

Identifikation von Werkstoffmodellparametern zur Berechnung von Klebverbindungen unter Crashbelastung

D. Memhard, F. Andrieux, D.-Z. Sun

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg, Deutschland

M. Feucht, T. Frank

DaimlerChrysler AG, Sindelfingen, Deutschland

A. Ruf

DaimlerChrysler AG, Ulm, Deutschland

Abstract:

Adhesive joints of the car body have to conserve their integrity under crash loading and thus allow the whole structure to consume a large amount of dissipation energy. To meet the respective requirements the glue must exhibit high strength as well as high fracture strain. The specific properties of adhesives require complex material models that must take into account plastic dilatancy under tension load and almost plastic incompressible behaviour under pressure, strain rate sensitivity of strength and fracture strain; furthermore plastic flow is nonassociative. Therefore, material models for adhesives require a set of parameters that have to be determined by experiments. Specimens of pure adhesives allow the material characterization under well defined boundary conditions but it is not fully clear whether they represent the properties of the glue in adhesive joints. Therefore tests have also been performed for bonded specimens and a comparison between the flow and failure behaviour of both types of specimens has been made and conclusions for the parameter identification were drawn.

Keywords:

Klebverbindungen, Crashesimulation, plastisch dilatantes Materialverhalten, Substanzproben, Verbundproben, Spannungsmehrachsigkeit, Dehnratenabhängigkeit, Versagenskriterien
Adhesive bondings, crash simulation, plastic compressibility, pure adhesive specimens, bonded specimens, stress triaxiality, strain rate sensitivity, failure criteria

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Crashgeeignete Strukturklebverbindungen im Automobilbau müssen unter den Anforderungen der Crashbeanspruchung eine Trennung der Füge­teile verhindern, damit die Struktur durch ihre plastische Verformung möglichst viel Energie aufnehmen kann. Dazu sind eine hohe Klebfestigkeit und eine hohe Bruchdehnung der Klebstoffe gefordert.

Die speziellen Klebstoffeigenschaften erfordern komplexe Werkstoffmodelle, die berücksichtigen müssen, dass sich der Klebstoff vor allem unter Zugbeanspruchung plastisch kompressibel verhält und dass das Verformungs- und Versagensverhalten dehn­ratenabhängig ist; weiterhin ist das Fließen nicht assoziiert.

Werkstoffmodelle, die das komplexe Materialverhalten von Klebstoffen mit ausreichender Genauigkeit beschreiben können, erfordern in der Regel eine größere Zahl von Parametern, die durch Experimente an Substanz- und Verbundproben ermittelt werden. Substanzproben erlauben die Materialcharakterisierung mit einfachen Probengeometrien für definierte Spannungs- bzw. Verzerrungszustände. Es ist jedoch noch nicht eindeutig nachgewiesen, ob das Materialverhalten von Substanzproben identisch mit dem des Klebstoffs in dünnen Schichten ist. Deshalb wurde eine Serie von Experimenten an Substanz- und Verbundproben bei unterschiedlichen Dehn- bzw. Scherraten durchgeführt, analytisch und numerisch ausgewertet und die Modellparameter bestimmt. Die Ergebnisse wurden für beide Probentypen miteinander verglichen und Schlussfolgerungen für die Anwendung in der Crashsimulation gezogen.

2 Numerische Modellierung des Materialverhaltens

Das von IWM entwickelte Materialmodell für Klebverbindungen ist eine Erweiterung des von Deshpande und Fleck vorgeschlagen Modells [1,2] für plastisch kompressibles Fließverhalten kombiniert mit dem Versagenskriterium des Johnson Cook-Modells [3]. Es beschreibt den Einfluss von Spannungsmehrrachsigkeit und Dehnrate auf das Fließ- und Versagensverhalten. Die Fließfunktion stellt eine asymmetrische Ellipse in der aus hydrostatischer Spannung (σ_m) und Vergleichsspannung (σ_e) aufgespannten Spannungsebene dar. Das Modell enthält eine nicht-assozierte Fließregel, die dem plastischen Deformationsverhalten des Klebstoffs Rechnung trägt. Das Fließpotential wird durch eine symmetrische Ellipse im Spannungsraum abgebildet. Das Verfestigungsverhalten des Materials kann aus einachsigen Zugversuchen ermittelt werden. Mit zunehmender Verformung vergrößert sich die Fließfläche ohne dass sich ihre Form und Lage in der Spannungsebene ändert. Die Dehn­ratenabhängigkeit der Fließspannung kann durch eine analytische Funktion ausgedrückt werden, wobei die Fließfunktion ebenfalls forminvariant bleibt.

Das Versagensmodell enthält eine kumulative Schädigungsfunktion, die abhängig ist von der Mehrachsigkeit, der plastischen Dehnung und der Dehnrate. Wenn ein kritischer Wert dieser Funktion im Modell erreicht ist, können die betreffenden Elemente gelöscht werden.

2.1 Das elasto-plastische Modell

2.1.1 Fließfunktion und Fließpotential

Das phänomenologische Materialmodell beruht auf klassischen Konzepten der elastisch-plastischen Kontinuumsmechanik: Elastizität, Plastizität, Verfestigung sowie der Aufspaltung der Dehnungen in einen elastischen und plastischen Anteil. Darüber hinaus ist das Modell in einem mitrotierenden Koordinatensystem formuliert, um materielle Objektivität zu gewährleisten.

