

# Geklebte Strukturen unter Crashbeanspruchung – Entwicklung und Parameteridentifikation eines Modells zur FEM-Simulation von Klebschichten

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURSWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Ing. Manuel Hentrich  
aus Warburg

Tag des Kolloquiums: 16.12.2009  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Rolf Mahnken  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Michael Kaliske



Schriften des Lehrstuhls für Technische Mechanik  
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rolf Mahnken, M.Sc.

P-2010-2

**Manuel Hentrich**

## **Geklebte Strukturen unter Crashbeanspruchung**

Entwicklung und Parameteridentifikation eines Modells  
zur FEM-Simulation von Klebschichten

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag  
Aachen 2010

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2009

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Rolf Mahnken, M.Sc.  
Lehrstuhl für Technische Mechanik  
Warburger Straße 100  
33098 Paderborn  
Tel.: +(49) 5251 602283

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8964-5  
ISSN 1867-1675

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Zusammenfassung

Geklebte Verbindungen stellen eines der effizientesten Fügeverfahren der Natur dar und auch in technischen Anwendungen wird das Potential dieser Technologie zunehmend erkannt. Anforderungen moderner Leichtbaukonzepte erfordern Fügekonzepte wie die Klebtechnik, welche unterschiedliche Materialien mit hoher Tragfähigkeit verbinden können. Zur Anwendung in der technischen Praxis sind jedoch präzise und zuverlässige FEM-Berechnungsmodelle von hoher Relevanz, welche für Klebschichten nur eingeschränkt zur Verfügung stehen.

In dieser Arbeit wird deshalb zunächst ein Überblick über die Werkstoffphänomene polymerer Klebstoffe unter Crashbeanspruchung gegeben und aus mikromechanischen Betrachtungen vier dominierende Werkstoffcharakteristika abgeleitet. Zunächst kennzeichnet die *Zug-Schub-Asymmetrie* die starke Abhängigkeit des Materialverhaltens vom jeweiligen Beanspruchungszustand, die *plastische Verfestigung* und das *Entfestigungsverhalten* sind für die Gesamtverformung einer Fügestelle entscheidend, da deren Spannungsniveau die Verformung der Füge Teile bestimmt. Ein letzter Aspekt gilt der ausgeprägten *Dehnratenabhängigkeit* der Klebstoffe, welche das gesamte Materialverhalten beeinflusst.

Diese physikalischen Eigenschaften werden in einem Materialmodell abgebildet, welches den Einfluss des Beanspruchungszustands und die Dehnratenabhängigkeit berücksichtigt. Ergänzt wird dieses Modell durch einen dualen Schädigungsansatz, welcher auf Basis einer volumetrischen bzw. deviatorischen Vergleichsdehnung das Entfestigungsverhalten beschreibt und sich stark an den mikromechanischen Verformungsmechanismen orientiert. Dieses Materialmodell wird in ein kommerzielles FEM-System integriert und mit Hilfe von Kohäsivzonelementen so aufbereitet, dass auch Entfestigungsvorgänge numerisch stabil wiedergegeben werden.

Der eigentlichen Parameteridentifikation für einen exemplarisch ausgewählten Strukturklebstoff geht eine ausführliche Analyse unterschiedlicher Experimente zur Charakterisierung von Klebstoffen voraus. Dazu wird das implementierte Klebschichtmodell in FEM-Modelle der Werkstoffproben eingesetzt und untersucht, welche Beanspruchungssituationen in den jeweiligen Konfigurationen auftreten. Auf Basis dieser Betrachtungen lassen sich gezielt Experimente auswählen, welche zur Aktivierung aller Modellparameter erforderlich sind.

Die konkrete Bestimmung der Parameter erfolgt auf Basis ausgewählter Zug-, Zugscher und Doppelrohrversuchen, in einem kombinierten Verfahren werden die Vorteile numerischer Parameterbestimmung über einen Optimierungsalgorithmus mit den Erkenntnissen zur Aussagegenauigkeit der einzelnen Experimente verknüpft.

