

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 Fügetechnik (LWF), Universität Paderborn

1 Einleitung und Motivation

Die Kombination aus den beiden Fügetechnologien Kleben und mechanisches Fügen, das sogenannten Hybridfügen, bekommt im Zuge der Weiterentwicklung des Fahrzeugleichtbaus eine Schlüsselfunktion. Dabei werden die steigenden Anforderungen im Automobilbau hinsichtlich Karosseriesteifigkeit bei gleichzeitiger Insassensicherheit unter Crashbelastungen insbesondere unter Verwendung von Strukturklebstoff in Verbindung mit Halbhohlstanznieten gut erfüllt. Im gefügten und ausgehärteten Zustand ist das Tragverhalten der einzelnen Fügeverbindungen jedoch i. d. R. sehr unterschiedlich, vgl. Abbildung 1. Aussagen über das Tragverhalten der hybrid gefügten Verbindung auf Basis 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 im crashrelevanten Bereich fehlen bislang ein experimentell fundiertes Verständnis der Wechselwirkungen sowie eine geeignete Berechnungsmethode für die rechnergestützte Optimierung und Auslegung von Bauteilen in frühen Entwicklungsphasen.

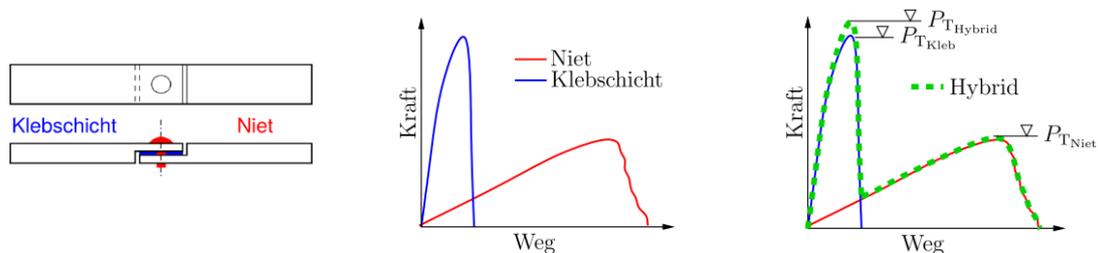


Abbildung 1: Qualitatives Tragverhalten von Niet-, Kleb- und hybrid gefügten Verbindungen

2 Problemstellung und methodische Vorgehensweise bei der Lösung

Für die zuverlässige Prognose des Tragverhaltens großer, hybrid gefügter Strukturen müssen neue Methoden sowohl für die experimentelle Ermittlung von Verbindungskennwerten als auch für die Berechnung von Bauteilen und Komponenten unter hohen Belastungsgeschwindigkeiten bereitgestellt werden, was das Ziel des Forschungsvorhabens [1] ist.

Aus Sicht der Simulation müssen insbesondere die gegenseitigen Wechselwirkungen des Klebens und des Halbhohlstanznietens bei der Berechnungsmethode für hybrid gefügte Verbindungen berücksichtigt werden. Grundlage dafür bilden die experimentellen Beobachtungen an Schlifffbildern. Direkt im genieteten Bereich lässt sich daran optisch keine Klebschicht erkennen. Mit zunehmendem 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 Schliffbildern gegenüber der rein geklebten Probe etwa der Hälfte entspricht. Dieser Sachverhalt in Kombination mit den wesentlichen Unterschieden des Klebens als stoffschlüssiges Fügeverfahren mit flächigem Tragverhalten und des Halbhohlstanznietens als formschlüssiges Verfahren mit punktueller Kraftübertragung ermöglicht unter Berücksichtigung bestimmter Annahmen die Kombination der elementaren Fügeverbindungen zu einem hybriden Modell, Abbildung 2 (links).

