung sind als die kritischen Verschiebungssprünge in Normal- und in Schubrichtung definiert, die als Modellparameter vorzugeben sind. Ebenfalls durch Modellparameter in beide Richtungen werden die Verschiebungssprünge bei denen der Bruch eintritt vorgegeben. Zwischen Initiierung und Bruch ist die Modellantwort linear.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens mussten zwei wesentliche Modifikationen vorgenommen werden, um das phänomenologische Verhalten einer Nietverbindung zu erfassen. Zum einen äußert sich die Ratenabhängigkeit einer Nietverbindung nicht wie bei Struktur-

klebstoffen in einer Erhöhung der Fließgrenze und des Verfestigungsmoduls, vielmehr tritt eine Zunahme der Steifigkeiten im elastisch interpretierten Bereich ein. Zum zweiten ist bei einer Nietverbindung das Tragverhalten unter Schälzugbeanspruchung gegenüber demjenigen bei einer symmetrischen Beanspruchung wesentlich geringer. Dies ist auf den Geometrieinfluss aufgrund der Formschlüssigkeit der Verbindung zurückzuführen. Für die Modellbildung müssen die das mechanische Verhalten beschreibenden Konstitutivgleichungen in Abhängigkeit einer kinematischen Größe formuliert werden, die den Geometrieinfluss qualitativ und auch quantitativ erfasst. Hierfür eignet sich der eingeschlossene Winkel zwischen den Flächennormalen von Ober- und Unterseite des Nietersatzelements, siehe Abbildung 5 links. Ein wichtiges Merkmal aus Sicht der Parameteridentifikation ist, dass physikalisch bedingte Grenzen für den Wertebereich angegeben werden können, die 0° und 90° betragen. Diese Größe wird als Argument für eine lineare Geometrieinflussfunktion verwendet, siehe Abbildung 5 rechts, die als Reduktionsfaktor die Modellparameter für den kritischen Weg und den Bruchweg im Falle einer Schälzugbelastung reduziert und damit das physikalisch beobachtbare frühere Versagen beschreibt.

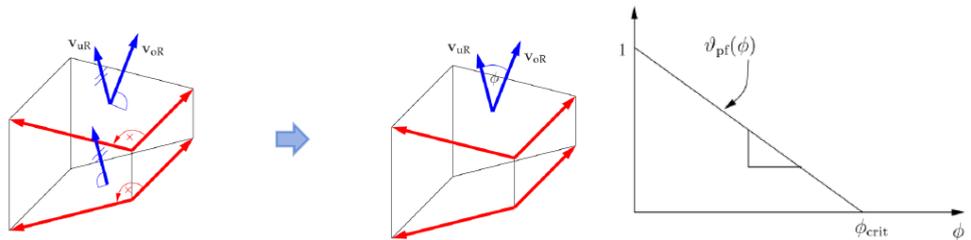


Abbildung 5: Veranschaulichung der den Geometrieinfluss charakterisierenden kinematischen Größe

Im zweiten Schritt erfolgen die Parameteridentifikation und die Verifikation der Materialmodelle des Stahls, der Kleb- und der Nietverbindung anhand der experimentellen Daten der Grundversuche. Durch Simulation der Versuche unter Vorgabe der entsprechenden Materialmodelle werden die in den Konstitutivgleichungen als Parameter auftauchenden Variablen derart angepasst, dass eine optimale Übereinstimmung mit den Versuchskurven erzielt wird. Aufgrund der Komplexität der Gleichungen und der Wechselwirkungen der Parameter miteinander erfolgt die Anpassung iterativ mit dem Optimierungsprogramm LS-OPT. Dafür werden Startwerte, Wertebereiche und die Versuchskurven als Zielfunktionen vorgegeben. Durch die Variation der Parameter und Bildung des Fehlermaßes basierend auf dem kleinsten Fehlerquadrat wird ein optimaler Parametersatz ermittelt, mit dem durch Verifikationsrechnungen eine Aussage über die Güte der Optimierung bezüglich der vorliegenden Versuchsdaten gemacht werden kann. Ferner wird gezeigt, ob die entwickelten Modellgleichungen die mittels Grundversuchen experimentell visualisierten Phänomene berücksichtigen können.