Die Fließfunktion Φ (Bild 1) ist von quadratischer Form im (σ_m, σ_e) -Raum:

$$\Phi = \tilde{\sigma} - B \leq 0 \quad \tilde{\sigma}^2 = \sigma_e^2 + \alpha^2 (\sigma_m - \sigma_0)^2 \quad (1)$$

$$\text{mit } \sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \quad \sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{kk}$$

In dieser Gleichung ist $\alpha=B/A$ der Parameter, der die Form der elliptischen Fließfläche bestimmt, B und A bestimmen die Größe der vertikalen und horizontalen Achsen der Ellipse. Die Spannung σ_0 charakterisiert das Zentrum der Ellipse auf der horizontalen Achse. Die Asymmetrie der Fließfläche

bezüglich der Mittelspannung trägt dem unterschiedlichen Fließverhalten unter Zug- und Druckbeanspruchung Rechnung. $\tilde{\sigma}$ bezeichnet eine spezielle Vergleichsspannung, die zugehörige Dehnung $\tilde{\varepsilon}$ ist definiert durch die Äquivalenz der plastischen Arbeit. Die plastische Dehnrates $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ wird als normal zum Fließpotenzial G (Bild 2) angenommen (nicht-assoziierte Fließregel), ihre Größe wird bestimmt durch die Konsistenzbedingung:

$$G = \sqrt{\sigma_e^2 + \beta^2 \sigma_m^2} \quad \dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} \quad \text{mit } \dot{\lambda} \text{ aus } \dot{\Phi} = 0 \quad (2)$$

Der Parameter β , der die Form des Fließpotenzials repräsentiert, kann über die plastische Querkontraktionszahl ν^p aus einachsigen Zugversuchen über die Beziehung (3) hergeleitet werden:

$$\nu_p = -\frac{\Delta \varepsilon_{11}^p}{\Delta \varepsilon_{33}^p} = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{\beta}{3}\right)^2}{1 + \left(\frac{\beta}{3}\right)^2} \quad \beta = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1 - 2\nu_p}{1 + \nu_p}} \quad (3)$$

Das Verfestigungsverhalten wird durch eine multilineare Funktion beschrieben. Die zugehörigen Werte der wahren Dehnungen und Spannungen können aus einachsigen Zugversuchen ermittelt und in tabellarischer Form eingegeben werden. Lediglich die Größe der Ellipse im Spannungsraum ändert sich mit zunehmender Dehnung (α bleibt konstant). Berücksichtigt man dies, so erhält man:

$$B = \sqrt{1 + \alpha^2 \left(\frac{1}{3} - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^2} \sigma_T \quad \text{und} \quad \Delta \tilde{\varepsilon} = \sqrt{1 + \alpha^2 \left(\frac{1}{3} - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^2} \Delta \varepsilon_{ax} \quad (4)$$

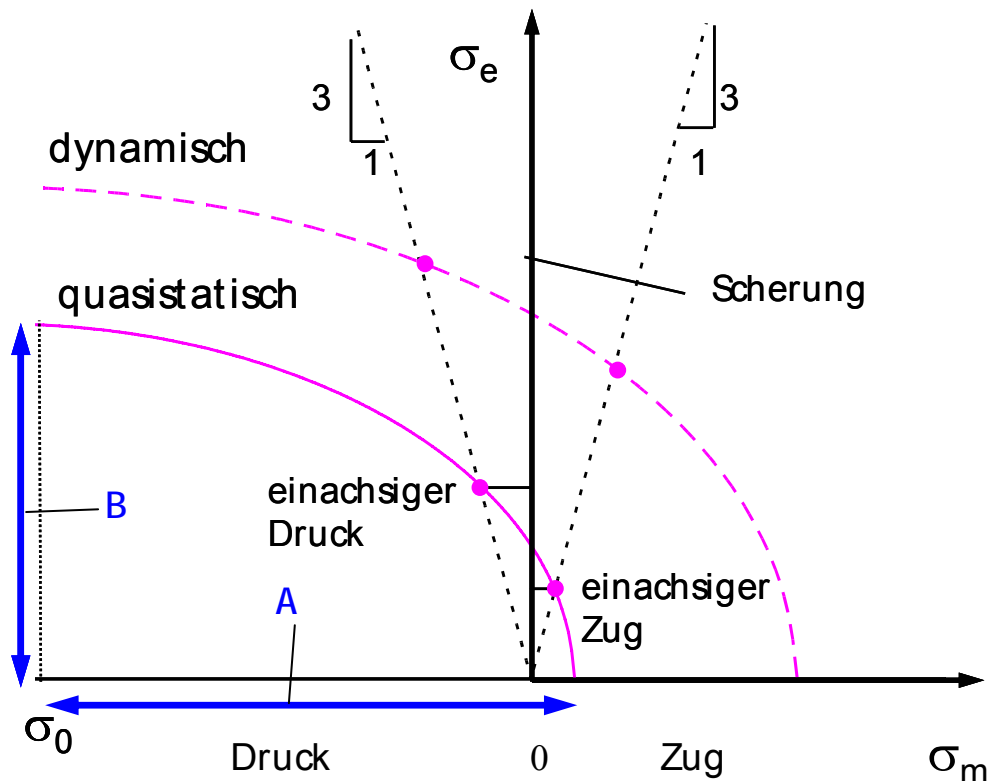
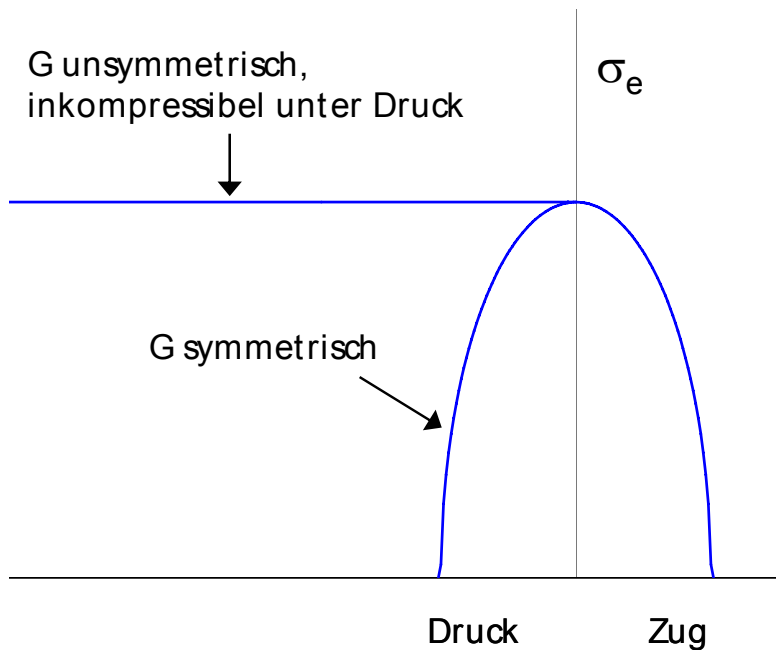


