

Projektskizze

zur Vorlage im Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik,
Sitzung am 18.06.2024

GK.24.5-2

1. Thema

Methodenentwicklung zur Charakterisierung und Simulation der asymmetrisch inelastischen Eigenschaften niedrigmoduliger Klebstoffe (Simulation niedrigmoduliger Klebstoffe)

2. Wissenschaftlich / technische Problemstellung und wirtschaftliche Problemstellung

Insbesondere im (Nutz-)Fahrzeug-, Automobil- und Flugzeugbau, aber auch im Sondermaschinen- und Schienenfahrzeugbau spielt die Klebtechnik eine immer größere Rolle. Ein wichtiger Vorteil ist die Möglichkeit, dass geometrisch komplexe Strukturen einfach verbunden und auftretende Spalte zuverlässig gefüllt werden können. Insgesamt können Bauteilstrukturen dadurch gewichts- und steifigkeitsoptimiert gestaltet werden. Neben den strukturellen und semi-strukturellen Klebstoffen bilden niedrigmodulige Klebstoffe wie Unterfütterungsklebstoffe eine wichtige Gruppe der dabei verwendeten Klebstoffsysteme. Diese Klebstoffe basieren meist auf einer Kautschuk- oder Polyurethan-Basis und zeichnen sich durch relativ geringe Festigkeiten zwischen 0,5 und 3 MPa, hohe Versagensdehnungen von über 200 % und gute Haftungseigenschaften aus [1]. Niedrigmodulige Klebstoffe werden häufig zur Steigerung der Festigkeit und Steifigkeit großflächiger Komponenten eingesetzt, wobei neben der Lastumverteilung auch unerwünschte Schwingungen, Flattern genannt, reduziert werden können [2]. Im Automobilbau werden diese Klebstoffsysteme unter anderem bei Türen, Motorhauben und Heckklappen eingesetzt. Zusätzlich finden sie in den Bereichen des Schienenfahrzeug- und Flugzeugbaus Anwendung. Im industriellen Umfeld werden häufig KMU mit der Konzeptionierung und Auslegung solcher Strukturen beauftragt.

In der Literatur sind wenige Untersuchungen niedrigmoduliger Klebstoffsysteme zu finden. So geben beispielsweise BANEJA und DA SILVA in [3] einen Überblick über das mechanische Verhalten flexibler Klebstoffsysteme bei quasistatischen Zugscher- und Ermüdungsversuchen. Die Eigenschaften unter Druckbelastung hingegen sind bislang kaum untersucht. In den Forschungsvorhaben P 676 [4] und P 828 [5] wurden erste Druckversuche an einem strukturellen 1K-Epoxidharz-Klebstoff mit einer Zugfestigkeit von 30 MPa durchgeführt, wobei erst bei einer Druckspannung von 80 MPa plastisches Fließen beobachtet wurde, was eine massive Asymmetrie der Plastizität zwischen Zug- und Druckbelastung bedeutet.

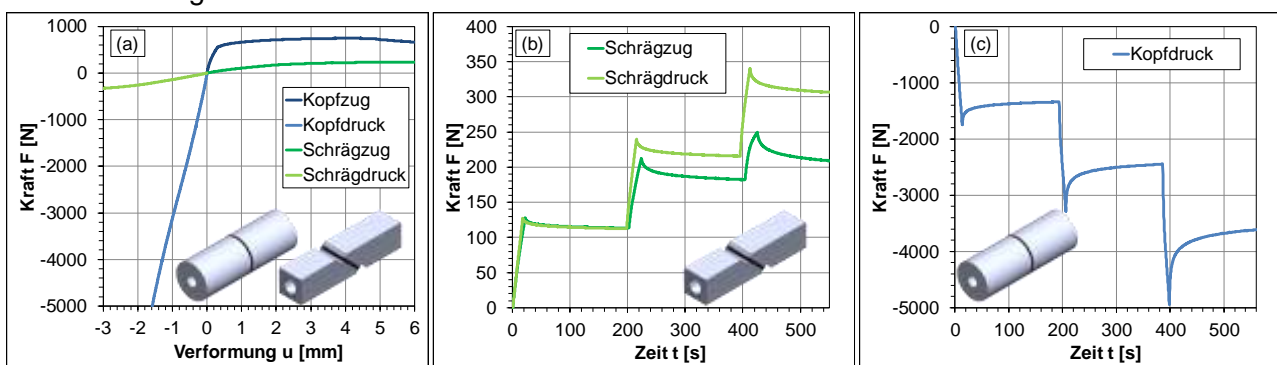


Abbildung 1: Vorversuche an einem Unterfütterungsklebstoff mit (a) quasistatischen Zug- und Druckversuchen, (b) Stufenrelaxationsversuchen im Schrägzug und -druck und (c) im Kopfdruck.