Im nächsten Schritt werden die Berechnungsmethoden für die Kleb- und Nietverbindung zu einer hybrid gefügten Verbindung kombiniert. Grundlage dafür bilden weniger theoretische Überlegungen, sondern vielmehr die experimentellen Beobachtungen hybrid gefügter Verbindungen in Form von Schlißbildern. Direkt im genieteten Bereich lässt sich daran optisch keine Klebschicht feststellen. Mit radialem Abstand vom Nietpunkt nimmt die Klebschichtdicke zu. Diese Inhomogenität wird im Modell durch die gemittelte aber konstante Klebschichtdicke berücksichtigt, die gemäß einer Mittelung aus Messwerten an Schlißbildern gegenüber der rein geklebten LWF-KS-2-Probe etwa der Hälfte entspricht. Der Einfluss der Klebschicht auf die Nietverbindung führt zu einer Veränderung der Nietgeometrie im gefügten Zustand. Da die gesamte Nietverbindung jedoch durch ein einzelnes Nietersatzelement modelliert wird, kann die Nietkontur im Modell nicht direkt berücksichtigt werden. Dieser

Einfluss wird stattdessen phänomenologisch erfasst, indem die Versuchsergebnisse der elementar und hybrid gefügten Verbindungen miteinander verglichen werden und die Unterschiede im Tragverhalten zwischen dem Nietanteil der hybrid gefügten Verbindung und der reinen Nietverbindung mittels einer einfachen Korrektur der entsprechenden Modellparameter der Konstitutivgleichungen des Nietmodells angepasst werden. Um die Übertragbarkeit der Berechnungsmethoden zur Anwendung im Sinne der Definition des Projektziels nachzuweisen, wird mit den abschließenden Validierungsrechnungen an einer bauteilähnlichen Probe unter Variation der Lasteinleitung und Prüfgeschwindigkeit die Prognosefähigkeit gezeigt. Die Simulationsergebnisse werden hierzu mit den Versuchsergebnissen verglichen.

4 Ergebnisse

Die Verifikations- und Validierungsrechnungen an technologischen Proben für das Klebschichtmodell werden hier nicht dargestellt. Der Schwerpunkt liegt auf der Verifikation und Validierung des Nietersatzelements sowie der Berechnungsmethode der hybrid gefügten Verbindung.

4.1 Verifikation der Berechnungsmethoden für Niet- und hybrid gefügter Verbindungen an der technologischen LWF-KS-2-Probe

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Verifikationsrechnungen an der genieteten LWF-KS-2-Probe unter verschiedenen Lasteinleitungswinkeln und Schälzugbelastung den entsprechenden experimentellen Daten in Form von Kraft-Weg-Verläufen gegenübergestellt. Mit den Konstitutivgleichungen des Ersatzmodells wird für alle Belastungen eine trilineare Modellantwort definiert, weshalb die Abweichungen der Trilinearität auf die Fügeiteilverformungen zurückgeführt werden. Dies wird bei der Kopfzugbelastung (90° in Abbildung 6) und der Schälzugbelastung bis zu einer Verschiebung von jeweils 1,5 mm deutlich. Hinsichtlich Traglasten, Steifigkeiten und Bruchwegen sind, mit Ausnahme der Bruchwege bei der 30° -Belastung, die Abweichungen zwischen Berechnungen und den Streubändern der Experimente unter 3 % relativ zum jeweils nächstliegenden experimentellen Verlauf.

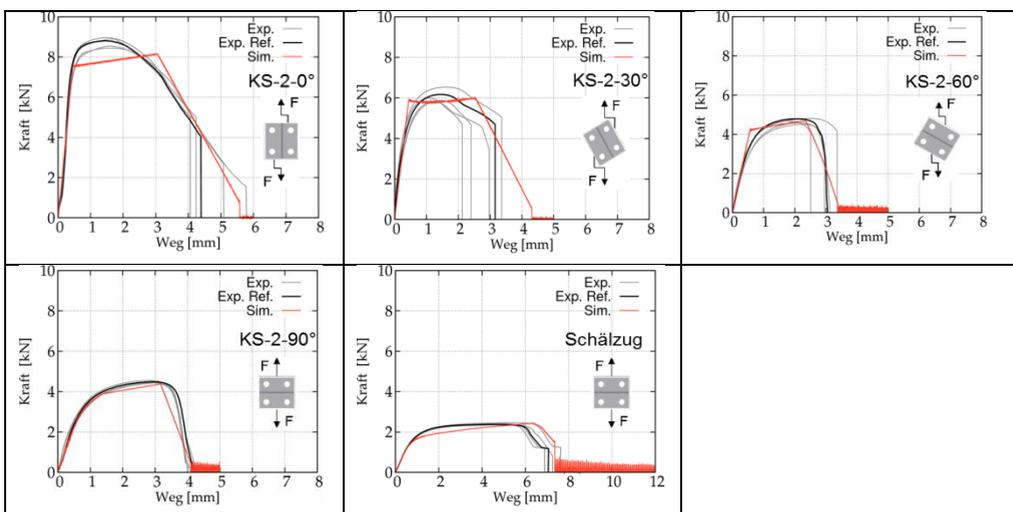


Abbildung 6: Verifikationsrechnungen an der genieteten LWF-KS-2- und Schälzug-Probe

