

## Klebverbindungen – Versuch und Simulation

Michael Schlimmer, Prof. i.R.

Institut für Werkstofftechnik, Universität Kassel, Mönchebergstr. 3, D-34125 Kassel

### **Abstract:**

In the frame of the development of a calculation method for adhesive joints experimental uniaxial und combined mechanical testing is based on the continuummechanic and the results with material equations and a failure criterion for short-term, long-term and fatigue for the use in FEM-Programs formulated.

### **Keywords:**

Adhesive joint, mechanical tests, short-term, long-term, fatigue, constitutive model, failure criterion

## 1 Einleitung

Seit der ersten Arbeit von VOLKERSEN aus dem Jahr 1938 ist die Berechnung der Beanspruchung und Festigkeit von Klebverbindungen bis heute in umfangreichem Schrifttum wissenschaftlich behandelt worden und nach wie vor zum Beispiel für die Luftfahrt-, Automobil- und Schienenfahrzeugindustrie aber auch für die Bauindustrie und die Mikroelektronik ein hochaktuelles Thema. Die früheren analytischen Ansätze sind heute weitgehend durch die numerischen Methoden ersetzt worden, mit der schließlich das mechanische Verhalten kompletter geklebter Strukturen simuliert werden soll. Zur Entwicklung entsprechender, auf vorhandener FEM-Software aufbauender und industriell einsetzbarer Berechnungstools geht man von den in Tabelle 1 zusammengestellten Schritten aus.

Tabelle 1: Bearbeitungsschritte zur Entwicklung einer Berechnungsmethode für Klebverbindungen

1. Charakterisierung	Experimentelle Ermittlung von Klebstoff- und Klebschichtkennfunktionen aus Grundversuchen
2. Modellierung	Modellbildung für mechanisches Klebschichtverhalten bei quasistatischer Beanspruchung aus Ergebnissen der Grundversuche
3. Implementierung	Numerische Umsetzung der Materialgleichungen für Berechnung nach FEM
4. Verifikation 1 und Identifikation	FE-Analyse der Grundversuche
5. Ersatzmodellbildung	Entwicklung eines sog. Interface-Modells mit Beschränkung auf maßgebliche Spannungskomponenten zur Reduktion der finiten Elemente
6. Verifikation 2 und Identifikation	FE-Analyse der Grundversuche mit Ersatzmodell
7. Validierung an einer bauteilähnlichen Probe	Experimentelle und rechnerische Untersuchung z. B. der einschnittig überlappten Probe unter verschiedenen Beanspruchungsrichtungen
8. Berechnung eines beliebigen Bauteils	Schritte 6. und 7. auf der Grundlage von 1. bis 5.

Der vorliegende Beitrag beschränkt sich im Wesentlichen auf die unter Punkt 1 und 2 der Tabelle 1 genannten, im Institut für Werkstofftechnik der Universität Kassel entwickelten experimentellen Untersuchungsmethoden für einfache und komplexe Beanspruchungsarten und die konstitutiven Modelle zur Beschreibung des mechanischen Klebschichtverhaltens. Ziel der Arbeiten war und ist die Berechnung der Betriebs- und Dauerfestigkeit einer geklebten Struktur. Ergänzungen zu diesem Bericht und ausführlichere Darstellungen der weiteren Punkte von Tabelle 1 sind in [1] zu finden oder können als CD bei oben genannter Adresse angefordert werden.

## 2 Kontinuumsmechanische Grundversuche bei quasistatisch-zügiger Beanspruchung

In einer Klebschicht, die im Folgenden als homogenes isotropes Kontinuum betrachtet werden soll, stellt sich bei Beanspruchung im Allgemeinen ein inhomogener mehrachsiger Spannungszustand ein, der die mechanische Beanspruchung und das Versagen der Klebschicht bestimmt. Da das mechanische Werkstoffverhalten polymerer Klebstoffe nach kontinuumsmechanischen Gesichtspunkten, d. h. dargestellt in Spannungen, Deformationen und daraus abgeleiteten Größen, wegen bisher kaum realisierter, exakter und mechanisch sinnvoller Messmethoden weitgehend unbekannt ist, müssen zunächst ein- und mehrachsige Versuche zur Ermittlung konstitutiver Gleichungen durchgeführt werden. Hierzu werden zwei Arten von Probekörpern verwendet, Substanz-

und In-situ-Probekörper (Bild 1). Während Substanzproben allein aus der Klebstoffmasse bestehen und der Klebstoffcharakterisierung ohne den Einfluss eines Fügeteils dienen, ermittelt man an In-situ-Proben das Klebschichtverhalten an speziellen Klebverbindungen. Wie an geklebten Bauteilen bestimmen dann Kohäsion und Adhäsion die Verbindungseigenschaften dieser Proben.

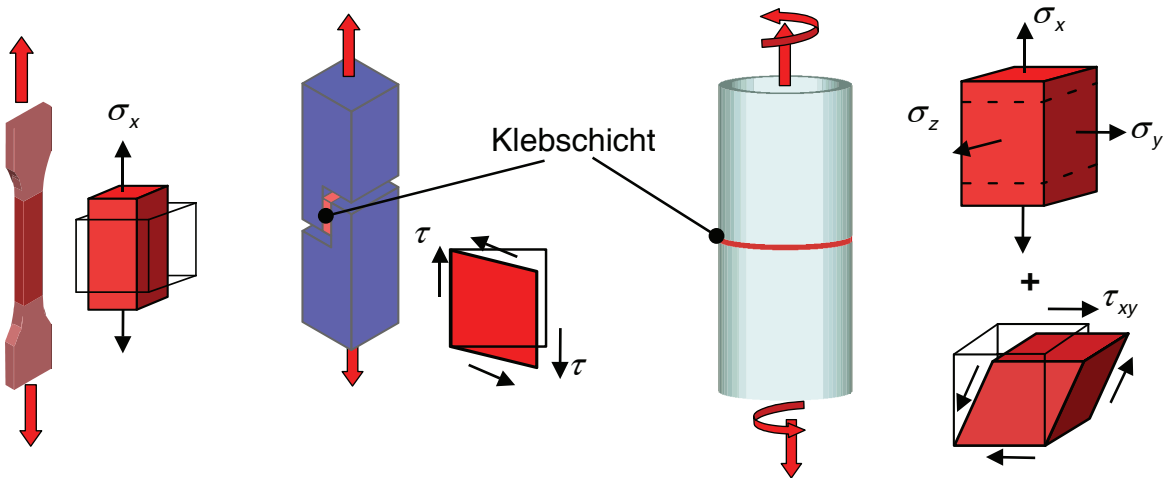


Bild 1: Substanz- und In-situ-Probekörper für die Klebstoffprüfung sowie sich einstellende Spannungszustände und Deformationszustände

## 2.1 Zugversuch an Substanzprobe bei quasistatisch-zügiger Beanspruchung

Die Zugeigenschaften von polymeren Form- und Extrusionsmassen werden an Substanzproben bestimmt, deren Form und Abmessungen in DIN EN ISO 527-2 festgelegt sind. Ergebnis des Zugversuchs ist das bekannte Spannung-Dehnung-Diagramm, aus dem unter anderem die Klebstoffkennwerte Zug-Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit und zum Beispiel Dehnung bei Zugfestigkeit bestimmt werden. Im Gegensatz zu In-situ-Proben kann an Substanzproben zusätzlich auch die sich einstellende Querdehnung des Probekörpers bei einachsigem Zugspannungszustand gemessen werden. Somit lassen sich bei Zugbeanspruchung der Substanzprobe die den Spannungs- und Deformationszustand beschreibenden wesentlichen Kennwerte experimentell bestimmen.