Abbildung 1 zeigt erste Vorversuche an einem beispielhaften Unterfütterungsklebstoff. Bei dem verwendeten Klebstoff handelt es sich um einen 1K-Werkstoff auf Polyurethan-Basis, der als Kleb- und Dichtstoff eingesetzt wird. Für die Kopfzug- und Kopfdruckversuche wurden runde Probenkörper mit einem Durchmesser von 35 mm und für die Schrägzug- und Schrägdruckversuche Probenkörper mit einer quadratischen Klebfläche von 400 mm² mit einer jeweiligen Klebschichtdicke von 4 mm verwendet. Die Ergebnisse der quasistatischen Zug- und Druckversuche in Abbildung 1 (a) weisen auf eine nichtlineare Viskoplastizität mit einer signifikanten Zug-Druck-Asymmetrie hin. Zusätzlich treten extreme Steifigkeitsunterschiede zwischen den Belastungen in Zug/Druck- und Scherrichtung auf, sodass unter anderem das elastische Verhalten eine hohe Abhängigkeit vom

Deformationsmodus aufweist. Weitergehend werden in den Abbildungen 1 (b) nichtlineare isochore und in 1 (c) erhebliche volumetrische Relaxationen deutlich. In Abbildung 1 (b) ist eine Asymmetrie zwischen der Schrägzug- und Schrägdruckbelastung zu erkennen, hier auch für das viskoelastische Verhalten. Weitere Voruntersuchungen haben zudem eine Dehnratenabhängigkeit der Steifigkeiten und Fließspannungen aufgezeigt. Bisher sind weder in kommerziellen FE-Paketen noch in der einschlägigen Literatur [6,7] Materialmodelle implementiert oder veröffentlicht, die das genannte asymmetrische, hochgradig nichtlinear inelastische Verhalten abbilden können, bzw. eine simulationsbasierte Strukturauslegung erlauben. Vorhandene viskohyperelastische Materialmodelle für Klebstoffe [8,9] können insbesondere die in Abbildung 1 (c) dargestellte hohe Ratenabhängigkeit unter Druckbelastung nicht wiedergeben. Auch die starke Asymmetrie des inelastischen Materialverhaltens geht über die Grenzen verfügbarer viskoplastischer Polymermodelle [7] hinaus. Insgesamt zeigt sich, dass den KMU derzeit ein kommerziell erhältliches Materialmodell zur numerischen Abbildung der relevanten Materialeigenschaften niedrigmoduliger Klebstoffe fehlt.

3. Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens bildet die experimentelle Charakterisierung und kontinuumsmechanische Modellierung des asymmetrischen, nichtlinear viskohyperelastisch-viskoplastischen Werkstoffverhaltens niedrigmoduliger Klebstoffe unter Zug- und Druckbelastungen. Dem Arbeitsplan liegt dabei die Forschungshypothese zugrunde, dass das hochgradig nichtlineare Verhalten niedrigmoduliger Klebstoffe mit erheblichen Zug-Druck-Asymmetrien beim plastischen Fließen, stark unterschiedlichen Zug- und Schersteifigkeiten und massiven volumetrischen Relaxationen, experimentell charakterisierbar ist und durch geeignete Materialmodelle abgebildet werden kann. Insbesondere in großflächigen Bauteilen, wie z.B. einer Motorhaube, einer Dachstruktur oder Verkleidungsteilen, werden niedrigmodulige Klebstoffe wie Unterfütterungsklebstoffe eingesetzt. Bislang existiert keine Methodik zur simulationsbasierten Berücksichtigung dieser mechanischen Eigenschaften bei der Bauteilauslegung. Durch die zu erstellende Datenbasis und das Materialmodell werden KMU in die Lage versetzt solche Strukturen auslegen zu können.