Der gewonnene Parametersatz wird sowohl anhand von FEM-Berechnungen der zugrunde liegenden Werkstoffversuche verifiziert, als auch über eine unabhän-

gige bauteilähnliche KSII-Probe validiert. Die weitgehend gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten zeugt von einem viel versprechenden Ansatz zur besseren Berechenbarkeit geklebter Strukturen.

## Abstract

The importance of adhesive joining becomes obvious due to the diversity of this technology in nature. Especially for light-weight constructions the use of adhesives reaches the technical industry with great potential in bonded structures. Therefore the demands on numerical design methods increases and new approaches for simulating structural adhesives are required.

This work started with a close examination on the molecular design of polymer adhesives. Assuming that short-time dynamics dominate crash situations, four essential physical phenomena are yielded for a material model. A strength difference effect needs independent types of experiments to characterise the mechanical behaviour under different stress situations. Furthermore, plastic strains with hardening and softening effects affect the behaviour of the adhesive joint and at last the influence of strain rates on the stress response has to be considered.

On the basis of these four characteristics, constitutive equations are formulated in terms of invariants. Additionally a dual softening approach was developed based on the volumetric and deviatoric strains which refer to the microstructure of the polymer. Implemented in a commercial finite elements solver this material model uses cohesive elements to represent the behaviour of adhesives.

Two steps were performed in order to identify the parameters of these constitutive equations. Firstly, three common material tests are simulated and analysed with respect to their suitability for getting different material parameters. With these preliminary considerations a specific selection of experiments is used to enable all mechanical effects of the adhesive model. Secondly, the parameter identification is completed using the example of a common structural adhesive. Therefore a combined procedure was developed which uses both, a numerical optimizer and the experience from the simulations of the different testing configurations.

The obtained material parameters are verified on the basis of the performed experiments and show a good correlation for all load situations. Finally, a KSII-sample was chosen to validate the material model with an independent test configuration. As outcome the good correlation between the simulations and the experimental tests delivers a material model which improves simulations of structural adhesives.

## Vorwort

Klebstoffe stehen oft im Kontext negativer Ereignisse, kommen sie zumeist dann zur Anwendung, wenn heruntergefallene und zerbrochene Gegenstände wieder zusammengefügt und zu neuem Leben erweckt werden sollen. Gerade in diesem Zusammenhang zeigen sich die Grenzen molekularer Bindungskräfte und vereiteln manchen häuslichen Reparaturversuch.

Dem Fügeverfahren Kleben scheint jedoch auch im industriellen Umfeld immer noch ein gewisser Malus anzuhängen. Trotz überzeugender Festigkeiten moderner Strukturklebstoffe werden sie nur zurückhaltend eingesetzt und vielleicht mag die mangelnde Vorhersagbarkeit des Klebstoffversagens ein Grund für diese Zurückhaltung sein.

Im Rahmen meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Technische Mechanik bekam ich die Gelegenheit, mich intensiver mit dieser Werkstoffgruppe und ihrem beeindruckenden Potential zu beschäftigen. Dafür möchte ich insbesondere Herrn Prof. Mahnen für seine Anregungen und Unterstützung danken, ohne welche diese Arbeit nicht möglich geworden wäre.

Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Kaliske für die Übernahme des Korreferates und die interessanten Anregungen zum Thema „experimentelle Streuungen natürlicher Werkstoffe“.

Mein Dank gilt ebenfalls allen Projektpartnern des FOSTA-Projektes P676 „Methodenentwicklung zur Berechnung von höherfesten Stahlklebverbindungen des Fahrzeugbaus unter Crashbelastung“, welche in vielen energischen und ambitionierten Diskussionen bewiesen haben, dass Forschung stets auf Austausch und Auseinandersetzung beruht.

Studienarbeiter und Diplomanden waren es, die viele Impulse und überraschende Ergebnisse in ihren Berechnungen und Recherchen zu Tage förderten, dafür ein besonders herzlicher Dank. Neben den fachlichen Diskussionen erinnere ich mich aber auch gerne an lebhafte Gespräche jenseits des Forschungsgegenstandes, welche der Universität ihre besondere Atmosphäre verleihen.