Bild 1: Fließfunktion des IWM-Modells

σ_T und ε_{ax} bezeichnen die Fließspannung und die plastische Dehnung unter einachsiger Zugbeanspruchung.

Das Zentrum der Ellipse σ_0 und die Form der Fließfläche α können aus dem Unterschied der Fließspannung unter Zug und Druck hergeleitet werden.



$$G \equiv \sqrt{\sigma_e^2 + \langle \beta \rangle^2 \sigma_m^2} \quad \langle \beta \rangle = \begin{cases} \beta & \text{für } \sigma_m \geq 0 \\ 0 & \text{für } \sigma_m < 0 \end{cases}$$

Bild 2: Potentialfunktion des IWM-Modells

Da sich der Klebstoff unter Druckbeanspruchung eher plastisch inkompressibel verhält, ist im Modell die Option vorgesehen, den Wert von β auf Null zu setzen, wenn die Mittelspannung σ_m negativ ist.

Ein ratenabhängiges Materialmodell vom Johnson-Cook-Typ wird eingesetzt für die Formulierung einer analytischen Beziehung zwischen Fließspannung und Dehnrates:

$$\sigma_T = \begin{cases} \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{ax}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \sigma_T^{sta} & \text{wenn } \dot{\varepsilon}_{ax} > \dot{\varepsilon}_0 \\ \sigma_T^{sta} & \text{wenn } \dot{\varepsilon}_{ax} \leq \dot{\varepsilon}_0 \end{cases} \quad (5)$$

mit σ_T^{sta} als Fließspannung für einen Referenzzustand, i.a. eine quasistatische Beanspruchung, σ_T ist die Fließspannung bei erhöhter Dehnrates, $\dot{\varepsilon}_{ax}$ ist die axiale plastische Dehnrates, C und $\dot{\varepsilon}_0$ sind zwei Materialparameter. Letzterer bezeichnet die Dehnrates, unterhalb der keine Ratenabhängigkeit vorliegt, d.h. wo die Fließspannung σ_T^{sta} beträgt.

2.2 Versagenskriterium

Um das Materialversagen zu beschreiben, wurde ein Bruchkriterium nach Johnson-Cook in das Modell eingefügt. Die Bruchdehnung ε_f ist abhängig von der Spannungsmehrachsigkeit $T=p/\sigma_e$ und der Dehnrates und lässt sich durch die folgende Funktion ausdrücken:

$$\varepsilon_f = (d_1 + d_2 \exp(-d_3 T)) \left(1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \quad (6)$$

Die akkumulierte Schädigung D ist definiert als:

$$D = \int_0^{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (7)$$

Versagen tritt ein, wenn der Schädigungsparameter D den Wert 1 erreicht.

3 Experimentelle Untersuchungen an Substanz- und Verbundproben

Zur Ermittlung der Modellparameter wurden eine Reihe von Experimenten unter Zug-, Druck- und Scherbelastung für Dehnraten von quasistatischer Belastung bis hin zu crashrelevanten Dehnraten bei Umgebungstemperatur durchgeführt. Der Klebstoff wurde von DOW-Automotive hergestellt und trägt die Herstellerbezeichnung „Betamate 1496“ [4]

3.1 Experimente an Substanzproben

Für Zugbeanspruchung wurden ca. 4 mm dicke Flachzugproben ausgewählt und positionsgeregelt mit konstanter Abzugsgeschwindigkeit belastet. Bei niedrigen Belastungsgeschwindigkeiten wurde die Verlängerung lokal mit einem Clippage gemessen, bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten kam ein optisches Extensometer zum Einsatz. Bild 3 zeigt die technischen Spannungs-Dehnungskurven für die untersuchten Dehnraten.