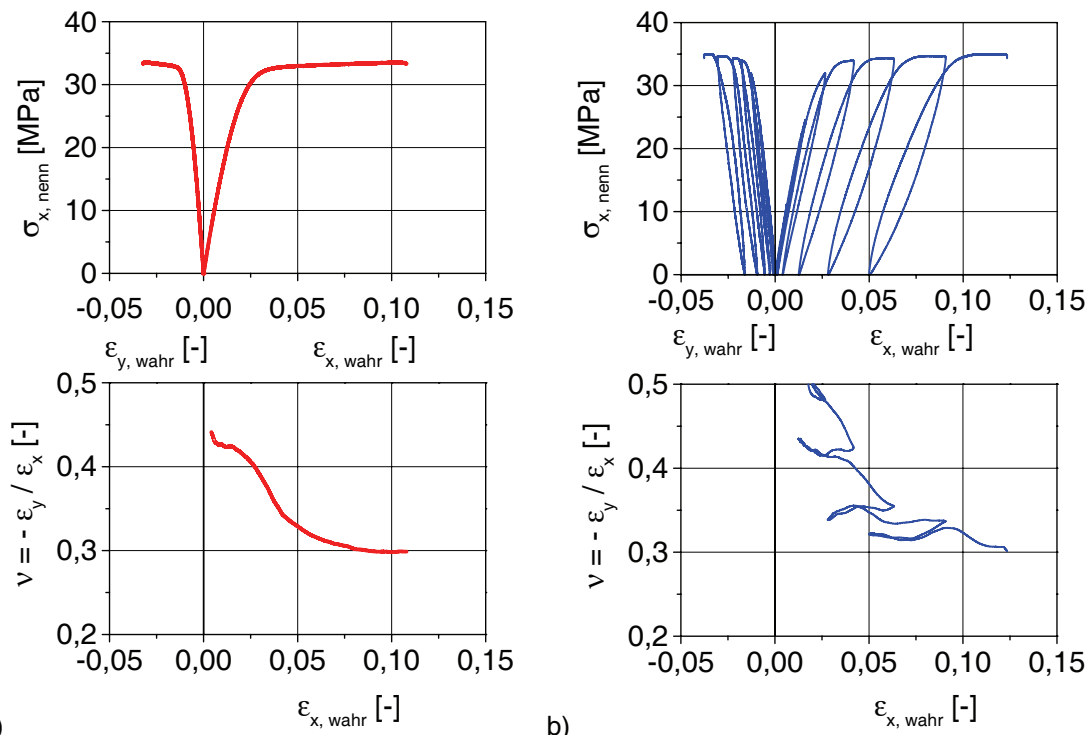
Die Beanspruchung des Probekörpers erfolgt gewöhnlich unter festgelegten Bedingungen mit konstanter Dehnrage oder normgemäß quasistatisch-zügig mit konstanter Traversengeschwindigkeit der Prüfmaschine. Die Messung der Deformationen in Längs- und Querrichtung des zugbeanspruchten Probekörpers geschieht am Institut für Werkstofftechnik berührungslos mit einem biaxialen Laserextensometer. Bild 2 zeigt das Spannung-Dehnung-Verhalten einer Substanzprobe eines für Crashbeanspruchung modifizierten Epoxidharzklebstoffs bei quasistatisch zügiger (Bild 2a) und zyklischer Beanspruchung (Bild 2b) im Zugversuch. Die sich daraus ergebende Querdehnung nimmt mit zunehmender Deformation ab, ein Phänomen, das durch den Teilchenverbund dieser Gruppe von Klebstoffen erklärt werden kann [2].

## 2.2 Zugscherversuch an Klebverbindung bei quasistatisch-zügiger Beanspruchung

Klebverbindungen sollen im Allgemeinen für Schubbeanspruchung ausgelegt werden. Die dazu erforderlichen Klebstoffkennwerte liefert unter anderem der in [3] weiterentwickelte und an ISO 11003-2 angelehnte Zugscherversuch. Ziel des Zugscherversuchs ist die Ermittlung des Schubspannung-Gleitungsverhaltens an speziellen Klebverbindungen, den Zugscherproben (Bild 3). Ergebnis des Zugscherversuchs ist eine Beziehung zwischen Schubspannung und Schiebung (Gleitung), aus der die Klebstoffkennwerte Schubmodul, Schubfestigkeit und Gleitung bei maximaler Schubspannung bestimmt werden können.

Geschieht die Beanspruchung der Zugscherproben mit konstanter Kraftzunahme (DIN 54451) oder konstanter Traversengeschwindigkeit (ISO 11003-2), führt dies in Klebschichten mit nichtlinearem Schubspannung-Gleitungsverhalten zur Beschleunigung bzw. Verzögerung der Gleitung. Abweichend von der Norm erfolgt die quasistatische Beanspruchung der Klebschicht im weiterentwickelten Zugscherversuch daher mit konstanter Gleitungsrate (Bild 3). Eine entscheidende Voraussetzung der Gleitungsregelung ist die Bestimmung der Klebschichtgleitung in Echtzeit. Mit einem

Setzdehnungsaufnehmer (Bild 3) wird hierzu die Verschiebung der Fügeiteile ermittelt, die sich aus der Schubverformung der Klebschicht und der Deformation der Fügeiteile zusammensetzt. Ein Mess-Steuer-Regelsystem eliminiert online die Fügeiteilverformung und bestimmt die jeweilige Klebschichtgleitung.



a) Bild 2: Spannung-Dehnung-Verhalten sowie Querszahl eines Epoxidharzklebstoffs im Zugversuch bei monotoner a) und bei zyklischer Belastung b)

Das an der modifizierten dicken Zugscherprobe erhaltene Schubspannung-Gleitungsdiagramm eines Klebstoffs auf Epoxidharzbasis zeigt Bild 4. Ähnlich dem Ergebnis des einachsigen Zugversuchs erhält man einen annähernd bilinearen Schubspannung-Gleitungs Zusammenhang.