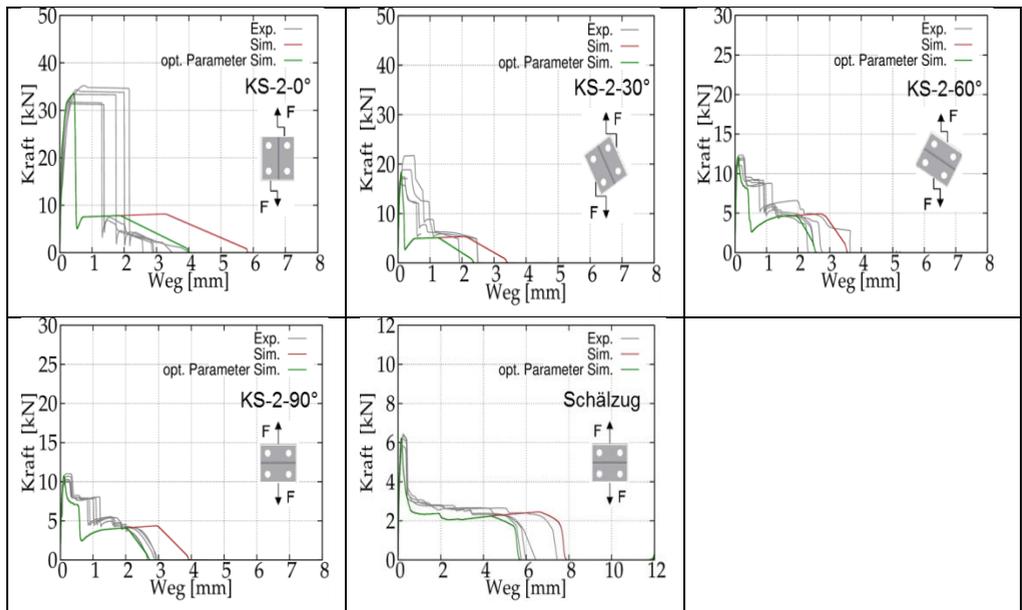


Abbildung 7: Validierungsrechnungen an der hybrid gefügten LWF-KS-2- und Schälzug-Probe

Aus dem Vergleich der Versuchsergebnisse von genieteter und hybrid gefügter LWF-KS-2-Probe (graue Kurven in den Abbildungen 6 und 7) folgt, dass die durch den Nietanteil bestimmten Bruchwege bei der hybrid gefügten Verbindung gegenüber denen der reinen Nietverbindung geringer sind. Dies wird mit dem Einfluss der Klebschicht beim Nietprozess auf die Verformung des Niets und damit auf dessen mechanisches Tragverhalten begründet. Die Schwächung unter 0°- und 90°-Belastung beträgt jeweils etwa 25 %. Aufgrund der separaten Kalibrierbarkeit der Konstitutivgleichungen des Nietersatzmodells für die Schub- und Zugbeanspruchung kann durch die einmalige Reduktion der kritischen Verschiebungen und der Bruchverschiebungen für beide Richtungen ein neuer Parametersatz ermittelt werden, mit dem hinsichtlich Steifigkeiten, Traglasten und Bruchwegen eine gute Übereinstimmung mit den Versuchen erzielt wird. Während der Einfluss der Nietverbindungen auf die Klebschicht rein geometrisch ist und über eine Halbierung der Klebschichtdicke gegenüber der reinen Klebverbindung über die FE-Modellierung berücksichtigt werden kann, wird der Einfluss der Klebschicht auf die Nietverbindung über eine inverse Korrektur der Parameter des Konstitutivmodells realisiert. Ob der Einfluss der Klebschicht auf das Tragverhalten der hybrid gefügten Verbindung auch für andere Kombinationen von Füge-teildicken und -werkstoffen, Fügeverfahren und Klebstoffen in gleichen Maßen vorhanden ist, ist mit vorliegenden Untersuchungen nicht feststellbar.

4.2 Validierung aller Berechnungsmethoden an der bauteilähnlichen T-Stoß-Probe

Mit den verifizierten Berechnungsmethoden an der LWF-KS-2-Probe für Kleb-, Niet- und hybrid gefügter Verbindung wird abschließend deren Prognosefähigkeit mittels Simulationen der bauteilähnlichen T-Stoß-Probe bei Crashbedingungen unter Längs- und Querbelastung nachgewiesen. Die Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Abbildung 8 tabellarisch dargestellt.