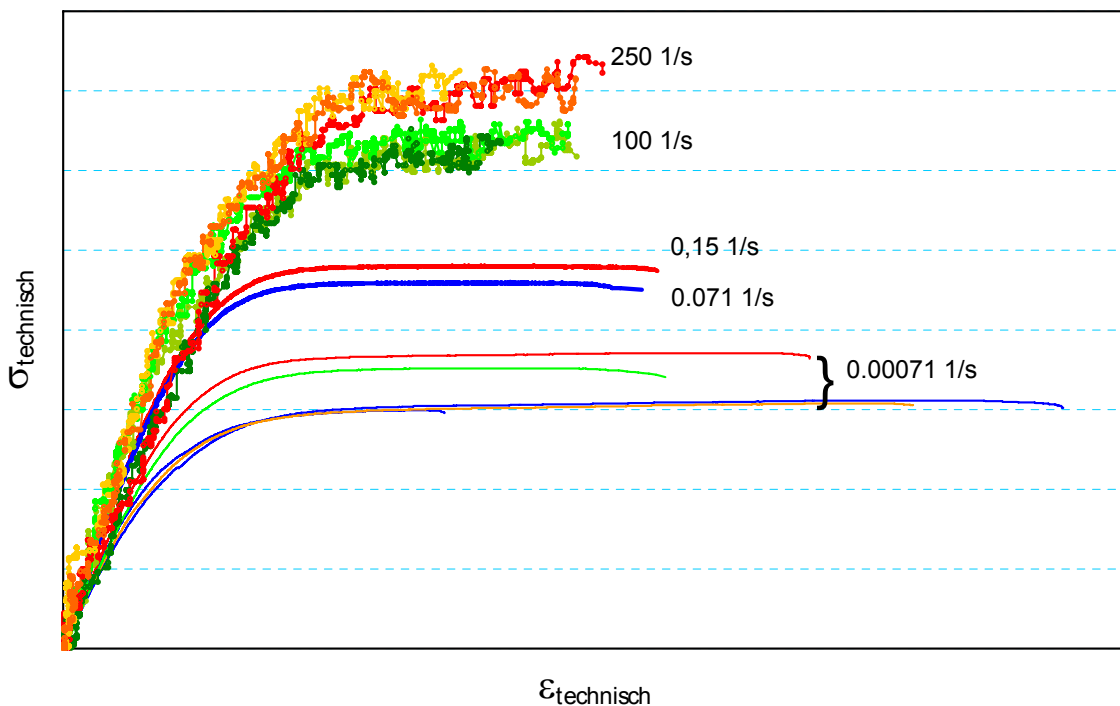


Bild 3: Technische Spannungs-Dehnungskurven des Klebstoffs für verschiedene Dehnraten

Insbesondere bei den quasistatischen Experimenten wurde eine starke Weisseinfärbung über den gesamten Bereich der plastischen Verformung beobachtet, während bei dynamischer Belastung dieser Effekt in ausgeprägter Form nur in der Bruchzone zu sehen ist (Bild 4). Dieses im Englischen als „stress whitening“ bezeichnete Phänomen [5] wird durch Bildung sog. „crazes“ verursacht, die den Bruchzeitpunkt zu größeren plastischen Dehnungen verschieben, was auch durch die Fließkurven für unterschiedliche Dehnraten belegt wird.

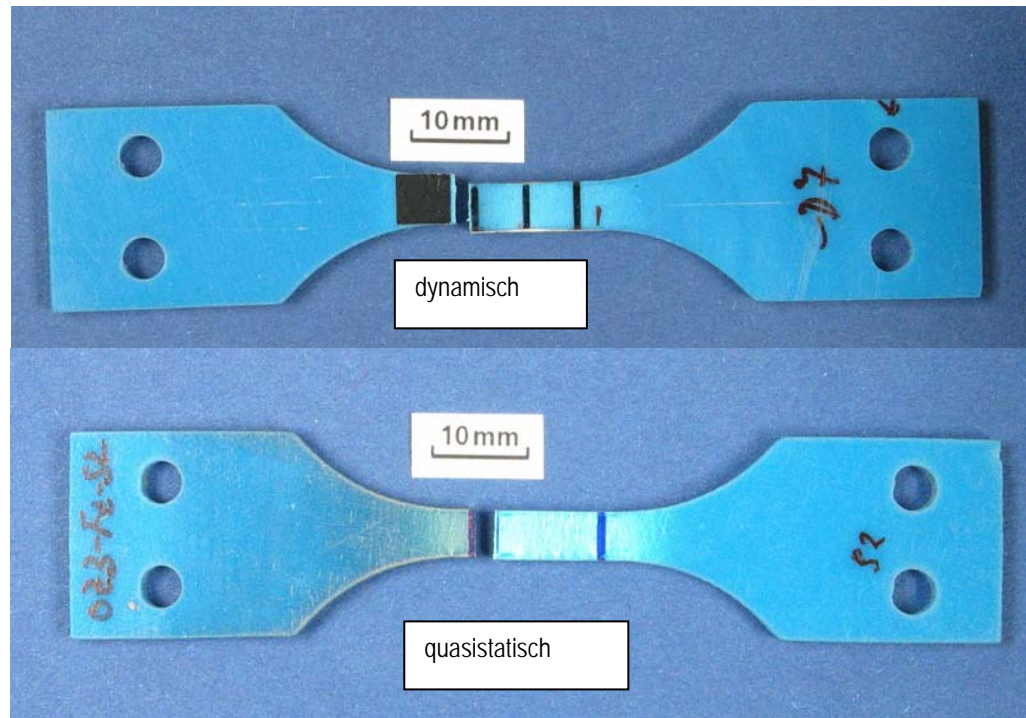


Bild 4: „Stress whitening“ bei Flachzugproben unter quasistatischer und dynamischer Belastung