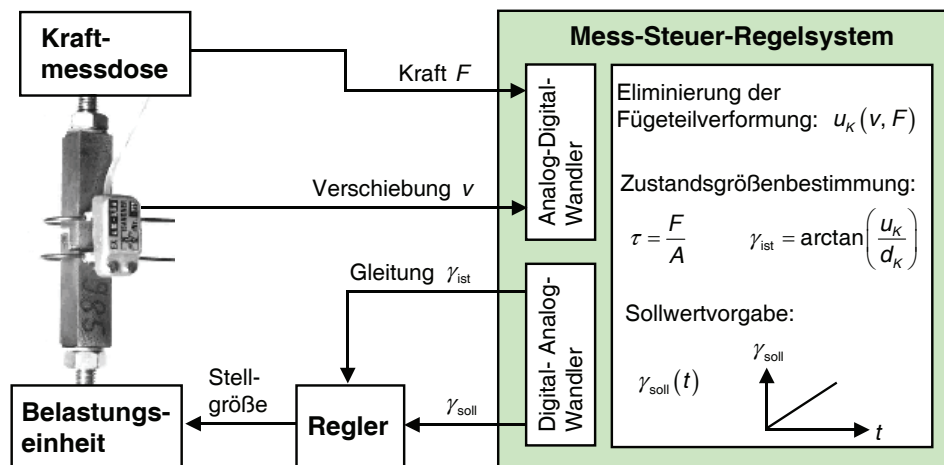


Bild 3: Zugscherprobe mit Extensometer und Ablauf des gleitungsgeregelten Zugscherversuchs

### 2.3 Quasistatisch-zügige Schub- und Normalbeanspruchung an Klebverbindung

Das Schubspannung-Gleitungsverhalten von Klebschichten kann in Anlehnung an ISO 1100-1 auch an stumpf geklebten Rohrproben ermittelt werden. Gegenüber der Zugscherprobe stellt sich bei Torsionsbeanspruchung der Rohrprobe in der Klebschicht zwischen den Rohrhälften eine nahezu

homogene Schubspannungsverteilung ein. Dieser Versuch liefert deshalb die besten und reproduzierbarsten Ergebnisse zum mechanischen Verhalten von Klebverbindungen (Bild 4). Zum Aufstellen von Stoffgleichungen für Klebstoffe wird neben dem Schubspannung-Gleitungs-Zusammenhang mindestens noch der Zugspannung-Dehnung-Verlauf benötigt, bei dem im Gegensatz zum Zugversuch an der Substanzprobe die dünne Klebschicht unter einachsiger Verzerrungszustand steht, der einen hohen hydrostatischen Zugspannungsanteil liefert. Mit der am Institut für Werkstofftechnik vorhandenen Versuchseinrichtung kann an der Rohrprobe das Verformungsverhalten dünner Klebschichten bei einachsiger und kombinierter Schub- / Normalbeanspruchung bestimmt (Bild 5a) und so mit einem Probekörper das komplexe mechanische Klebstoffverhalten bestimmt werden. Die Antwort der Klebschicht auf die äußere Beanspruchung wird dabei mit einem biaxialen Verformungsaufnehmer gemessen (Bild 5b). Da dieser an den Fügeiteilen angebracht wird, fließen in die Dehnungs- und Gleitungsmessung der Klebschicht kraft- und momentenabhängige Anteile der Fügeiteilverformung ein, die von der Messsoftware eliminiert werden. Ähnlich dem Zugscherversuch erfolgt die Beanspruchung der Rohrprobe deshalb mit konstanter Dehn- und/oder Gleitungsrate der Klebschicht.

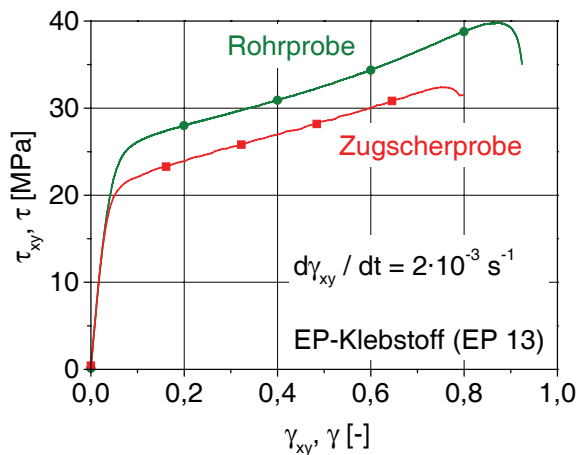


Bild 4: Schubspannung-Gleitungs-Verhalten eines zähmodifizierten EP-Klebstoffs (EP 13) im gleitungsgeregelten Zugscher- und Torsionsversuch

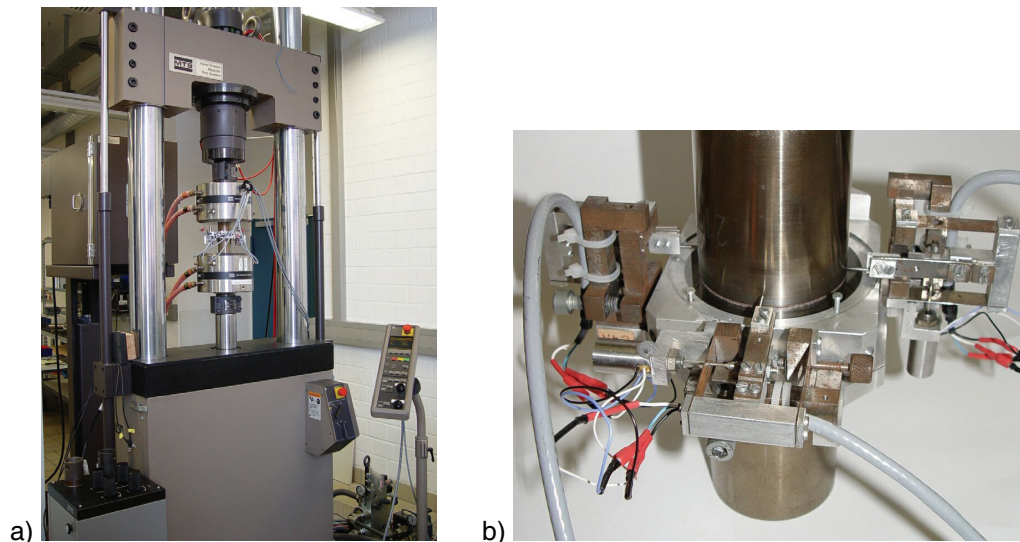


Bild 5: Prüfmaschine für Zug- / Torsionsbeanspruchung a) und Rohrprobe mit biaxialem Verformungsaufnehmer b)

Die experimentellen Ergebnisse aus Versuchen mit vier unterschiedlichen Kombinationen von Schub- zu Normalbeanspruchung sind in Bild 6 dargestellt. Bei Beanspruchung im weitgehend als linearelastisch anzusehenden Bereich besitzen die dargestellten Spannung-Verzerrung-Kurven unabhängig von der Beanspruchungskombination ähnliche Anfangssteigungen. Aus ihnen lassen sich die elastischen Werkstoffkennwerte Schubmodul, Zugmodul und Querkzahl bestimmen. Bei

Beanspruchung über den linearelastischen Bereich hinaus liefern die Versuche abhängig von der Beanspruchungskombination unterschiedlich hohe Fließgrenzen und Spannungsmaxima.