Und dann gab es viele Menschen die mich stets begleitet haben und immer noch begleiten, mir manche neue Sichtweise eröffneten oder einfach nur da waren, wenn nicht konvergierende Algorithmen, streikende Kaffeevollautomaten oder sonstige Unwägbarkeiten meine Laune trübten, ich danke Euch für Eure Freundschaft.

Der wichtigste Dank gebührt jedoch zwei Menschen, die Klebtechnik nach wie vor als hoffnungsloses Konzept zur Reparatur zerbrochener Gegenstände betrachten – Danke, Irina und Janusch.

Manuel Hentrich





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Strukturklebstoffe und deren mechanisches Verhalten</b>	<b>3</b>
2.1	Kleben – ein traditionsreiches Fügeverfahren . . . . .	3
2.2	Klebstoffe und ihr chemischer Aufbau . . . . .	6
2.3	Zustandsbereiche polymerer Klebstoffe . . . . .	10
2.4	Verformungsmechanismen von Polymeren . . . . .	12
2.5	Plastizität und Versagen von Polymeren . . . . .	17
2.6	Die Klebverbindung im Detail . . . . .	19
2.7	Werkstoffphänomene der Strukturklebstoffe . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Versuchskonfigurationen zur Bestimmung von Klebstoffparametern</b>	<b>27</b>
3.1	Mechanische Eigenschaften von Maschinen zur Werkstoffprüfung	29
3.2	Der Zugversuch . . . . .	32
3.3	Der Zugscherversuch . . . . .	38
3.4	Die Doppelrohrprobe . . . . .	45
3.5	T-Peel und bruchmechanische Probekörper . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Konstitutive Gleichungen eines Kohäsivzonenmodells für Klebschichten</b>	<b>53</b>
4.1	Klebschichtmodelle mit Kontinuumselementen . . . . .	54
4.2	Kohäsivzonenelemente . . . . .	59
4.3	Konstitutive Gleichungen des Basismodells . . . . .	61
4.4	Erweiterung des Materialmodells auf geschwindigkeitsabhängiges Verhalten . . . . .	65
4.5	Schädigung und Entfestigung . . . . .	67
4.6	Numerische Aspekte des Materialmodells . . . . .	71
4.7	Ausblick auf Druckbeanspruchungen . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Parameteridentifikation mittels Optimierungsverfahren</b>	<b>75</b>
5.1	Parameteridentifikation mit der Fehlerquadrat-Minimum-Methode	77
5.2	Beginn der Parameteridentifikation auf Basis der Schubversuche .	80
5.3	Die Parameter der Zug-Schub-Asymmetrie . . . . .	84
5.4	Das Entfestigungsverhalten . . . . .	88
5.5	Der identifizierte Parametersatz . . . . .	94