Scherproben mit einer Klebschichtdicke von 0.4 mm wurden ebenfalls für ein breites Spektrum von Scherraten getestet. Die Fließspannung unter Scherbeanspruchung zeigt die gleiche Dehnratenabhängigkeit wie die Fließspannung unter Zugbeanspruchung. Ein Einfluss der Dehnrates auf das Scherversagen konnte allerdings nicht eindeutig festgestellt werden; das Auftreten von Crazes unter Scherung wurde nicht beobachtet.

Substanzdruckproben mit ca. 4mm Dicke und $\varnothing=16$ mm wurden lediglich quasistatisch belastet. Bild 5 veranschaulicht, dass das Fließkurvenniveau unter Druckbeanspruchung deutlich höher liegt als unter Zugbeanspruchung.

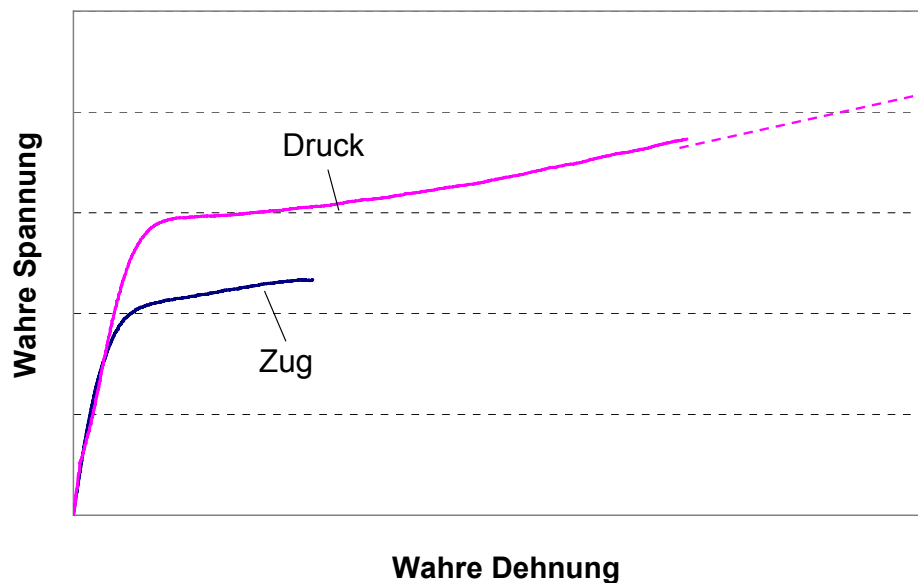


Bild 5: Wahre Spannungs-Dehnungskurven unter quasistatischer Zug- und Druckbelastung

3.2 Experimente an Verbundproben

Für Zugbeanspruchung wurden Rundzugproben mit $\varnothing=10$ mm und einer Klebschichtdicke von 0.4 mm ausgewählt (s. **Bild 9**) und positionsgeregelt mit konstanter Abzugsgeschwindigkeit belastet. Bei niedrigen Belastungsgeschwindigkeiten wurde die Verlängerung lokal mit einem Clipgage gemessen, bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten kam wieder ein optisches Extensometer zum Einsatz. Verbunddruckproben mit $\varnothing=10$ mm und einer Klebschichtdicke von 4 mm wurden nur quasistatisch getestet. Bei Zugbeanspruchung zeigte sich ein deutlich unterschiedliches Bruchverhalten im Vergleich zu Substanzproben (s. Kap. 5).

4 Parameteridentifikation

Zur Ermittlung der Parameter für das Materialmodell wurden zunächst die Experimente an Substanzproben unter einachsigen Zug, einachsigen Druck und Scherung analysiert. Für die Verbunddruckprobe wurde eine gemittelte Mehrachsigkeit aus der FE-Simulation verwendet. Bild 6 veranschaulicht die Ermittlung der Fließfläche für den Fließbeginn bei quasistatischer und dynamischer Beanspruchung. Der Fließbeginn wurde durch den Schnittpunkt der Tangenten an den elastischen und plastischen Ast der Fließkurven bestimmt. Als Parameter erhält man den Formparameter der elliptischen Fließfläche α und den Spannungswert für die Verschiebung der Fließfläche σ_0 , der Formparameter des Fließpotentials β ergibt sich aus der Querkontraktionszahl ν_p .