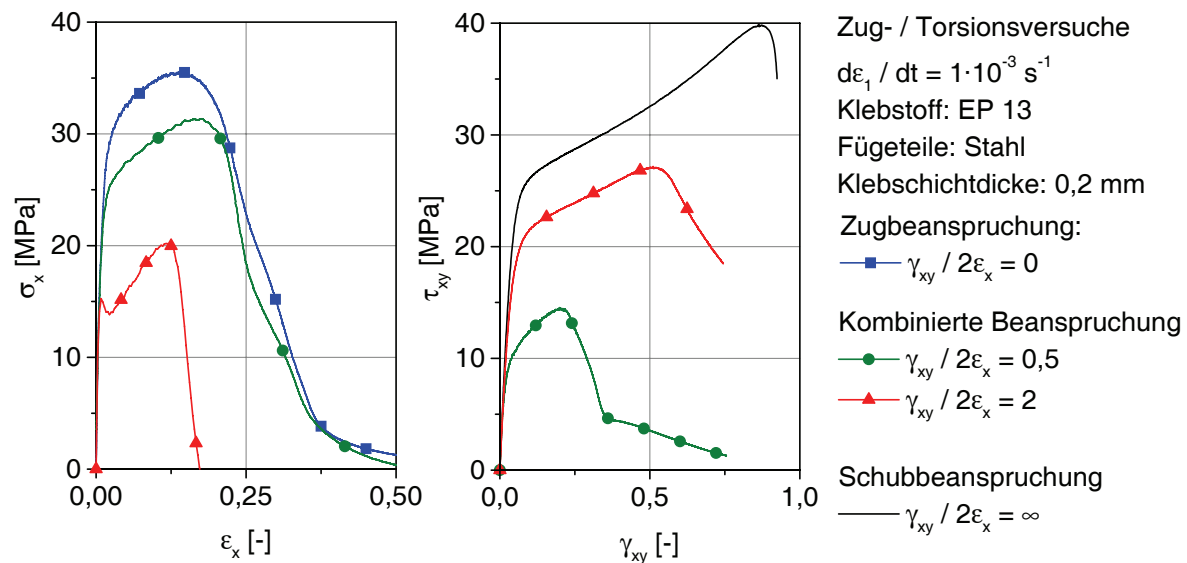


Bild 6: Spannung-Verzerrung-Verhalten eines zähmodifizierten EP-Klebstoffs bei einachsiger und kombinierter Schub- / Normalbeanspruchung

### 3 Modellbildung

Für die numerische Berechnung struktureller Klebverbindungen auf der Basis des experimentellen Befunds muss im nächsten Schritt (Tabelle 1) überprüft werden, ob geeignete mathematische Werkstoffmodelle in den jeweiligen FEM-Programmen zur Verfügung stehen, oder ob neue konstitutive Gleichungen entwickelt werden müssen. Dazu bestimmt man aus den experimentellen Ergebnissen an den untersuchten Klebschichten, die quasi als „Repräsentatives Klebschichtelemente“ aufgefasst werden können, für das mechanische Verhalten charakteristische Einzelwerte und setzt sie in Beziehung zu den theoretischen Grundlagen der Kontinuumsmechanik..

#### 3.1 Fließbedingung und Festigkeitsschaubild

Aus Bild 6 werden die an der Rohrprobe bei einachsiger und kombinierter Schub- / Normalbeanspruchung ermittelten Fließspannungen und maximalen Klebschichtspannungen entnommen und in ihrer Abhängigkeit von einander dargestellt. Eine Kurve durch diese Punkte wird als Fließortkurve bzw. „Festigkeitsortkurve“ bezeichnet und ist im Allgemeinen eine Funktion des Spannungszustands

$$F = F(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}). \quad (1)$$

Da die Fließbedingung bei Isotropie invariant gegenüber Koordinatentransformation ist, gilt weiterhin für diese den Grenzzustand beschreibende Funktion

$$F(J_1, J_2, J_3). \quad (2)$$

$J_1, J_2, J_3$  stellen die Invarianten des Spannungstensors dar. Die Aufspaltung des Tensors als Deviator und Kugeltensor führt zu den Invarianten  $J'_2, J'_3$ . Für plastisch kompressible Werkstoffe lässt sich die Fließbedingung als  $F(J_1, J'_2, J'_3)$  schreiben. Sie wurde von SCHLIMMER [4] für die Sonderfälle

$$F(J_1, J'_2) \quad (3)$$

untersucht. Werden für die experimentell bestimmten Fließpunkte und maximalen Spannungen aus Bild 6 die Invarianten  $J_1, J'_2$  mit Berücksichtigung der Querdehnungsbehinderung über

$$J_1 = \frac{1+\nu}{1-\nu} \sigma_x, \quad J'_2 = \frac{1}{3} \left( \frac{1-2\nu}{1-\nu} \right)^2 \sigma_x^2 + \tau_{xy}^2 \quad (4a,b)$$

bestimmt, erhält man die Darstellung in Bild 7.

Es zeigen sich für die Spannungszustände bei Fließbeginn und bei den Spannungsmaxima nichtlineare Zusammenhänge zwischen der ersten Invarianten des Spannungstensors  $J_1$  und der zweiten Invarianten  $J_2'$  des Spannungstensors. Diese lassen sich mit der Bedingung

$$F = J_2' + \frac{1}{3} a_1 \sigma_F J_1 + \frac{1}{3} a_2 J_1^2 \quad (5)$$

beschreiben [4].  $a_1$  und  $a_2$  sind experimentell zu bestimmende Ansatzfreiwerte,  $\sigma_F$  die Fließspannung.

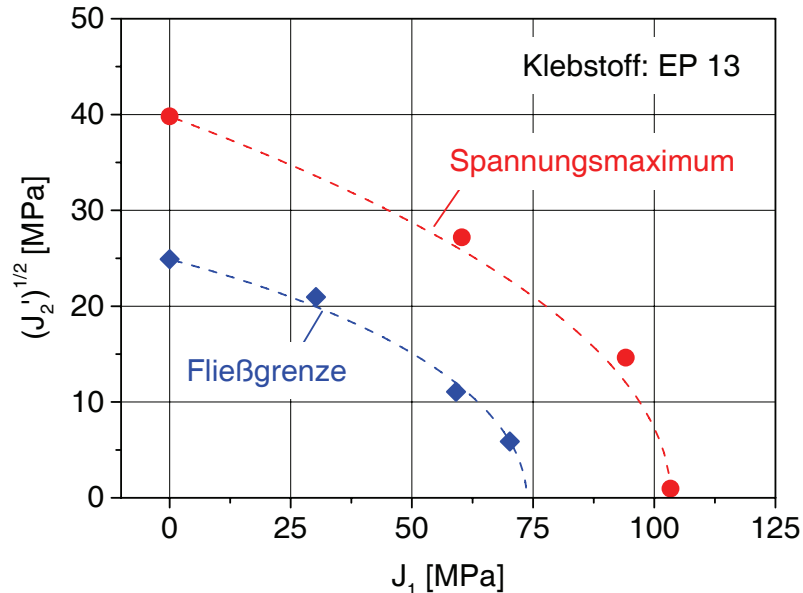


Bild 7: Invariantendarstellung der Fließgrenze und des Spannungsmaximums eines Epoxidharzklebstoffs