5.6	Verifikation des Parametersatzes anhand der Prüfkörper . . . . .	96
<b>6</b>	<b>Validierung des Klebschichtmodells mittels KSII-Proben</b>	<b>109</b>
6.1	Die experimentelle Konfiguration . . . . .	110
6.2	Modellerstellung und Berechnung mittels der FEM . . . . .	113
6.3	Die quasistatischen Validierungsversuche . . . . .	117
6.4	Die KSII-Probe unter hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit . . .	123
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>131</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Klebertechnik in der Natur: Miesmuscheln und Seepocken nutzen Reaktionsklebstoffe ( <i>links</i> ), Bienen setzen Schmelzklebstoffe zur Wabenkonstruktion ein ( <i>rechts</i> ) . . . . .	4
2.2	Holzarbeiten im alten Ägypten – Ausschnitt aus einem Wandgemälde, um 1470 v. Chr. (Bild: [Sau58]) . . . . .	5
2.3	Polyadditionsreaktion eines Strukturklebstoffs auf Epoxidharz-Basis (aus: [Hab95]) . . . . .	7
2.4	Typische Polymerstrukturen in Klebmaterialien (aus: [Hab06]) . . . . .	8
2.5	Modifizierter Epoxidharzklebstoff mit gummiartigen Füllstoffen (aus: [SB88]) . . . . .	9
2.6	Schematische Darstellung der Mikrobrownschen Bewegungsfreiheitsgrade (aus: [MBB88]) . . . . .	11
2.7	Zusammenhang zwischen Volumen ( <i>oben</i> ) bzw. Wärmeausdehnungskoeffizienten ( <i>unten</i> ) und der Temperatur (aus: [Eis90]) . . . . .	12
2.8	Speicher- und Verlustmodul sowie der Verlustfaktor $\tan(\delta)$ in Abhängigkeit der Temperatur (aus: [Ehr99]) . . . . .	15
2.9	Speichermodul eines Strukturklebstoff auf Epoxidharzbasis (aus: [Dis04]) . . . . .	16
2.10	Schematische Darstellung des Scherfließens ( <i>links</i> ) und der Bildung von Craze ( <i>rechts</i> ) (aus: [Cah98]) . . . . .	17
2.11	Mikroskopische Darstellung des Scherfließens in einer Zugprobe (aus: [Buc77]) . . . . .	18
2.12	Mikroskopische Darstellung der Craze-Bildung (aus: [Ehr99]) . . . . .	19
2.13	Schematische Darstellung der Zähigkeitssteigerung mittels Füllstoffen (aus: [Mic92]) . . . . .	20
2.14	Schematische Darstellung der dominierenden Adhäsionsmechanismen: physikalische Anziehungskräfte ( <i>links</i> ), chemische Bindungen ( <i>mitte</i> ) und mechanische Verklammerung ( <i>rechts</i> ) (aus: [End91]) . . . . .	21
2.15	Spannungs-/Dehnungs- und Schubspannungs-/Gleitungscurve eines zähmodifizierten Strukturklebstoffs bei einachsigen und überlagerten Verformungszuständen (nach [Sch03]) . . . . .	23
2.16	Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines typischen Strukturklebers bei unterschiedlichen Dehnraten (nach [FOS08]) . . . . .	24

3.1	Schematische Darstellung einer Prüfmaschine ( <i>links</i> ) und ein mechanisches Ersatzmodell für die Beanspruchung der Probe ( <i>rechts</i> )	29
3.2	Maschinensteifigkeit einer Prüfmaschine mit einem starren Ersatzprüfkörper (nach [FOS08]) . . . . .	30
3.3	Geometrie der Zugprobe des Typ 1BA nach EN ISO 527-2 . . . . .	32
3.4	Spannungs-Dehnungs-kurven aus Zugversuchen unter einer Dehnrates von $0.02 \text{ sec}^{-1}$ (aus: [FOS08]) . . . . .	33
3.5	Spannungsverteilung einer Zugprobe kurz vor ( <i>oben</i> ) und nach ( <i>unten</i> ) dem erstmaligen Auftreten von Entfestigung . . . . .	34
3.6	Simulativ ermittelte Spannungs-Dehnungs-Verläufe an einer Zugprobe verglichen mit der Vorgabe des Materialmodell bei einer Dehnrates von $70 \text{ sec}^{-1}$ . . . . .	35
3.7	Vergleichsrechnungen der Zugprobe mit unterschiedlichen Diskretisierungen . . . . .	35
3.8	Verschiebungen ( <i>links</i> ) und Probendehnungen ( <i>rechts</i> ) im zeitlichen Verlauf aus einer FEM-Simulation des Prüfmaschinenmodells bei schneller Beanspruchung . . . . .	36
3.9	Gemessener Dehnungs-Zeit-Verlauf bei einem Zugversuch unter einer Dehnrates von $67 \text{ sec}^{-1}$ (aus [FOS08]) . . . . .	37
3.10	Geometrie der Zugscherprobe aus [FOS08] . . . . .	38
3.11	Schubspannungs-Gleitungs-Kurven ermittelt an Zugscherproben unter einer Dehnrates von $\dot{\gamma} = 0.002 \text{ sec}^{-1}$ (aus: [FOS08]) . . . . .	39
3.12	Konturplot der Schubspannungen in der Klebschicht einer Zugscherprobe – seitliche Ansicht ( <i>links</i> ) und ohne zweiten Probekörper ( <i>rechts</i> ) . . . . .	39
3.13	Schubspannungs-Gleitungs-Kurven aus der simulierten Zugscherprobe und der Vorgabe des Materialmodell bei einer Dehnrates von $\dot{\gamma} = 15 \text{ sec}^{-1}$ . . . . .	40
3.14	Simulativ ermittelte Verschiebungen ( <i>links</i> ) und Gleitungen ( <i>rechts</i> ) an einer Zugscherprobe bei einem Prüfmaschinenmodell unter mittelschnellen Dehnrates $\dot{\gamma} = 15 \text{ sec}^{-1}$ . . . . .	41
3.15	Differenz zwischen Traversen- und lokalen Deformationswegen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten . . . . .	42
3.16	Gleitungs-Zeit-Verlauf ( <i>links</i> ) und zugehöriger Schubspannungs-Zeit-Verlauf ( <i>rechts</i> ) eines Zugscherversuchs mit Nenndehnrate $\dot{\gamma} = 100 \text{ sec}^{-1}$ aus [FOS08] . . . . .	43
3.17	Schubspannungs-Gleitungs-verlauf des exemplarischen Zugscherversuchs aus [FOS08] . . . . .	44
3.18	Geometrie der Doppelrohrprobe . . . . .	45
3.19	Ergebnis der Untersuchung aus vier Doppelrohrversuchen unter einer Dehnrates von $\dot{\epsilon} = 0.001$ (aus: [Sch03]) . . . . .	46