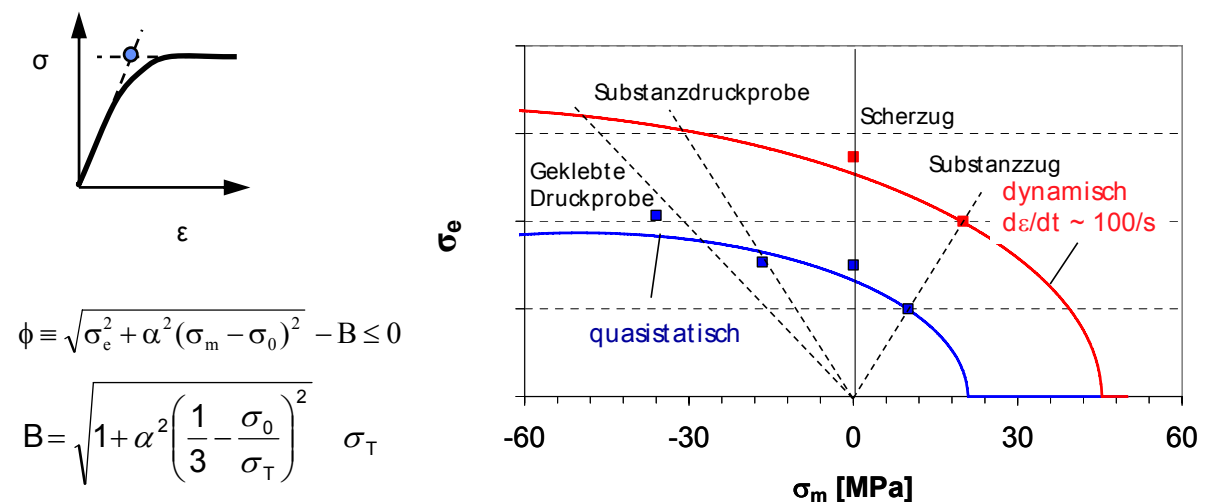


Bild 6: Ermittlung der Parameter für die Fließfläche des Klebstoffs, Fließbeginn bei quasistatischer und dynamischer Belastung

Die Parameter zur modellmäßigen Beschreibung der Dehnratenabhängigkeit des Fließ- und Bruchverhaltens wurden durch numerische Simulation der Experimente an Substanzproben ermittelt. Bild 7 zeigt, dass die Dehnratenabhängigkeit der Fließspannung mit dem Johnson-Cook- Ansatz (5) in guter Näherung beschrieben werden kann. Bild 8 macht deutlich, dass sich bei Auftragung der Fließspannung über dem Logarithmus der Dehnrates ein linearer Zusammenhang ergibt.

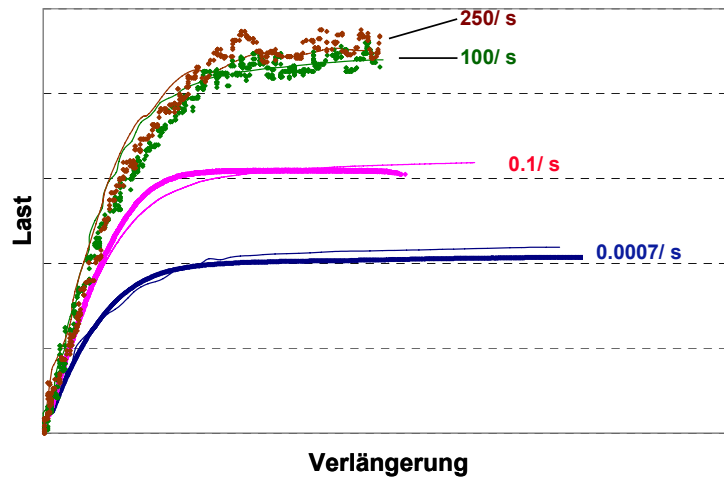


Bild 7: Spannungs-Dehnungskurven aus einachsigen Zugversuchen bei unterschiedlichen Dehnraten (Experiment: Symbole ◆◆, Simulation :Linien —)

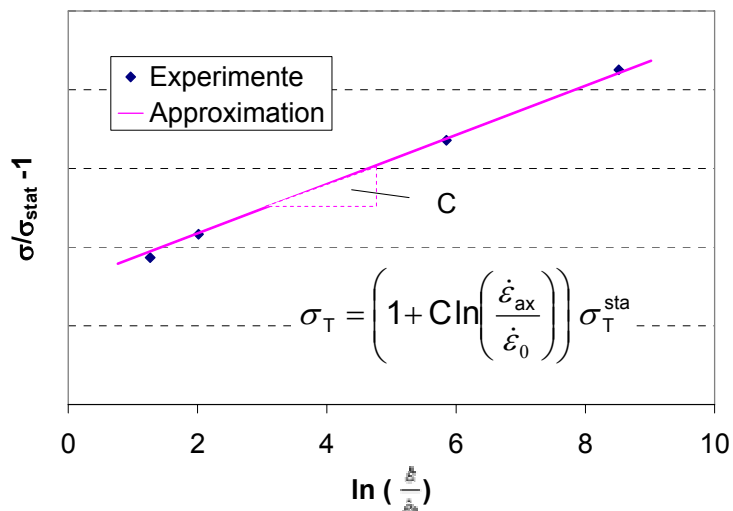


Bild 8: Bestimmung der Modellparameter für die Dehnratenabhängigkeit der Fließspannung