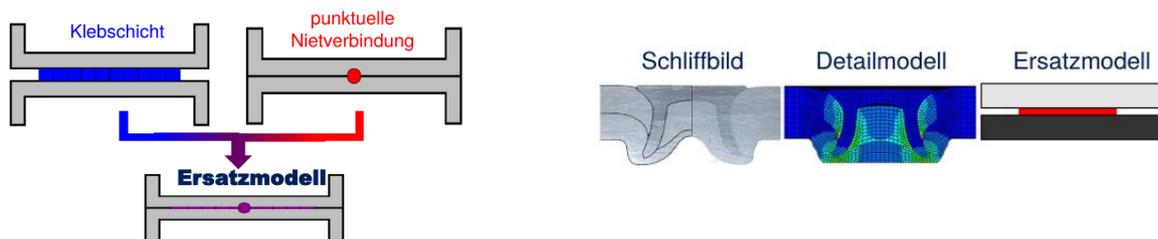


Abbildung 2: Links: Grundidee für Berechnungsmethoden von hybrid gefügten Verbindungen; Rechts: Modellvorstellung für Ersatzmodelle mechanisch gefügter Verbindungen

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 Niet und in den Fügeteilen abzubilden. Aufgrund der notwendigen feinen Vernetzung lassen sich mit Detailmodellen derzeit keine großen Strukturen berechnen, da die Rechenzeit bei expliziter Zeitintegration maßgeblich von der Diskretisierung abhängt. Stattdessen kommen Ersatzmodelle zum Einsatz, die sich durch eine Reduktion der Fügeverbindung auszeichnen, durch die eine phänomenologische Beschreibung des mechanischen Verhaltens der Verbindung bei gleichzeitig hoher Effizienz hinsichtlich Modellierungsaufwand, Parameteridentifikation und numerischer Verarbeitung möglich ist.

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. Der erste Schritt ist die experimentelle Kennwertermittlung anhand von Grundversuchen und die Formulierung bzw. Auswahl der Modellgleichungen, wobei diese beiden Punkte gekoppelt sind. Als Werkstoff für alle aus Blech gefertigten Proben wird die mikrolegierte Stahlegierung HC340LA verwendet. Für die Materialbeschreibung wird ein elasto-viskoplastisches Modell angenommen. Die experimentelle Charakterisierung erfolgt an Flachsulterzugproben bei unterschiedlichen Dehnraten. Für die Klebverbindungen wird der zähmodifizierte Epoxidharzklebstoff BETAMATE 1496V des Herstellers DOW verwendet, der in Fahrzeugkarosserien als dünne Klebschicht zum Einsatz kommt. Um eine eindeutige Kennwertermittlung der Klebschicht unter verschiedenen Beanspruchungen zu ermöglichen, muss der Spannungszustand in der Fläche der Klebschicht homogen sein. Zu diesem Zweck wurde die Doppelrohr-Probe nach DIN EN 14869-1 entwickelt, mit der die Kennwertermittlung der Klebschichtverbindung unter Torsion, Zug und Kombinationen daraus mit unterschiedlichen Verhältnissen möglich ist. Die experimentelle Charakterisierung des ratenabhängigen Verhaltens wird mit der dicken Zugscher-Probe nach DIN EN 14869-2 und der Kopfzug-Probe nach DIN EN 26922 für variable Dehnraten realisiert. Für den Klebstoff sind geeignete konstitutive Gleichungen in [2]

bzw. [5] entwickelt und durch die Reduktion auf die Kinematik der Grenzflächenelemente im Rahmen des Projekts [3] für die praktische Anwendung effizienter formuliert sowie in die Berechnungssoftware LS-DYNA implementiert worden, vgl. [8] (*MAT_252). Damit lässt sich ein elasto-viskoplastisches Verhalten mit Schädigung beschreiben. Bei den Nietverbindungen kommt ebenfalls die Kinematik des Grenzflächenelements zum Einsatz, wobei der genietete Bereich, bestehend aus Niet und den Füge­teilen mit einem einzigen Element (vgl. Abbildung 2 (rechts)) und den neuentwickelten konstitutiven Gleichungen beschrieben wird. 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. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sind zwei wesentliche Modifikationen vorgenommen worden, um das phänomenologische Verhalten einer Nietverbindung zu erfassen. Zum einen äußert sich die Ratenabhängigkeit einer Nietverbindung nicht wie bei Strukturklebstoffen in einer Erhöhung der Fließgrenze und des Verfestigungsmoduls. Vielmehr tritt eine Zunahme der Steifigkeit im elastisch interpretierten Bereich ein. Zum andern ist bei einer Nietverbindung das Tragverhalten unter Schälzugbeanspruchung gegenüber demjenigen bei einer symmetrischen Beanspruchung wesentlich geringer. Die experimentelle Kennwertermittlung erfolgt anhand der LWF-KS-2- und Schälzugprobe nach [6] unter verschiedenen Lasteinleitungswinkeln und Prüfgeschwindigkeiten.