3.20	FEM-Simulation eines Sektors der Doppelrohrprobe mit feiner Klebschichtdiskretisierung unter Zugbeanspruchung . . . . .	47
3.21	Geometrie einer Schälzugprobe, wie sie in [FOS08] eingesetzt wird	49
3.22	Kraft-Weg-Verlauf einer langen Schälzugprobe, gemessen in der Einspannung (aus [FOS08]) . . . . .	50
3.23	Vergleichsspannungen in einer Schälzugprobe während des Versuchsverlaufs . . . . .	51
3.24	Gegenüberstellung von berechneten und experimentell ermittelten Kraft-Weg-Verläufen bei niedriger ( <i>links</i> ) und hoher ( <i>rechts</i> ) Geschwindigkeit . . . . .	51
4.1	Querkontraktion innerhalb der Klebschicht unter Zugbeanspruchung	55
4.2	Spannungs-Dehnung-Kurven einer Klebschicht bei unterschiedlicher Elementanzahl über Höhe / Breite . . . . .	56
4.3	Lokalisierungseffekte aufgrund entfestigender Materialeigenschaften	57
4.4	Darstellung eines Kohäsivzonenelmentes als Kubus zwischen den Grenzflächen . . . . .	60
5.1	Schematische Darstellung des Optimierungsprozesses bei der Parameteridentifikation . . . . .	78
5.2	Schubspannungs-Gleitungs-Verläufe aus Doppelrohrversuchen ( <i>links</i> ) und aus Zugscherversuchen ( <i>rechts</i> ) langsamer Dehnrate . . . . .	83
5.3	Gleitungs-Zeit-Verlauf ( <i>links</i> ) und Schubspannungs-Zeit-Verlauf ( <i>rechts</i> ) dreier Zugscherproben unter hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten . . . . .	84
5.4	Spannungs-Dehnungs- ( <i>links</i> ) und Schubspannungs-Gleitungs-Verläufe ( <i>rechts</i> ) für drei exemplarische Doppelrohrversuche . . . . .	85
5.5	Spannungs-Dehnungs-Kennlinien aus Zugversuchen mit niedrigen Dehnraten . . . . .	86
5.6	Dehnungs-Zeit-Verlauf ( <i>links</i> ) und Spannungs-Zeit-Verlauf ( <i>rechts</i> ) zweier Substanzzugversuche bei hohen Dehnraten . . . . .	87
5.7	Gleitungs-Zeit-Verlauf ( <i>links</i> ) von zwei Zugscherproben bei hoher Geschwindigkeit mit zugehörigem Schubspannungs-Zeit-Verlauf ( <i>rechts</i> )	90
5.8	Rechnerisch ermittelter Gleitungs-Zeit-Verlauf an einer Zugscherprobe und Annahme für die Parameteridentifikation . . . . .	91
5.9	Modifikation der Gleitungs-Zeit-Korrelation in den Basisdaten der Optimierung . . . . .	92
5.10	FEM-Modell der Zugscherprobe als Explosionsdarstellung . . . . .	97
5.11	Verifikationsrechnungen der Zugscherprobe unter niedriger ( $\dot{\gamma} = 0.002 \text{ sec}^{-1}$ , <i>links</i> ) und mittlerer ( $\dot{\gamma} = 2 \text{ sec}^{-1}$ , <i>rechts</i> ) Dehnrate . . . . .	98