5 Materialverhalten des Klebstoffs in Substanz- und Verbundproben

Bei den Experimenten unter Zugbelastung wurden für Substanz- und Verbundprobe zwar gleiches Lastniveau, aber deutliche Unterschiede beim Bruchverhalten festgestellt (Bild 9). Während die Substanzprobe nach Erreichen des Lastmaximums instabil bricht, sinkt die Last bei der Verbundprobe mit wachsender Verschiebung kontinuierlich auf den Wert "0" ab. In der Simulation kann man dieses Versagensverhalten nicht mit dem Johnson-Cook-Ansatz nachbilden, da er keine Schädigung bis zum Erreichen der Versagensdehnung berücksichtigt und in diesem Fall die Last bis zum Bruch zunehmen würde. Durch Einführung einer gekoppelten Schädigung kann man die Evolution der Schädigung bis zum Versagen jedoch berücksichtigen, in dem man eine kritische Dehnung für Initiierung einführt, deren Wert deutlich unter der Versagensdehnung liegt. Erreicht die Schädigungsvariable D in den zugrunde liegenden Gleichungen (8) den Wert $D = D_i$, so beginnt die Schädigung und bei Erreichen des Wertes $D = 1$ wird die Versagensdehnung und damit der vollständige Verlust der Tragfähigkeit erreicht. Die Spannungen werden nach Gl. (8) mit der Schädigungsvariablen D gekoppelt, wobei $\tilde{\sigma}$ dem Wert im nicht-geschädigten Material entspricht. Diese Unterschiede im Bruchverhalten wurden sowohl bei quasistatischer als auch bei dynamischer Belastung beobachtet.

$$\sigma = \left(1 - \left\langle \frac{D - D_l}{1 - D_l} \right\rangle^n \right) \tilde{\sigma} \quad \begin{cases} D \leq D_l & \sigma = \tilde{\sigma} \\ D = 1 & \sigma = 0 \end{cases} \quad (8)$$

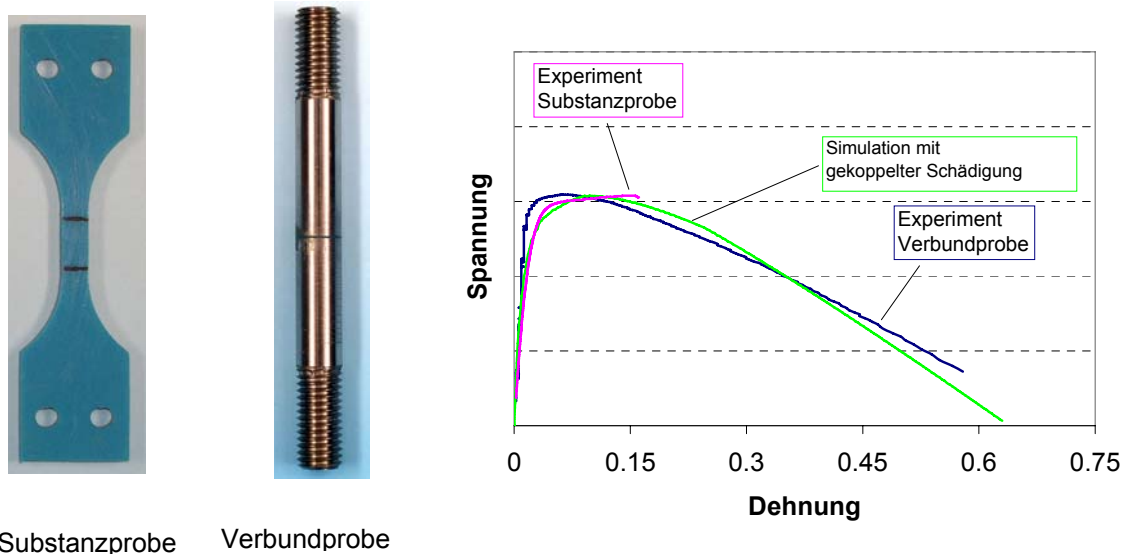


Bild 9: Versagensverhalten des Klebstoffs in Substanz- und Verbundprobe bei quasistatischer Belastung

Die Instabilität wird bei der Flachzugprobe dadurch ausgelöst, dass die in der Substanzprobe gespeicherte elastische Energie zu Beginn des Versagens frei wird und die Materialtrennung beschleunigt. Bei der Verbundprobe ist nur in der dünnen Klebschicht elastische Energie gespeichert, da sich die Fügeiteile aus Stahl nahezu starr verhalten. Das Versagen der Substanzprobe kann man in der Simulation näherungsweise dadurch abbilden, dass man im FE-Modell der Verbundprobe die Fügeiteile mit den elastischen Eigenschaften des Klebers versieht. Wie Bild 10 veranschaulicht, kann man mit einem derartigen Ersatzmodell instabiles Versagen der Substanzprobe nachbilden.

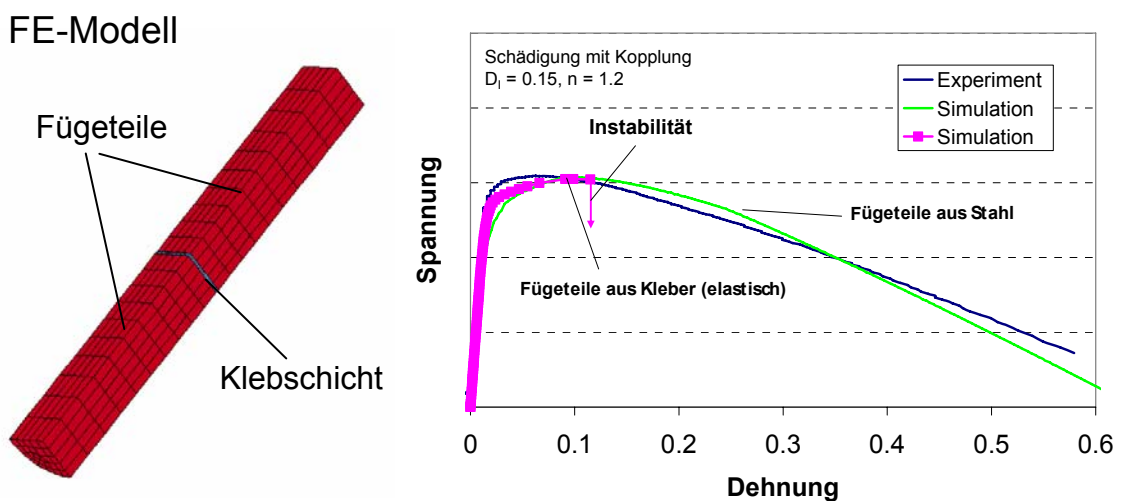


Bild 10: Modellierung des instabilen Versagens der Substanzprobe mit einem Ersatzmodell der Verbundprobe