3 Verifikation und Validierung der Berechnungsmethoden

Die Parameteridentifikation und die Verifikation der Materialmodelle für den Stahl, die Kleb- und die Nietverbindung erfolgt anhand der experimentellen Daten der Grundversuche mit dem Optimierungsprogramm LS-OPT.

In Abbildung 3 sind die Kraft-Weg-Verläufe aus der Verifikationsrechnung an der genieteten LWF-KS-2-Probe den entsprechenden experimentellen Daten gegenübergestellt. Hinsichtlich Traglast, Steifigkeit und Bruchweg sind die Abweichungen zwischen Berechnung und den Streubändern des Experiments unter 3 % bezogen den nächstliegenden experimentellen Verlauf.

In Abbildungen 4 sind die Spannungs-Verschiebungssprung-Verläufe der Verifikationsrechnungen an der geklebten Doppelrohr-Probe mit den experimentellen Ergebnissen aufgetragen. Es können für alle Beanspruchungen im relevanten Bereich gute Ergebnisse für Steifigkeit, Streckgrenze und Festigkeit erzielt werden.

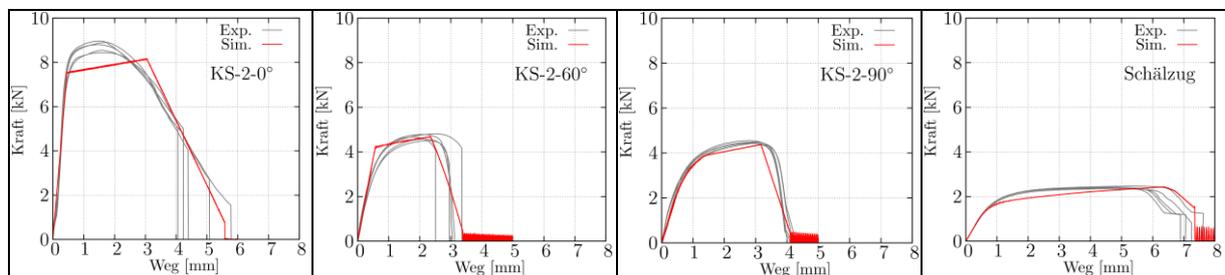


Abbildung 3: Verifikationsrechnungen an der genieteten LWF-KS-2- und Schälzug-Probe