Durch Umformung erhält man die schubbasierte Vergleichsspannung

$$\tau_F^2 = J_2' + \frac{1}{3} a_1 \sigma_F J_1 + \frac{1}{3} a_2 J_1^2. \quad (6)$$

Eine physikalische Deutung dieser Fließbedingung wird in [4] erläutert. Geht man davon aus, dass die Formänderungsenergie die maßgebliche Größe für den Fließbeginn ist, lautet die schon 1885 von BELTRAMI veröffentlichte Versagensbedingung, nun aber ausgerichtet auf die Schubfließgrenze  $\tau_F$ :

$$\tau_{F, BELT}^2 = J_2' + \frac{1}{6} \frac{1-2\nu}{1+\nu} J_1^2. \quad (7)$$

Für jeden Beanspruchungspunkt im Spannung-Verformung-Verlauf geht  $\tau_{F, BELT}$  in die so genannte Vergleichsschubspannung  $\tau_{BELT}$  über. Werden die nach Gl. (7) ermittelten Fließgrenzen und maximalen Spannungen in Abhängigkeit von der ersten Invarianten des Spannungstensors  $J_1$  aufgetragen, folgt die Darstellung in Bild 8. Das Quadrat der so genannten Vergleichsschubspannung  $\tau_{BELT}^2$ , die formal für den Fließbeginn wie auch für die Spannungsmaxima gilt, hängt linear von der ersten Invarianten des Spannungstensors ab. Demnach ist maßgeblich für die Werkstoffanstrengung die Formänderungsenergie. Diese nimmt jedoch keinen konstanten Wert an, sondern ist vom hydrostatischen Spannungszustand abhängig.

Mit dieser experimentell gestützten Theorie können einerseits auf der Grundlage der Theorie des Plastischen Potentials plastische Stoffgleichung zur Berechnung von elastoplastischen Verformungszuständen mittels der FEM hergeleitet werden [5] und andererseits wurde durch das sog. BELTRAMI-Diagramm (Bild 8) ein Versagenskriterium geschaffen, dessen Gültigkeit für hohe Dehnraten, Langzeit- und Schwingbeanspruchung derzeit untersucht wird.

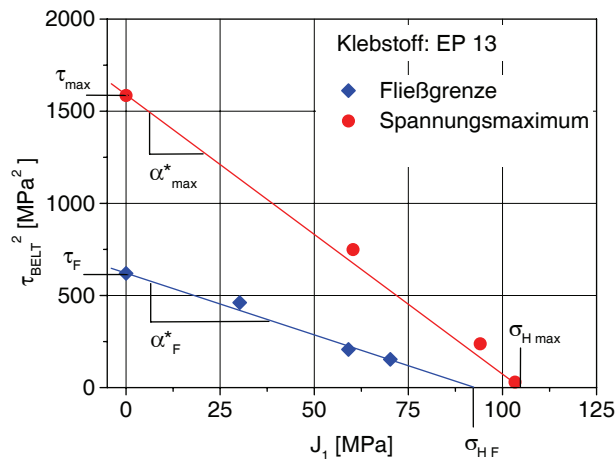


Bild 8: BELTRAMI-Diagramm für einen zähmodifizierten Epoxidharzklebstoff

#### 4 Mechanische Versuche bei anderen Beanspruchungsarten

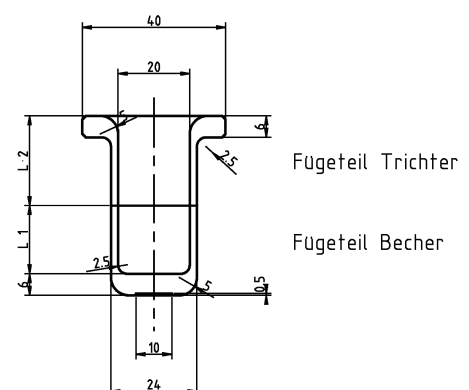
Die Untersuchungen bei quasistatisch-zügiger Beanspruchung liefern die Basisinformationen zur Modellierung des mechanischen Klebschichtverhaltens. Reale Bauteile sind dagegen Beanspruchungen mit hoher Geschwindigkeit ausgesetzt oder schwingend und langfristig belastet.

##### 4.1 Versuche mit hohen Dehnraten

Ein Fallwerk (Bild 9a) wurde speziell für diese Beanspruchungsart in Anlehnung an EN ISO 6603-2 konstruiert und gebaut. Es ermöglicht eine schlagartige Beanspruchung der Klebschicht in einer stumpf geklebten Rohrprobe. Durch den unregelmäßigen Lastfall kommt es allerdings zu nicht konstanten Dehn- und Gleitraten, was die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus den geregelten Doppelrohrversuchen einschränkt.



Bild 9: a) Versuchsaufbau für Schlagbeanspruchung



b) Sog. Becherprobe

Die Probe selbst hat die Form eines Bechers (Bild 9b) und wird durch einen mit DMS bestückten Impactor in der Klebnaht getrennt. Die dabei auftretende Verformung der Naht in Dickenrichtung wird durch ein Laser-Doppler-Extensometer erfasst. Mit dieser Prüfmethode erhält man Spannung-Dehnung-Diagramme der Klebschicht die im Rahmen der bisherigen Untersuchungen bei



Geschwindigkeiten bis ca. 2,5 m/s erzeugt wurden. Durch entsprechend verlängerte Fallhöhen können diese Geschwindigkeiten noch gesteigert werden. In Bild 10 sind die ersten Ergebnisse aus den dynamischen Versuchen der quasistatisch-zügigen Beanspruchung gegenüber gestellt. Auffallend an den experimentellen Ergebnissen ist, dass die Festigkeit, die sich als waagrechte Tangente an die Kurven ergeben, bei den höheren Geschwindigkeiten erheblich zunehmen und die Duktilität kaum eine Beeinträchtigung erfährt, sondern im Gegenteil die Formänderungsenergie bzw. die Arbeitsaufnahmefähigkeit der Klebverbindung ansteigt.