Ein qualitatives Bewertungskriterium hinsichtlich der Prognosefähigkeit der Berechnungsmethoden für die genieteten und die hybrid gefügten Proben ist die Versagensreihenfolge der einzelnen Nietverbindungen, die für die Simulationsergebnisse in den Kraft-Weg-Verläufen mit eingezeichnet sind. Die Nummerierung erfolgt an der linken Verbindung beginnend entgegen dem Uhrzeigersinn. Der direkte Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen zeigt, dass sowohl die Versagensreihenfolge der einzelnen Nietverbindungen als auch die Probensteifigkeiten, die Traglasten und die Bruchwege durch die Simulation für alle Verbindungstypen gut berechnet werden.

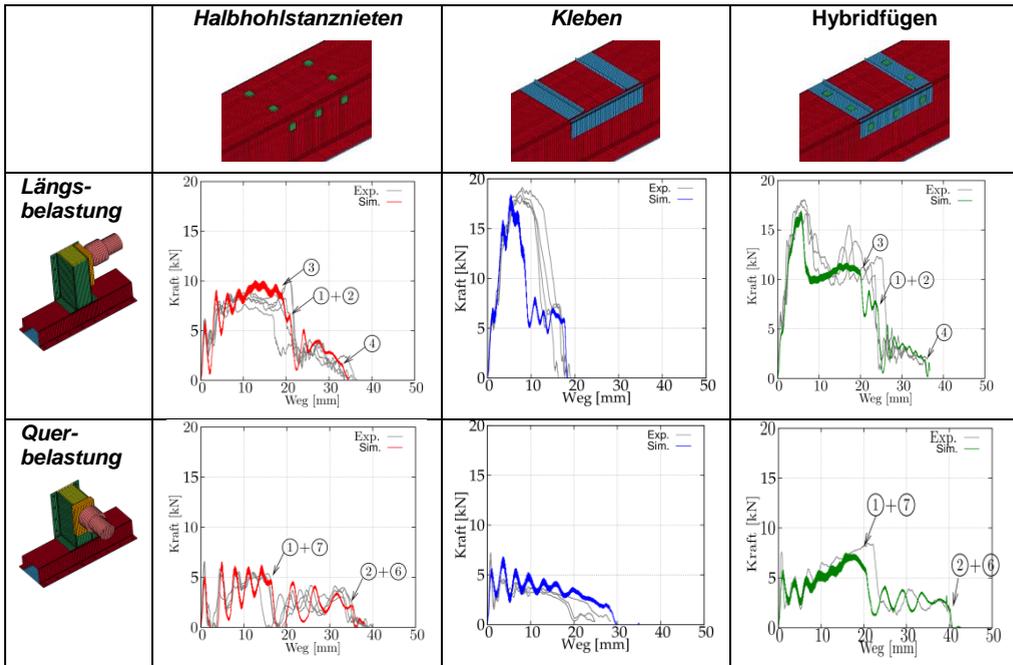


Abbildung 8: Validierungsrechnungen an der T-Stoß-Probe

5 Zusammenfassung und Fazit

In Abbildung 9 sind für die T-Stoß-Probe unter Quer- und Längsbelastung die Simulationsergebnisse (mittlere Spalte) und die experimentellen Ergebnisse (rechte Spalte) jeweils untereinander für alle Fügeverbindungen verglichen. Aus den Ergebnissen für die Längsbelastung folgt, dass durch das Hybridfügen für diesen Lastfall eine optimale Ausnutzung der Stärken von Niet- und Klebverbindung erzielbar ist. Die Steifigkeiten und Traglasten entsprechen denen der reinen Klebverbindung, die gegenüber der Nietverbindung wesentlich höher sind. Die Bruchwege sind hingegen bei der reinen Nietverbindung gegenüber der Klebverbindung höher. Dieses Verhalten weist die hybrid gefügte Verbindung nach dem Versagen der Klebschicht auf. Die Superposition von mechanischen Eigenschaften der elementar gefügten Verbindungen kann bei der hybrid gefügten Verbindung (in relevanten Bereichen) nicht festgestellt werden. Lediglich eine leichte Erhöhung gegenüber dem Tragverhalten der Nietverbindung ist im Bereich zwischen 10 und 20 mm erkennbar, die - wenn energetische Aspekte ausgenommen werden - keine Verbesserung des Gesamttragverhaltens der hybrid gefügten Verbindung liefert.