Da die Klebschicht in der Verbundprobe wegen der unterschiedlichen elastischen Eigenschaften von Stahl und Kleber eine Behinderung der Querdehnung erfährt, stellt sich in der Schicht ein dreidimensionaler Spannungszustand verbunden mit einer gegenüber der einachsigen Beanspruchung der Flachzugprobe erhöhten Spannungsmehrrachsigkeit ein, die wiederum aufgrund des plastisch kompressiblen Materialverhaltens des Klebstoffs eine Verminderung der Fließspannung nach sich zieht. Bild 11 zeigt dies für unterschiedliche Dehnraten von Substanz- und Verbundprobe.

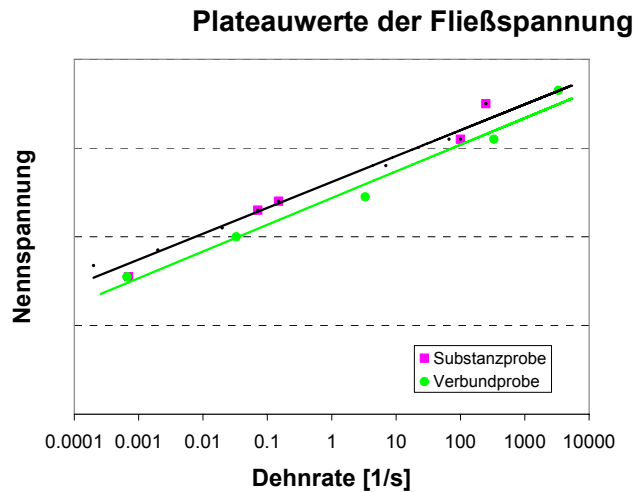


Bild 11: Dehnratenabhängigkeit der Fließspannung von Substanz- und Verbundprobe

6 Zusammenfassung

Die Experimente an Zug- und Scherproben zeigten eine deutliche Zunahme der Fließspannung mit der Belastungsgeschwindigkeit. Die Bruchdehnung nahm jedoch nur bei einachsiger Zugbeanspruchung mit der Belastungsgeschwindigkeit ab. Eine mögliche Ursache für dieses Materialverhalten liegt im Einfluss von Dehnrate und Beanspruchung auf die Bildung von „crazes“, die den Versagensvorgang und somit auch die Bruchdehnung beeinflussen.

Durch analytische und numerische Analysen von Experimenten unter Zug-, Druck- und Scherbeanspruchung konnten die Parameter für das erweiterte Fleck-Modell ermittelt werden. Untersuchungen zur Anwendung des Modells auf Klebverbindungen (KS2-Proben, T-Stoss) bei unterschiedlichen Dehnraten werden aktuell in einem von der FOSTA geförderten Projekt [6] durchgeführt.

Der Vergleich von Substanz- und Verbundproben unter einachsiger Zugbelastung zeigte deutliche Unterschiede im Bruchverhalten. Das Modell mit gekoppelter Schädigung ist in der Lage sowohl für die starre und die nachgiebige Probe (Struktur) das Versagensverhalten richtig zu beschreiben und ermöglicht somit die Ermittlung von Parametern, die besser für die Anwendung auf geklebte Strukturen geeignet sind.

Die Frage, ob Substanz- oder Verbundproben zur Parameteridentifikation verwendet werden sollten bedarf jedoch noch weitergehender Untersuchungen. Neben dem Vorteil der „klebschichtnahen“ Materialcharakterisierung haben die Verbundproben den Nachteil, dass mit ihnen keine einachsige Zug- und Druckbeanspruchung realisiert werden kann.

7 Literatur

- [1] V.S. Deshpande, N.A. Fleck, Isotropic Constitutive Models for Metallic Foams, J. Mech. Phys. Solids 48, 1253-1283, 2000
- [2] D. Memhard, F. Andrieux, D.-Z. Sun, M. Feucht, T. Frank, S. Kolling, Entwicklung und Anwendung von Ersatzmodellen für die Anwendung von Klebverbindungen unter Crashbelastung, 4. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg 2005
- [3] G. R. Johnson, W.H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics, The Hague, Netherlands, 1983, 541-547
- [4] Dow Automotive AG, Techn. Datenblatt, BETAMATE, Status terminated, Ausgabe 06, 9.04.03, hsc
- [5] C. Keith Riew (Ed.), Rubber-Toughened Plastics, American Chemical Society, Washington, DC 1989
- [6] FOSTA-Forschungsvorhaben P676/13/2004 / S 024/10096/04, Methodenentwicklung zur Berechnung von höherfesten Stahlverbindungen des Fahrzeugbaus unter Crashbelastung