Zu Beginn des Projektes wird zusammen mit dem PA eine Auswahl von zu betrachtenden Klebstoffsysteme getroffen. Im AP 1 findet neben einer grundlegenden Charakterisierung der Klebstoffe die Bestimmung des viskoplastischen Limits unter Zug-, Druck- und Scherbelastung statt. Als Probenkörper werden dicke Zugscherproben (Scherbelastung) und modifizierte Kopfbzugproben (Zug- und Druckbelastung) mit einem größeren Durchmesser zur Erhöhung des hydrostatischen Spannungsanteils verwendet. Die Schädigungsgrenze als viskoplastisches Limit wird mittels zyklisch laststeigernden Zug-, Druck- und Scherversuchen ermittelt. Alle weiteren Versuche liegen unterhalb dieser Schädigungsgrenze. Basierend auf diesen Versuchen können die Zug-Druck-Asymmetrien und Abhängigkeiten des Materialverhaltens von der Deformationsart bestimmt werden. Im AP 2 findet, basierend auf Stufenrelaxationsversuchen und zwischen Zug- und Druckbelastung wechselnden zyklischen Prüfungen, die Charakterisierung der Inelastizitäten und isochoren und volumetrischen Relaxationsvorgänge statt. Sowohl in AP 1 als auch in AP 2 wird neben einer quasistatischen auch eine erhöhte Dehnraten berücksichtigt, sodass dehnratenabhängige Steifigkeiten und Fließspannungen in die Untersuchungen mit einfließen.

Basierend auf den Ergebnissen der APs 1 und 2 wird im AP 3 ein kontinuumsmechanisches Materialmodell für die numerische Simulation der Klebschichten entwickelt und in ein kommerzielles FE-Programm (z.B. Abaqus oder LS-Dyna), wie es auch unter anderem von KMU verwendet wird, implementiert. Ausgangspunkt dafür sind bereits am LTM verfügbare Viskoplastizitätsmodelle, wie z.B. das Three-Network-Modell [6] bzw. Parallel-Netzwerkmodelle [7], die aber erheblich hinsichtlich ihrer Struktur (Anzahl und Gestalt der rheologischen Elemente) und Komplexität (Dämpferevolutionen, Fließfunktionen, Asymmetrien) erweitert werden müssen. Die experimentellen Ergebnisse dienen dann nachfolgend der Parameteridentifikation des Modells, wobei das viskohyperelastisch-viskoplastische Materialverhalten mit Zug-Druck-Asymmetrie und signifikanter Abhängigkeit vom Belastungsmodus, sowie die isochoren und volumetrischen Relaxationen u.U. in gestaffelten Prozessen separat voneinander kalibriert werden müssen.

In AP 4 und AP 5 erfolgt die Validierung des Materialmodells anhand des Vergleichs von experimentellen und numerischen Untersuchungen von Schrägzugversuchen. Schrägzugproben

bieten eine Überlagerung der in den APs 1 und 2 geprüften Zug- bzw. Druckbelastungen mit einem Scheranteil, resultierend in einem komplexen, mehrachsigen Spannungszustand. Weitergehend werden Klebstoffzylinder mit Klebschichten analog zu Kopfbzugproben mit Zug- bzw. Drucklasten und einer überlagerten Torsion zur Einbringung eines Scheranteils beaufschlagt. Dies wird durch eine Modifikation der breit erprobten, stumpf geklebten Doppelrohrproben erreicht.

AP 6 beinhaltet die Übertragung der experimentellen Erkenntnisse und des numerischen Materialmodells auf die technologische Probenebene. Zusammen mit dem PA wird eine realitätsnahe Probenstruktur erarbeitet, wie beispielsweise eine Punch-In-Sandwichstruktur. Das Ziel ist die Erzeugung anwendungsnaher, inhomogener Spannungszustände mit überlagerten Zug-, Druck- und Scheranteilen.

Zum Abschluss werden im AP 7 die Ergebnisse in Zwischen- und Abschlussberichten, sowie Veröffentlichungen dokumentiert und die erarbeitete Vorgehensweise zur Simulation dem PA in einem Workshop an Praxisbeispielen demonstriert. Das Arbeitsprogramm besteht aus sieben sich ergänzenden Arbeitspaketen. Eine Übersicht über das methodische Vorgehen in dem Forschungsvorhaben zeigt die Abbildung 2.