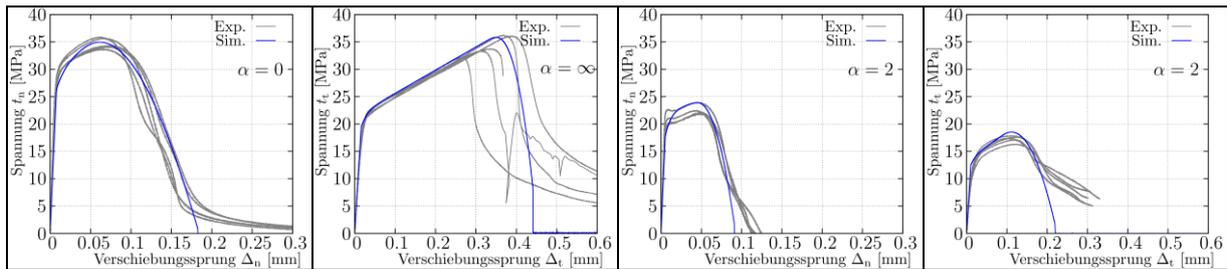


Abbildung 4: Verifikationsrechnungen an der geklebten Doppelrohr-Probe

Mit den verifizierten Modellgleichungen und -Parametern für die Kleb- und die Nietverbindung wird das Versagen der T-Stoß-Probe bei Crashbedingungen unter Längs- und Querbelastung prognostiziert. Die hybrid gefügte Verbindung wird als Kombination der elementaren Fügeverbindungen modelliert. In Abbildung 5 sind die berechneten Kraft-Weg-Verläufe mit den Versuchsergebnissen gegenübergestellt. Sowohl die Versagensreihenfolge der einzelnen Nietverbindungen als auch Probensteifigkeit, Traglast und Bruchweg werden für alle Fügeverbindungen korrekt berechnet.

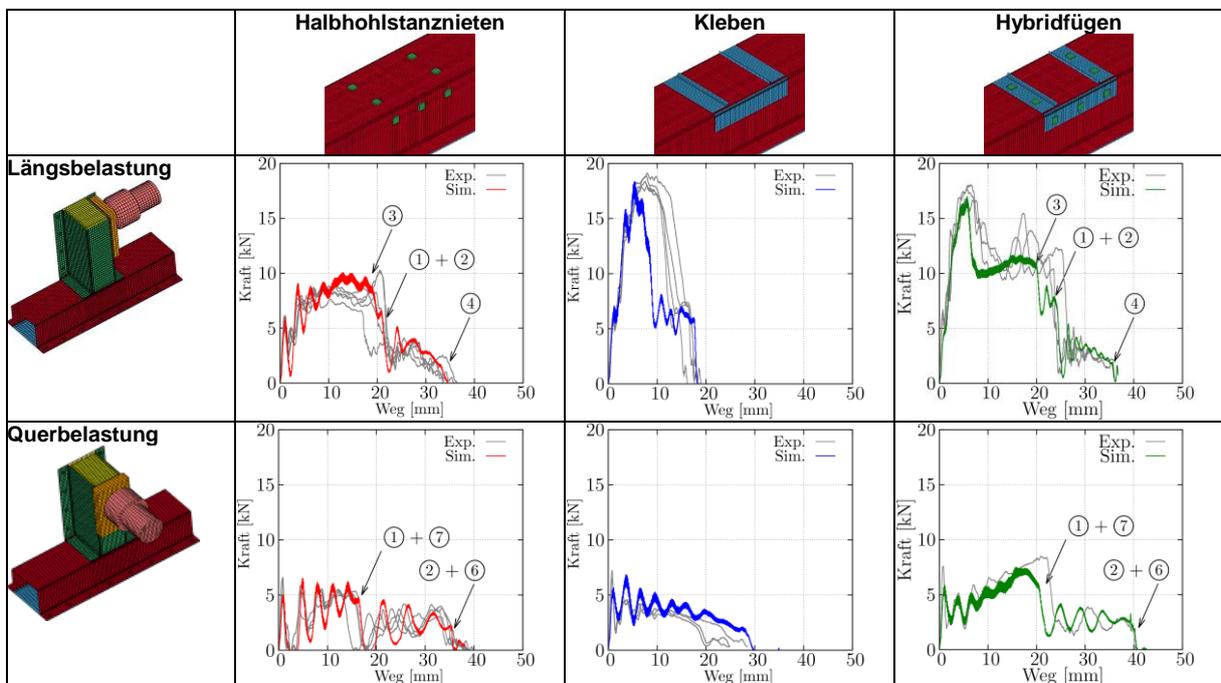


Abbildung 5: Validierungsrechnungen an der T-Stoß-Probe

4 Fazit

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 unter Längsbelastung (in relevanten Bereichen) nicht festgestellt werden. Hinsichtlich der Steifigkeiten und der Bruchwege sind für die Querbelastung die

Aussagen gleich, wohingegen die Traglast im Bereich zwischen 15 und 20 mm höher als die der einzelnen Verbindungen ist.

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, wie Traglast und Bruchweg, 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, Fachbereich Maschinenbau, Institut für Mechanik, Fachgebiet Numerische Mechanik, Universität Kassel, 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 der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (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.