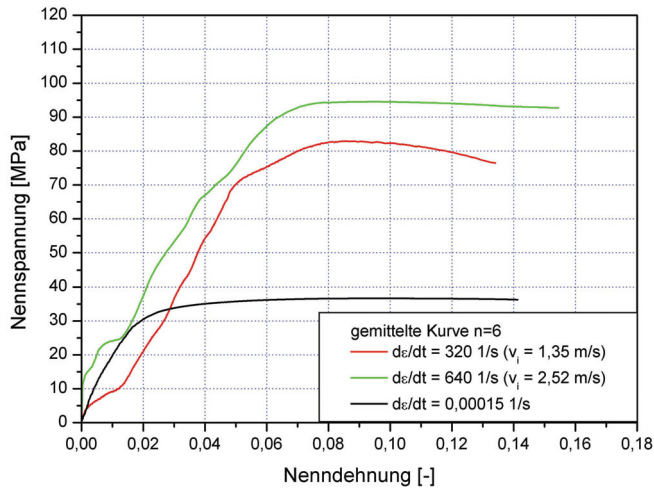


Bild 10: Spannung-Dehnung-Verläufe der Klebschicht in der Becherprobe bei niedriger und hohen Dehnraten

## 4.2 Zeitstandsbeanspruchung

Nimmt man den in Bild 8 dargestellten linearen Zusammenhang für die Kurzzeitfestigkeit auch für die Zeitstandfestigkeit von Klebverbindungen an, dann werden die Koordinatenabschnitte je nach Standzeit und Beanspruchung zum Koordinatenursprung wandern. Zur experimentellen Überprüfung dieser einfachen Hypothese wurde eine Zeitstandanlage für kombinierte Zug-Torsion-Beanspruchung der geklebten Rohrprobe gemäß Bild 1 gebaut, mit der der zusätzliche und für das mechanische Langzeitverhalten maßgebliche Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit untersucht werden kann.

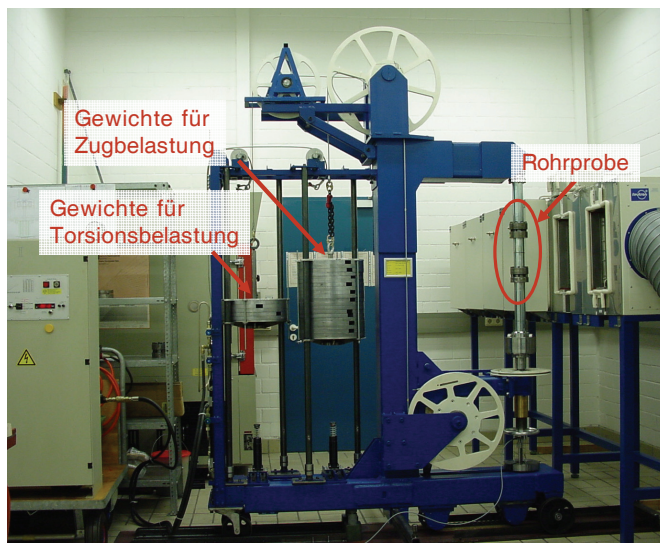


Bild 11: Zeitstandanlage für Klebverbindungen

Die Anlage mit Klimakammer ist in Bild 11 und erste Ergebnisse sind in Bild 12 dargestellt. Die Zeitstandfestigkeiten in Abhängigkeit von den Einflussgrößen lassen sich in doppelt logarithmischer Darstellung durch eine einfache Exponentialfunktion formulieren [1].

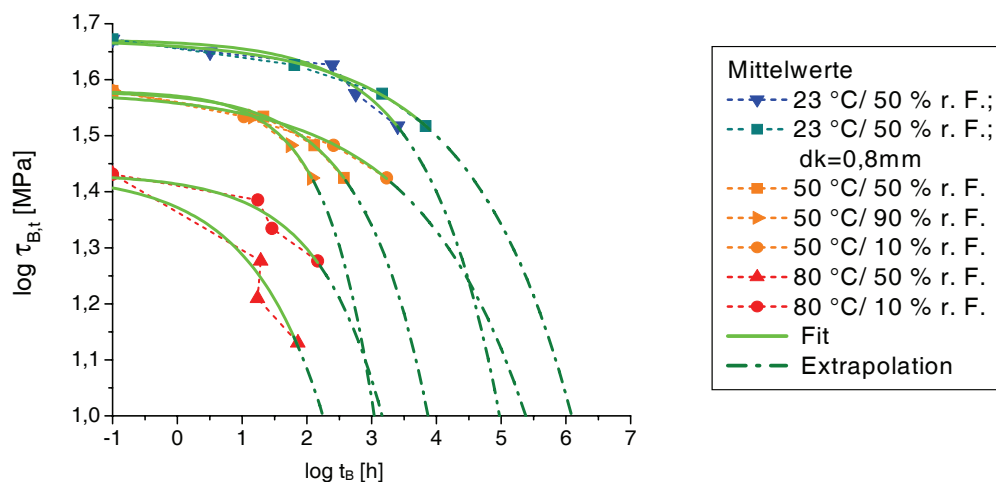
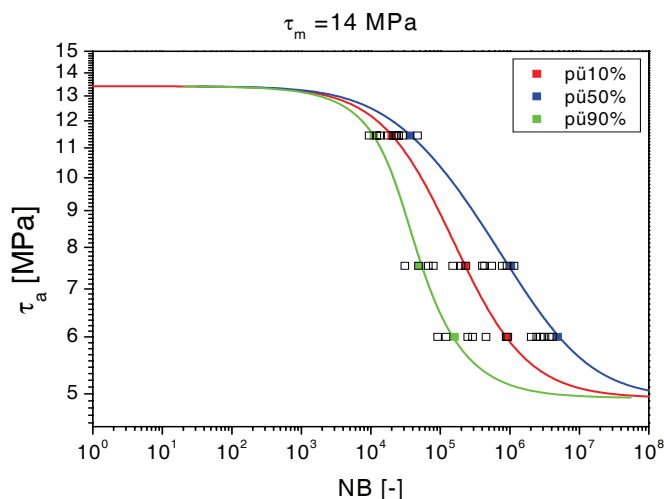


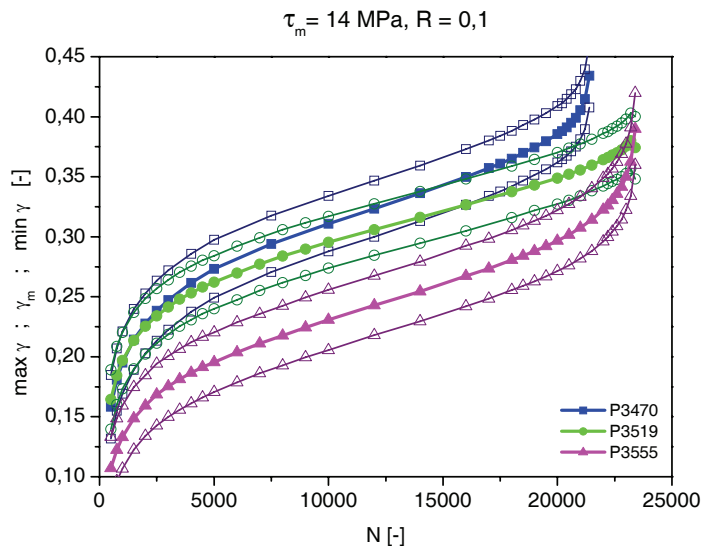
Bild 12: Approximierte und extrapolierte Zeitstandkurven aus Torsionsversuchen in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte