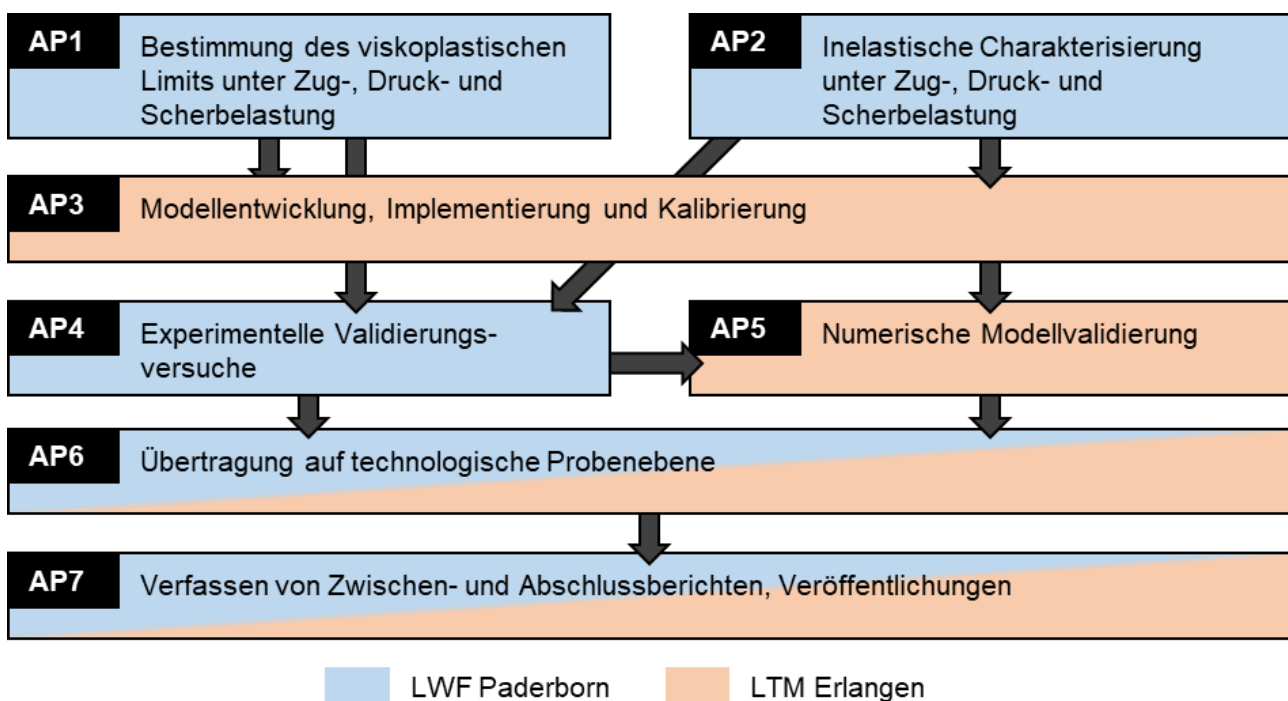


Abbildung 2: Projektablaufdiagramm

4. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Es sind umfangreiche Maßnahmen zum Transfer der Technologieentwicklung in die Wirtschaft während und nach der Projektlaufzeit vorgesehen. Die Ergebnisse werden einem starken Zusammenschluss industrieller Partner, insbesondere KMU, während der gesamten Projektlaufzeit zugänglich gemacht. Hierdurch wird neben einem qualitativen hochwertigen Informationsaustausch auch die direkte Umsetzung der Ergebnisse in die Wirtschaft sichergestellt. Neben der Darstellung der Arbeiten als Forschungsbericht und als Publikationen in Fachzeitschriften, ist eine Aufnahme der Forschungsergebnisse in die akademische Lehre an der Universität Paderborn und der FAU Erlangen-Nürnberg vorgesehen, sodass die Studierenden des Maschinenbaus sich intensiv mit dieser Systematik auseinandersetzen können und in Studien- und Abschlussarbeiten an selbständiges, wissenschaftliches Arbeiten herangeführt werden. Die aus dem Forschungsprojekt erarbeiteten Erkenntnisse werden ferner durch die aktive Mitarbeit der Forschungsstellen auf Weiterbildungs- und Praxisseminaren, Fachtagungen und Messen in die industrielle Praxis übertragen. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse in entsprechende Merkblätter und Normen einfließen. Zum Abschluss des Projektes soll ein Kurzleitfaden über die entwickelte Methodik erstellt werden, der im Rahmen eines Workshops mit interessierten Unternehmen aus dem PA an ausgewählten Praxisbeispielen erprobt wird.

5. Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Im Bereich des Automobil-, Fahrzeug- und Schienenfahrzeugbaus sowie in der Bauindustrie sind vor allem kleine und mittlere Unternehmen (KMU) vertreten. Diese Unternehmen zeichnen sich unter anderem durch Dienstleistungen wie die Konzeptionierung und Auslegung einzelner Bauteilgruppen aus. In diesem Rahmen muss sichergestellt werden, dass die Produkte unter den Betriebsbedingungen des Endprodukts einwandfrei funktionieren. Eine Bewertung der in den Klebschichten vorliegenden Beanspruchungen, basierend auf den äußeren Betriebsbedingungen und Bauteilgeometrien, stellt eine große Herausforderung dar. Besonders KMU besitzen häufig nicht die personellen sowie finanziellen Mittel für umfangreiche und zeitintensive Forschung. Die Erstellung numerischer Modelle zur Berechnung des Materialverhaltens unter gegebenen Lasten werden oft von den OEMs in Ingenieurbüros ausgelagert, die häufig zur Gruppe der KMU gehören. Um den KMU branchenübergreifend eine kosteneffiziente und einfach anzuwendende Auslegung von niedrigmoduligen Unterfütterungs- und Dichtklebstoffen unter Zug- und Druckbelastungen inklusive des inelastischen Bereichs zu ermöglichen, wird im Rahmen dieses Projekts eine experimentelle Versuchsmethodik zur Untersuchung der relevanten Materialeigenschaften der Klebstoffsysteme erarbeitet. Darauf aufbauend wird ein Materialmodell implementiert und kalibriert, das sowohl die vorliegende nichtlineare Viskoplastizität mit Zug-Druck-Asymmetrie, als auch die dehnraten- und deformationsmodeabhängigen Steifigkeiten und Fließspannungen numerisch abbilden kann. Die geschaffene Datenbasis und das erstellte Materialmodell ermöglichen eine schnelle und kostengünstige Abschätzung der Materialeigenschaften und ihrer Auswirkungen auf Bauteileigenschaften bereits in der frühen Entwicklungsphase. Der sich daraus ergebende sichere und kalkulierbare Einsatz der Klebtechnik ermöglicht es den KMU, komplexe Bauteile auf die vorliegenden Beanspruchungen auszulegen und bietet einen Wettbewerbsvorteil gegenüber international konkurrierenden Unternehmen.

6. Projektvolumen / Personaleinsatz / Projektlaufzeit

Tabelle 1: Zeitlicher Projektablauf

AP	Arbeitsschritte	1. Laufzeitjahr				2. Laufzeitjahr				3. Laufzeitjahr	
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
1	Bestimmung des viskoplastischen Limits unter Zug-, Druck- und Scherbelastung										
2	Inelastische Charakterisierung unter Zug-, Druck- und Scherbelastung										
3	Modellentwicklung, Implementierung und Kalibrierung										
4	Experimentelle Validierungsversuche										
5	Numerische Modellvalidierung										
6	Übertragung auf technologische Probenebene										
7	Verfassung von Zwischen- und Abschlussberichten, Veröffentlichungen										
Gesamtlaufzeit des Forschungsvorhabens: 30 Monate; Kosten: ca. 490.000 €											

LWF Paderborn

LTM Erlangen

An der Durchführung des Forschungsvorhabens werden zwei Forschungsstellen mit ihren jeweiligen wissenschaftlichen Mitarbeitenden, ihrem technischen Personal und ihren studentischen Hilfskräften beteiligt sein. Die Umsetzung soll dabei innerhalb einer Projektlaufzeit von 30 Monaten erfolgen. Zur Durchführung des Forschungsprojektes werden Mittel in Höhe von ca. 490.000 € benötigt. Die Organisation des Forschungsvorhabens verantwortet der Projektleiter am Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF). Die Bearbeitung des Projekts durch die beiden Forschungsstellen ist in der Komplexität der Problemstellung begründet, die zunächst auf der Versuchsseite erfasst werden muss. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die anschließende Modellierung, Kalibrierung und Simulation. Daher sollen die experimentellen Arbeitspakete am LWF bearbeitet werden, während der LTM die Modellierung und Simulation übernimmt. Die



interdisziplinäre Zusammenarbeit hat sich bereits in zahlreichen gemeinsamen Projekten bewährt. Das übergeordnete Forschungsziel soll mit den in Tabelle 1 dargestellten Arbeitsschritten erreicht werden.