5.12	Verifikationsrechnungen der Zugscherprobe unter hohen Dehnraten ( $\dot{\gamma} = 15 \text{ sec}^{-1}$ , <i>links</i> und $\dot{\gamma} = 20 \text{ sec}^{-1}$ , <i>rechts</i> ) . . . . .	99
5.13	Vollständiges FEM-Modell der Doppelrohrprobe in der Schnittdarstellung . . . . .	100
5.14	Vereinfachtes Modell der Rohrprobe als Explosionsdarstellung . .	100
5.15	Die Doppelrohrprobe unter reinem Zug ( <i>links</i> ) und unter reiner Torsionsbeanspruchung ( <i>rechts</i> ) . . . . .	101
5.16	Die Doppelrohrprobe unter Normalspannungs-dominierten Beanspruchungszuständen mit $\alpha = 0.33$ ( <i>oben</i> ) und $\alpha = 0.5$ ( <i>unten</i> ) .	102
5.17	Die Doppelrohrprobe unter Schubspannungs-dominierten Beanspruchungszuständen mit $\alpha = 2$ ( <i>oben</i> ) und $\alpha = 3$ ( <i>unten</i> ) . . . .	103
5.18	FEM-Modell des Zugstabs . . . . .	104
5.19	Verifikationsrechnungen an einem Zugstab mit unterschiedlichen Beanspruchungsgeschwindigkeiten . . . . .	105
6.1	Geometrie und Abmessungen des KSII-Probekörpers – seitliche Ansicht ( <i>links</i> ) und Ansicht von vorn ( <i>rechts</i> ) . . . . .	110
6.2	CAD-Modell der eingespannten KSII-Probe . . . . .	111
6.3	Verschiedene Lasteinleitungswinkel $\beta$ mit den zugehörigen Ausrichtungen des Probekörpers . . . . .	112
6.4	Spannungs-Dehnungs-Kennlinien des Stahlmaterials der Fügeteile aus [FOS08] . . . . .	113
6.5	Drei unterschiedliche Diskretisierungen der Fügeteile aus Volumenelementen ( <i>links</i> und <i>Mitte</i> ) und Schalenelementen <i>rechts</i> . .	114
6.6	Randbedingungen des KSII-Modells unter quasistatischer Beanspruchung ( <i>links</i> ) und die gemessenen Federsteifigkeiten ( <i>rechts</i> )	115
6.7	Vorgegebener lokaler Weg-Zeit-Verlauf der KSII-Probe unter dynamischer Beanspruchung . . . . .	117
6.8	Validierungsrechnung und Experiment der KSII-Probe unter quasistatischer Beanspruchung mit $\beta = 0^\circ$ – <i>links</i> : Verlauf von lokalem und Traversenweg, <i>rechts</i> : zugehörige Kraft-Weg-Kurven . .	118
6.9	Kraft-Traversenweg-Kurve von Berechnung und Versuch der quasistatisch beanspruchten Probe unter $\beta = 90^\circ$ . . . . .	119
6.10	Biegeverformungen der KSII-Probe unter einem Lastwinkel $\beta = 90^\circ$ ( <i>links</i> ) und zugehörige Spannungsverteilung in der Klebschicht ( <i>rechts</i> ) . . . . .	120
6.11	Einsetzende Entfestigung der auf Zug beanspruchten Klebschicht	120
6.12	Vergleichsrechnungen zur Kraft-Traversenweg-Kurve unter $\beta = 90^\circ$	121
6.13	Kraft-Traversenweg-Kurven der quasistatisch beanspruchten KSII- Proben unter $\beta = 30^\circ$ ( <i>links</i> ) und unter $\beta = 60^\circ$ . . . . .	122