### 4.3 Schwingbeanspruchung

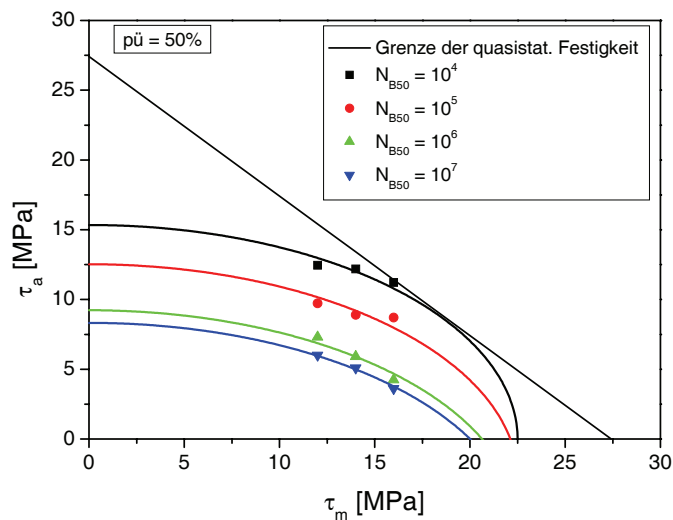
Für die Untersuchungen zur Schwing- und Betriebsfestigkeit von Klebverbindungen wird zunächst der experimentelle Aufbau gemäß Bild 3 zur zyklischen Beanspruchung der Zugscherprobe erweitert. Die Versuche liefern neben üblichen WÖHLER-Kurven (Bild 12a), zyklische Kraft- bzw. Schubspannung-Gleitung-Kurven (Bild 12b) und die mittelspannungsbedingten Kriechgleitungskurven (Bild 12c). Zur Auswertung der hohen Datenanzahl werden die Hysteresen mit dem VOIGT/KELVIN-Modell und die Kriechkurven mit dem BURGERS-Modell sowie einem Schädigungsansatz beschrieben [6]. Nachfolgende Untersuchungen mit der Rohrprobe sollen die in Bild 8 dargestellte Festigkeitshypothese auch für Schwingbeanspruchung bestätigen.



a)



b)



c)

Bild 13 a,b,c: WÖHLER-Diagramm a), Mittelspannungskriechen b) und HAIGH-Diagramm c) von schwingend beanspruchten geklebten Zugscherproben

## 5 Validierung des Plastizitätsmodells an einer bauteilähnlichen Probe

In Bild 14 ist das FE-Modell eines geklebten T-Stoßes für den quasi-statischen Lastfall durch eine isometrische Explosionszeichnung dargestellt. Auf der Oberseite sowie an einer Seite des unteren Trägers ist der Pfosten über drei Klebflächen befestigt. Die Klebschichten wurden mit Cohesive Elementen zwischen den Schalenmittelflächen und einer maximalen Kantenlänge von 2.3 mm diskretisiert [6]. Die Klebschichtelemente sowie die Schweißpunktelemente sind unabhängig von den Knoten der Schalenelemente der Fügeteile definiert und werden über kinematische Nebenbedingungen an die Schalenelemente angebunden. Als Materialmodell für die Klebschicht wurden das kontinuumsbasierten Plastizitätsmodell für das Grenzflächenelement (Cohesive Element)

angewendet. Die Materialkennwerte stammen aus den Versuchen an der Doppelrohrprobe (Bild 8).

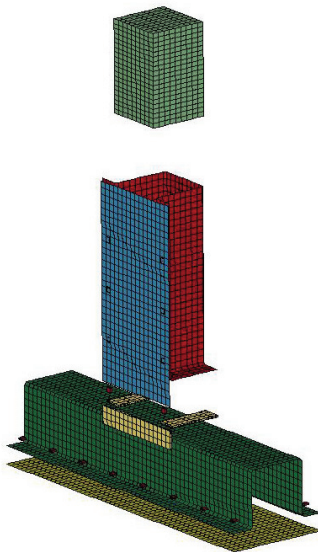


Bild 14: Isometrische Explosionszeichnung der verschiedenen T-Stoß-Teile

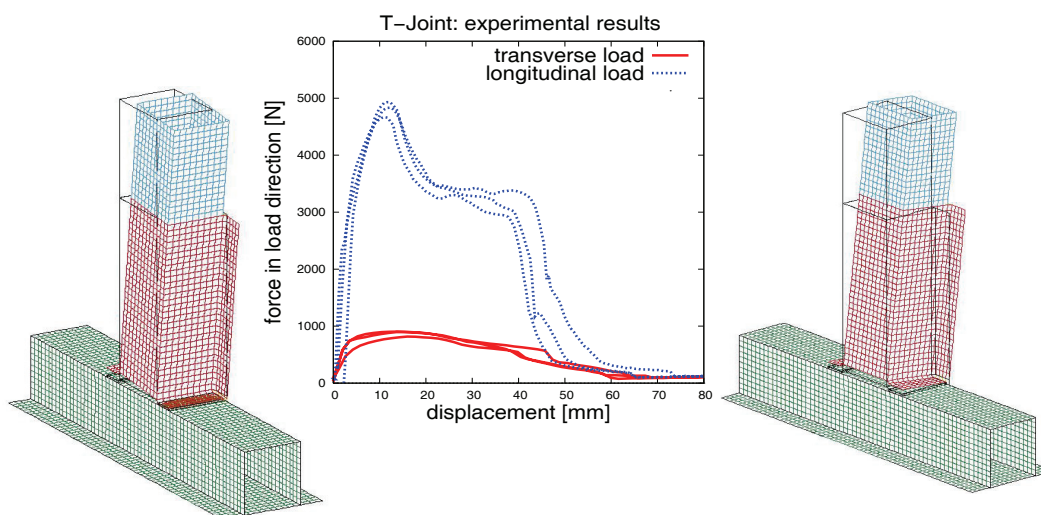


Bild 15: Längs- und Querbelastung des T-Stoßes

In Bild 15 sind die Längs- und Querbelastung des untersuchten T-Stoßes und die Kraft-Verschiebungskurven aus den einzelnen Experimenten [7] dargestellt. Das Versagen der Klebschicht z. B. bei Querbelastung beginnt erwartungsgemäß am Rand der oberen beiden Klebschichten (Bild 16). Durch die Biegebeanspruchung im Pfosten kommt es zu einer Schälbeanspruchung in der Klebschicht, d.h. die Klebschichtelemente versagen infolge einer Beanspruchung auf Zug. Nach Versagen der beiden oberen Klebschichten kommt es zu einer Biegung des ebenen Bleches vom Pfosten. Die seitliche Klebschicht überträgt die auftretenden Kräfte in den unteren Träger ohne zu Versagen. Das beschriebene Versagensverhalten der Simulation entspricht qualitativ dem beobachteten Versagensverhalten im Experiment.

Den quantitativen Vergleich zwischen den Simulationsrechnungen und den experimentellen Ergebnissen für die quasistatisch-zügige Querbelastung zeigt Bild 17. Das Last-Verschiebungs-Diagramm für das FE-Modell mit dem kontinuumsbasierten Plastizitätsmodell basierend auf den identifizierten Schädigungsparametern aus der Doppelrohrprobe ergibt den niedrigsten Verlauf in Bild 17. Die maximal aufnehmbare Last wird in der Simulation erreicht, sobald das erste Klebschichtelement versagt hat.

