TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Leichtbau

**Charakterisierung des dynamischen Versagensverhaltens
von Kunststoffkomponenten im Fußgängerschutz von
Fahrzeugen**

Holger Silvan Günter Staack

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Lienkamp

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Baier
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Drechsler

Die Dissertation wurde am 01.04.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 07.10.2016 angenommen.

Berichte aus dem Maschinenbau

Holger Staack

**Charakterisierung des dynamischen Versagens-
verhaltens von Kunststoffkomponenten im
Fußgängerschutz von Fahrzeugen**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: München, Techn. Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5051-6

ISSN 0945-0874

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die Arbeit entstand im Rahmen eines INI.TUM Projektes in Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Leichtbau der Technischen Universität München und der Abteilung „Entwicklung Partnerschutz“ der AUDI AG in Ingolstadt.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Baier für die Betreuung dieser Arbeit. Seine wertvollen Ratschläge und nicht zuletzt die mir von ihm gewährte wissenschaftliche Freiheit ermöglichte es mir, meine Arbeit erfolgreich fertig zu stellen.

Meinen fachlichen Betreuern bei Audi, Herrn Dr.-Ing. Dominic Seibert und Herrn Dr.-Ing. Andreas Koukal, gebührt Dank für unzählige fachliche Diskussionen, Gespräche und Ratschläge. Ihre kompetente und umsichtige Unterstützung gab meiner Arbeit viele Male den entscheidenden Impuls in die richtige Richtung.

Bei den Mitarbeitern der Abteilung Partnerschutz, allen ungenannten Kollegen der AUDI AG, sowie den Kollegen des Lehrstuhls für Leichtbau, möchte ich mich für die große Hilfsbereitschaft und angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken.

Herrn Dr.-Ing. Lars Greve von der VW-Konzernforschung und Herrn Peter Reithofer von der 4a engineering GmbH möchte ich auf diesem Wege für die bemerkenswerte Zusammenarbeit im Bereich Material- und Versagensmodellierung und die vielen horizonterweiternden Gespräche danken.

Anteil an der Promotion und mein Dank gebührt außerdem allen Studenten, die ich im Rahmen von Abschlussarbeiten und Praktika betreuen durfte.

Meinen Eltern und meinem Bruder obliegt der allergrößte Dank für ihre immerwährende Liebe, ihr bedingungsloses Zutrauen und ihre stete Unterstützung.

München, 30.03.2016

Holger Staack

Abstract

To capture dynamic material failure in pedestrian protection polymer components, a modeling approach is developed. Upon the examination of failure behavior of PC-PET, a plastic strain failure model determined by calculated stress state and strain rate is established. The model parameters are thereby derived from experiments and, thereafter, applied in transient failure simulations. Their correlation with transient component tests by pedestrian protection impactors revealed a proper representation of technical reality.

Kurzfassung

Es wird ein Simulationsmodell für dynamisches Werkstoffversagen in Kunststoffkomponenten des automobilen Fußgängerschutzes (FGS) entwickelt und validiert. Das Bruchverhalten von PC-PET wird untersucht und ein Versagensmodell abgeleitet, das eine plastische Bruchdehnung als Funktion von Spannungszustand und Dehnrates berechnet. Nach experimenteller Parameterbestimmung erfolgen dynamische Versagenssimulationen und deren erfolgreiche Korrelation mit transienten FGS-Impaktorversuchen an Kunststoffkomponenten.