7. Geplante Zusammensetzung des PA

Altair Engineering GmbH, Audi AG, Marelli Automotive Lighting Reutlingen GmbH, DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA, DuPont Speciality Products GmbH & Co. KG, Ford-Werke GmbH, Robert Bosch GmbH, Sika Automotive AG, tesa SE, Volkswagen AG

Neben den aufgeführten Zusagen sind weitere Unternehmen aus den Branchen Automobilindustrie, Anlagenbau, Klebstoffberechnung, Klebstoffherstellung, Ingenieurdienstleistung und Anwendung angefragt.

8. Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1

Universität Paderborn, Fakultät Maschinenbau, Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF), Pohlweg 47-49, 33098 Paderborn, Tel.: 05251-60-3031, Fax.: 05251-60-3239, schaefers@lwf.uni-paderborn.de (Sekretariat), www.lwf.upb.de

Leitung der Forschungseinrichtung:

Meschut, Gerson, Prof. Dr.-Ing., Tel.: 05251-60-3031, Fax.: 05251-60-3239, schaefers@lwf.uni-paderborn.de (Sekretariat)

Projektleitung: Beule, Felix, M. Sc., Tel.: 05251-60-3036, Fax.: 05251-60-3239, felix.beule@lwf.upb.de

Genehmigt durch den FS-Leiter:
Paderborn, 12.04.2024

Forschungseinrichtung 2

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Fachbereich Maschinenbau, Lehrstuhl für Technische Mechanik (LTM), Egerlandstraße 5, 91058 Erlangen, Tel.: 09131-85-28502, julia.deserno@fau.de, www.ltm.fau.de

Leitung der Forschungseinrichtung:

Steinmann, Paul, Prof. Dr.-Ing. habil., Tel.: 09131-85-28502, julia.deserno@fau.de (Sekretariat)

Projektleitung: Mergheim, Julia, Prof. Dr.-Ing., Tel.: 09131-85-28505, julia.mergheim@fau.de

Genehmigt durch den FS-Leiter:
Erlangen, 12.04.2024

Literatur:

- [1] K. Dilger, „Automobiles“ in *Adhesive Bonding*, Elsevier, 2021, S. 605–635, doi: 10.1016/B978-0-12-819954-1.00018-6, ISBN: 9780128199541.
- [2] T. Reincke et al., „Transportwesen und allgemeine Industrieanwendungen“ in *Kunststoffe erfolgreich kleben*, Springer Vieweg, 2018, S. 233–311, doi: 10.1007/978-3-658-18445-2_8, ISBN: 978-3-658-18445-2.
- [3] M. D. Banea, L. F. M. da Silva, „Mechanical Characterization of Flexible Adhesives“ in *The Journal of Adhesion*, Taylor and Francis Group, 2009, S. 261-285, doi: 10.1080/00218460902881808.
- [4] M. Brede et al., „Methodenentwicklung zur Berechnung von höherfesten Stahlklebverbindungen des Fahrzeugbaus unter Crashbelastung“ in *Forschung für die Praxis*, Bd. 676, FOSTA, 2008, ISBN: 3-937567-64-X.
- [5] M. Brede et al., „Robustheit und Zuverlässigkeit der Berechnungsmethoden von Klebverbindungen mit hochfesten Stahlblechen unter Crashbedingung“ in *Forschung für die Praxis*, Bd. 828, FOSTA, 2016, ISBN: 978-3-96780-124-8.
- [6] P. Steinmann, M. Hossain, G. Possart, „Hyperelastic models for rubber-like materials: consistent tangent operators and suitability for Treloar's data“ in *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 82, 2012, S. 1183-1217, doi: 10.1007/s00419-012-0610-z
- [7] J.S. Bergström, *Mechanics of Solid Polymers*, Elsevier, 2015, ISBN: 9780323311502
- [8] S. Reese, S. Govindjee, „A theory of finite viscoelasticity and numerical aspects“ in *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 35(26-27), 1998, S. 3455-3482, doi: 10.1016/S0020-7683(97)00217-5
- [9] J.S. Bergström, J.E. Bischoff, „An Advanced Thermomechanical Constitutive Model for UHMWPE“ in *International Journal of Structural Changes in Solids – Mechanics and Applications*, Vol. 2(1), 2010, S. 31-39.