---

6.14	Lokaler Weg-Zeit-Verlauf ( <i>links</i> ) und zugehöriger Kraft-Weg-Verlauf der schnellen KSII-Versuche unter $\beta = 0^\circ$ . . . . .	124
6.15	Lokaler Weg-Zeit-Verlauf ( <i>links</i> ) und zugehöriger Kraft-Weg-Verlauf der schnellen KSII-Versuche unter $\beta = 90^\circ$ . . . . .	126
6.16	Lokaler Weg-Zeit-Verlauf ( <i>links</i> ) und zugehöriger Kraft-Weg-Verlauf der schnellen KSII-Versuche unter $\beta = 30^\circ$ . . . . .	128
6.17	Lokaler Weg-Zeit-Verlauf ( <i>links</i> ) und zugehöriger Kraft-Weg-Verlauf der schnellen KSII-Versuche unter $\beta = 60^\circ$ . . . . .	129





# Notation

## Lateinische Buchstaben

$a_1, a_2, a_1^*, a_2^*$	Materialparameter der Zug-Schub-Asymmetrie
$b, b_r$	Materialparameter der plastischen Verfestigung
$c_o, c_u$	Ersatzfedersteifigkeiten des Prüfmaschinenmodells
$d_{dev}, d_{vol}$	Materialparameter des Schädigungsmodells
$d_k$	Klebschichtdicke
$E$	Elastizitätsmodul
$F$	Reaktionskraft der Prüfmaschine
$e_v, e_{v,vol}, e_{v,dev}$	Geschichtsvariable des Materialmodells
$e_{vol}, e_{dev}$	Materialparameter des Schädigungsmodells
$e_{r,vol}, e_{r,dev}$	Materialparameter der erweiterten Dehnratenabhängigkeit
$f$	Fehlerquadrat des Optimierungsproblems
$G$	Schubmodul
$H, H_r$	Materialparameter der plastischen Verfestigung
$I_1, I_2'$	Invarianten des Spannungstensors
$I_{1,eff}, I_{2,eff}'$	effektive Invarianten des Schädigungsansatzes
$K$	Kompressionsmodul
$K$	Materialparameter der Ratenabhängigkeit
$M'$	Speichermodul
$M''$	Verlustmodul
$M^*$	komplexer Modul
$m_o, m_u$	Ersatzmassen des Prüfmaschinenmodells
$n$	Materialparameter der Ratenabhängigkeit
$n_{vol}, n_{dev}$	Materialparameter des Schädigungsmodells
$M'$	Speichermodul
$q, q_r$	Materialparameter der plastischen Verfestigung
$R$	Verfestigungsfunktion
$R_e$	Elastizitätsgrenze
$R_m$	Zugfestigkeit
$T$	Temperatur
$t$	Zeit
$u$	Verschiebung
$v$	Prüfgeschwindigkeit

## Notation

---

$W, W_{vol}, W_{dev}$	Schädigungsfunktion
$w_{vol}, w_{dev}$	Materialparameter des Schädigungsmodells
$Y_0$	Fließspannung

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	Beanspruchungsverhältnis, $\alpha = \frac{\gamma}{2\varepsilon}$
$\beta$	Lasteinleitungswinkel der KSII-Probe
$\delta$	Phasenwinkel
$\varepsilon$	Dehnung
$\varepsilon_g, \varepsilon_{g,vol}, \varepsilon_{g,dev}$	Materialparameter der erweiterten Dehnratenabhängigkeit
$\eta$	Viskosität
$\gamma$	Gleitung
$\dot{\lambda}$	plastischer Multiplikator
$\Phi$	Fließfunktion
$\Phi^*$	plastisches Potential
$\rho$	Dichte
$\sigma$	Normalspannung
$\tau$	Schubspannung
$\nu$	Querkontraktionszahl
$\omega$	Frequenz