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	IX
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung	2
1.3. Aufbau der Arbeit	3
2. Grundlagen	5
2.1. Thermoplastische Kunststoffe	5
2.1.1. Kunststoffe im Fußgängerschutz	6
2.1.2. Versagensvorgänge in Kunststoffen	7
2.2. Kontinuumsmechanik zur Werkstoffmodellierung	8
2.2.1. Dehnung und Dehnrate	9
2.2.2. Spannung und abgeleitete Größen	12
2.3. Anmerkungen zur Schalentheorie in der FEM	15
2.4. Modellierung mechanischen Werkstoffverhaltens	16
2.4.1. Modellierung des mechanischen Verhaltens von Kunststoffen	17
2.4.2. Mechanische Werkstoffmodelle für Kunststoffe (Übersicht)	17
2.5. Bruchmechanik und Versagensmodelle	18
2.5.1. Bruchinitiierung, Risswachstum und Versagen	18
2.5.2. Versagensmodelle und -kriterien	19
3. Untersuchung von Kunststoffversagen im Fußgängerschutz	25
3.1. Anforderungen an die Versagensmodellierung im Fußgängerschutz	25
3.2. Komponentenprüfstände zur detaillierten Bruchuntersuchung	26
3.2.1. Entwicklung und Aufbau der Komponentenprüfstände	26
3.2.2. Komponentenversuche zur Bruchuntersuchung	29
3.3. Optische Untersuchung von Bruchoberflächen aus Komponentenversuchen	32
3.4. Simulative Analyse der Komponentenversuche	34
3.5. Zusammenfassung und Diskussion	35
4. Charakterisierung des mechanischen Verhaltens von PC-PET	37
4.1. Versuche zur Werkstoffcharakterisierung	38
4.1.1. Klassische Materialversuche	38
4.1.2. Pendelversuche	43
4.2. Material- und Bruchverhalten PC-PET	48
4.2.1. Untersuchung des mechanischen Werkstoffverhaltens von PC-PET	48
4.2.2. Bestimmung des Bruchverhaltens von PC-PET	50
4.3. Verwendbarkeit und Bewertung unterschiedlicher Versuchsarten für die Werkstoffcharakterisierung	53
4.4. Zusammenfassung und Diskussion	57
5. Modellierung von Werkstoffmechanik und -versagen für PC-PET	59
5.1. Entwicklungsumgebung Modulares Materialmodell (MMM)	59
5.2. Modellierung von Elastizität, Plastizität und Schädigung	60

5.2.1.	Grundlagen und spezifische Annahmen für die Modellierung des mechanischen Verhaltens	60
5.2.2.	Bestimmung von Werkstoffparametern aus Versuchsdaten	61
5.2.3.	Bestimmung mechanischer Werkstoffparameter für PC-PET	62
5.3.	Modellierung von Werkstoffversagen	64
5.3.1.	Berücksichtigung von anwendungsbezogenen Anforderungen im Modellierungsansatz	64
5.3.2.	Auf Voruntersuchungen basierende Annahmen zur Versagensmodellierung	65
5.3.3.	Versagensmodell nach Johnson-Cook	65
5.3.4.	Versagensmodell nach Bai-Wierzbicki und dessen Modifikation	66
5.3.5.	Versagensmodell nach Cockroft-Latham	68
5.3.6.	Zusammenfassung und Diskussion	69
6.	Parametrisierung und Parameterbestimmung von Versagensmodellen am Bei- spiel PC-PET	71
6.1.	Simulative Bestimmung von Bruchdehnungen, Dehnraten und Mehrachsigkeiten	72
6.2.	Numerische Optimierung zur Bestimmung von Versagensparametern	72
6.3.	Ermittlung der Bruchparameter für das modifizierte Versagensmodell nach Bai-Wierzbicki	75
6.4.	Methodik zur Parameterbestimmung für das Bruchmodell nach Cockroft-Latham	78
6.5.	Abhängigkeit von Versagensmodellierung und konstitutivem Werkstoffmodell	79
6.6.	Zusammenfassung und Diskussion	81
7.	Validierung des modifizierten Versagensmodells nach Bai-Wierzbicki	83
7.1.	Validierung auf Probenebene	83
7.1.1.	Probenebene Parameterbestimmung	83
7.1.2.	Probenebene Validierungsversuch	84
7.2.	Validierung mit Fahrzeugkomponenten	86
7.3.	Zusammenfassung und Diskussion	90
8.	Diskussion	93
8.1.	Praxisrelevanz der Bruchsimulation für die Fahrzeugsicherheit	95
8.2.	Integrationsstrategien für Bruchsimulation in industriellen Anwendungen . .	97
9.	Zusammenfassung und Ausblick	99
9.1.	Zusammenfassung	99
9.2.	Ausblick	101
A.	Literaturverzeichnis	103