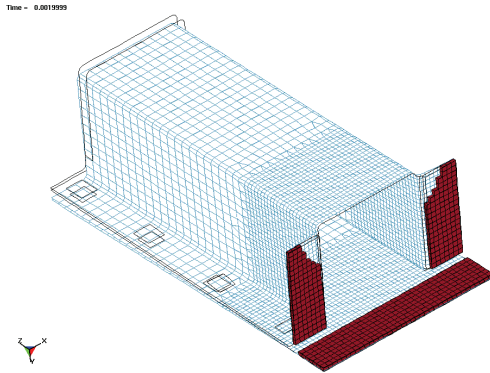


Abbildung 16: Versagensbeginn der Klebschicht bei Querbelastung

Die Simulation unterschätzt das Tragverhalten des T-Stoßes deutlich, d.h. die Klebschicht versagt im Vergleich mit dem Experiment bei einem deutlich geringeren Wert für die Auflagerkraft. Ausschlaggebend für das Ergebnis sind die Schädigungsparameter im Materialmodell der Klebschicht. Durch eine Erhöhung dieses Parameters vergrößert sich die rechnerische Bruchdehnung der Klebschicht und die maximale Traglast des T-Stoßes steigt an. Für die Berechnung ist deshalb der Schädigungsparameters von 0.25 auf 0.35 bzw. 0.5 erhöht wurden. Mit dem Letztgenannten konnte eine gut Übereinstimmung der Rechnung mit dem Experiment gefunden werden. Mit dem Datensatz wurde auch die Längsbeanspruchung des T-Stoßes simuliert und die Rechnerergebnisse zeigen, dass der zuletzt angenommene Schädigungsparameter von 0,5 den experimentellen Befund sehr gut wiedergibt.

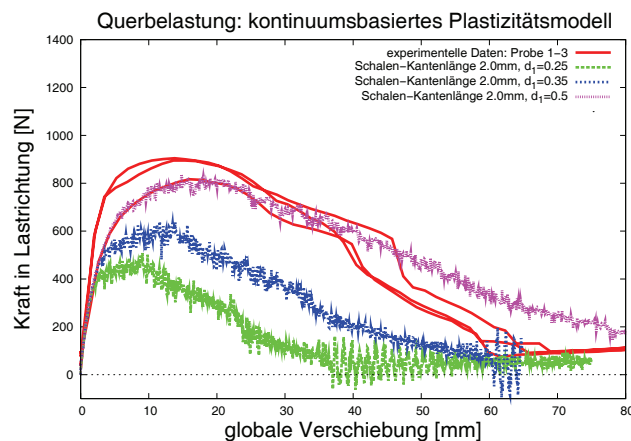


Bild 17: Last-Verschiebungs-Diagramme für die quasistatisch-zügige Querbelastung mit dem kontinuumsbasierten Plastizitätsmodell für die Klebschicht

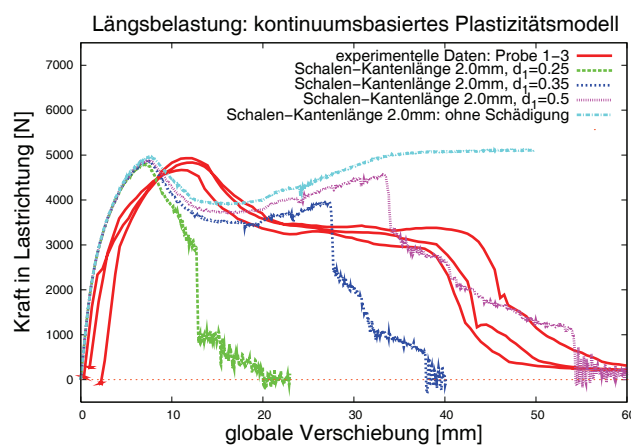


Bild 18: Last-Verschiebungs-Diagramm für die quasi-statische Längsbelastung mit dem kontinuumsbasierten Plastizitätsmodell für die Klebschicht

## 6 Zusammenfassung

Mit den entwickelten Versuchsmethoden sind Konzepte zur experimentellen Untersuchung von Klebverbindungen unter komplexen Betriebslasten erarbeitet worden. Auf der Grundlage der experimentellen Ergebnisse wurden geeignete Materialgleichungen formuliert und als Klebschicht charakterisierende und -beschreibende Daten für die Verwendung in der Berechnung von Klebverbindungen mit der FEM aufbereitet. Die Verifizierung der Materialgleichungen und die Validierung an einer bauteilähnlichen Probe zeigen, dass der eingeschlagene Weg zur Berechnung von Klebverbindungen in beliebigen Strukturen und bei unterschiedlichen Beanspruchungen zu industriell verwertbaren Ergebnissen führt. Jedoch sind noch weitere experimentelle und theoretische Arbeiten notwendig, um ein abgeschlossenes Rechenwerkzeug für die Industrie zur Verfügung stellen zu können

### Literatur

- [1] Schlimmer, M. u.a.: Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen, Z. Adhäsion (Teil 1-9), 5-12 (2004) und 1-3 (2005), 5-6 (2006)
- [2] Schlimmer, M.: demnächst
- [3] Schlimmer, M., Reiling, K., Klapp, O.: Weiterentwicklung des Zugscherversuchs nach DIN 54451 zur Ermittlung der Tau-Gamma-Funktion von Klebschichten in einer einfach überlappten Klebverbindung. Forschungsbericht 1-1999, (1999)
- [4] Schlimmer, M.: Grundlagen zur Berechnung des mechanischen Verhaltens von strukturellen Klebverbindungen des Fahrzeugbaus. Tagungsband 10. Paderborner Symposium Fügetechnik, (2003)
- [5] Schlimmer, M.: Experimentelle Untersuchungen und Materialmodellierung zur Berechnung von Klebverbindungen. 5. LS-DYNA Anwenderforum, Ulm (2006)
- [6] Matzenmiller, A. Gerlach, S.: Methodenentwicklung zur Berechnung von höherfesten Stahlklebverbindungen des Fahrzeugbaus unter Crashbelastung, Abschlussbericht Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf (2007)
- [7] Hahn, O., Wißling, M.: Methodenentwicklung zur Berechnung von höherfesten Stahlklebverbindungen des Fahrzeugbaus unter Crashbelastung, Abschlussbericht Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf (2007)

Die Untersuchungen wurden gefördert durch die DFG und die AiF. Insbesondere lieferten die Forschungsprojekte „Methodenentwicklung zur Berechnung und Auslegung geklebter Stahlbauteile für den Fahrzeugbau (AiF-Nr. 76 ZN und AiF-Nr.141 ZN) wertvolle Ergebnisse. Für die Förderung und Unterstützung seien der DFG, der AiF und der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. sowie den projektbegleitenden Industrieausschüssen an dieser Stelle gedankt.