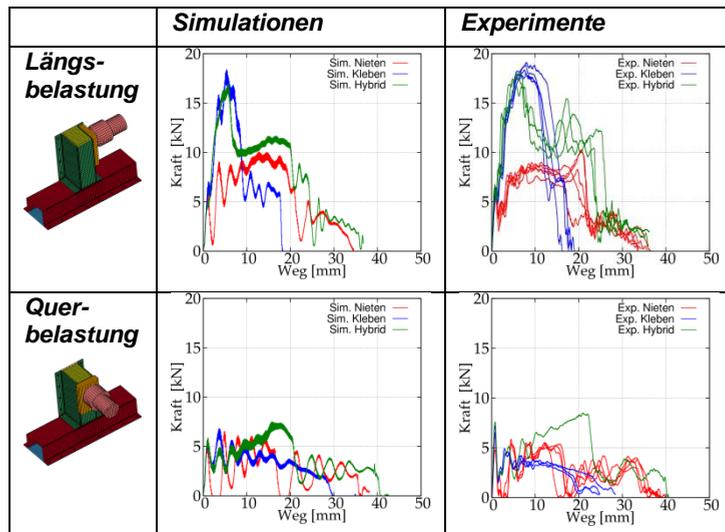


Abbildung 9: Gegenüberstellung der Validierungsrechnungen und der experimentellen Ergebnisse an der genieteten, geklebten und hybrid gefügten T-Stoß-Probe

Hinsichtlich der Steifigkeiten und der Bruchwege sind unter Querbelastung die Aussagen gleich. Die Traglasten sind hierbei jedoch wesentlich höher als die der einzelnen Verbindungen, was insbesondere im Bereich zwischen 15 und 20 mm ersichtlich ist. Nach dem Versagen ist das Tragverhalten auch hier durch die Nietverbindung charakterisiert.

Mit einer hybrid gefügten Verbindung kann in den untersuchten Fällen an bauteilähnlichen Proben demnach mindestens eine optimale Ausnutzung der Stärken beider Fügetechnologien erzielt werden. Belastungsabhängig können durch den Einsatz von hybrid gefügten Verbindungen mechanische Eigenschaften auch superponiert werden.

Schrifttum

- [1] G. Meschut, O. Hahn, D. Hein, A. Matzenmiller und A. Nelson: *Experimentelle und numerische Untersuchungen des Crashverhaltens hybrid gefügter Verbindungen*. Abschlussbericht des FOSTA-Forschungsvorhabens P 958 der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf, in Druck.
- [2] S. Gerlach und A. Matzenmiller: *Kontinuumsmechanischer Modellansatz II*. In: M. Brede (Hrsg.): *Forschung für die Praxis P 676 - Methodenentwicklung zur Berechnung von höherfesten Stahlklebverbindungen des Fahrzeugbaus unter Crashbelastung*. Abschlussbericht des FOSTA-Forschungsvorhabens P 676 der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2008.
- [3] M. Brede und O. Hesebeck (Hrsg.): *Robustheit und Zuverlässigkeit der Berechnungsmethoden von Klebverbindungen mit hochfesten Stahlblechen unter Crashbedingungen*. Abschlussbericht des FOSTA-Forschungsvorhabens P 828 der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf, in Druck.
- [4] C. Su, Y. W. Wei, L. Anand. *An elastic-plastic interface constitutive model: application to adhesive joints*. International Journal of Plasticity 20:2063-2081, 2004.

- [5] F. Burbulla: *Kontinuumsmechanische und bruchmechanische Modelle für Werkstoffverbunde*. Dissertation, Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau, Institut für Mechanik, Fachgebiet Numerische Mechanik, 2015.
- [6] O. Hahn, J. R. Kurzok und M. Oeter: *Prüfvorschrift für die LWF KS-2-Probe*. Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik, Universität Paderborn, 1999.
- [7] A. Matzenmiller, S. Gerlach und M. Fiolka: *A critical analysis of interface constitutive models for the simulation of delamination in composites and failure of adhesive bonds*. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 5:185-211, 2010.
- [8] Livermore Software Technology Corporation (LSTC): *LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL – VOLUME II – Material Models – 08/10/15*. Benutzerhandbuch, Livermore, Kalifornien, 2015.

Förderhinweis

Das IGF-Projekt 444ZN (FOSTA-Nr: P 958) der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die beteiligten Forschungsstellen danken den genannten Institutionen und den Mitgliedsunternehmen des projektbegleitenden Ausschusses für die Förderung und Unterstützung des Forschungsprojekts.