



Manuel Roth

Zur Berechnung von Bauteilen in hybrider Bauweise unter ballistischer Beanspruchung

Hybrid structures under ballistic loading

Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen

Band 48

Institutsreihe zu Fortschritten bei Mechanik, Werkstoffen, Konstruktionen, Gebäudehüllen und Tragwerken.

Manuel Roth

Zur Berechnung von Bauteilen in hybrider Bauweise unter ballistischer Beanspruchung

Hybrid structures under ballistic loading

Manuel Roth
Institut für Mechanik und Materialforschung
Technische Hochschule Mittelhessen
Germany

Vom Fachbereich 13 – Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von

Manuel Roth, M.Sc.

aus Mannheim

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider
Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Kolling

Tag der Einreichung: 26.08.2016

Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2016

Darmstadt 2016

D17

Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen
ISBN 978-3-662-54685-7 ISBN 978-3-662-54686-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-54686-4

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanik und Materialforschung der Technischen Hochschule Mittelhessen, Gießen, in Kooperation mit der Technischen Universität Darmstadt. Das Forschungsprojekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) unter der Projektnummer KF2178002 gefördert.

Daher gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Kolling für die Antragstellung sowie die Betreuung der Arbeit. Während der Zeit an seinem Institut konnte ich zahlreiche Einblicke in die Modellierung verschiedenster Werkstoffe erhalten und mich persönlich weiterentwickeln.

Außerdem danke ich Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider der Technischen Universität Darmstadt für die stets freundliche Unterstützung sowie Begutachtung der Arbeit.

Außerordentlicher Dank gilt meinen beiden Kollegen Andreas Rühl und Christian Alter, die ihre Arbeiten im gleichen Zeitraum am IMM abgeschlossen haben. Auch bei den Kollegen Michael Neubert sowie Lothar Pfeil bedanke ich mich für die Bereitstellung von Versuchs- und Messtechnik am Fachbereich sowie Unterstützung bei der Versuchsdurchführung.

Bei Peter Reithofer der Firma 4a Engineering, Traboch, Österreich, bedanke ich mich für die Unterstützung durch Diskussion und Softwarebereitstellung zur Modellierung von glasfaserverstärkten Werkstoffen.

Mein Dank gilt auch der Abteilung Forschung, Transfer und wissenschaftlicher Nachwuchs der THM in Person von Dr. Bärbel Grieb für das Management des ZIM-Projekts sowie die Unterstützung im Rahmen der strukturierten Doktorandenausbildung.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Frau Verena, die mich immer wieder liebevoll an die richtige Priorisierung meiner Interessen erinnert hat.

Darmstadt, im August 2016

Manuel Roth

Kurzfassung

Das mechanische Verhalten von metallischen Werkstoffen unter hohen Dehnraten wurde in der Vergangenheit vielfach erforscht und diskutiert. Für thermoplastische und duroplastische Polymere ergeben sich weiterhin offene Fragen.

Die vorliegende Arbeit stellt Untersuchungen vor, die sich mit dem Widerstand unterschiedlicher Werkstoffe gegen ballistische Bedrohungen befassen. Die Werkstoffe werden anhand ihres Verhaltens als dünnes Ziel bewertet. Die Ziele werden durchschossen und die Restgeschwindigkeit sowie die Kraftantwort an einer im Versuchsaufbau rückseitig angebrachten Lagerung gemessen.

Die wissenschaftliche Fragestellung der Untersuchung ist, wie sich nicht-metallische Ersatzwerkstoffe unter ballistischer Belastung im Vergleich zu metallischen Werkstoffen verhalten, und wie die Werkstoffe ihre Schutzleistung im hybriden Schichtaufbau steigern. Als Referenzwerkstoffe werden Vergleichsmessungen mit dem Panzerstahl Armox 440T und der Aluminiumlegierung AA7020-T651 durchgeführt. Thermoplastische Werkstoffe werden durch das Polycarbonat Makrolon GP repräsentiert. Als Variante eines faserverstärkten Verbundwerkstoffs werden Untersuchungen anhand von DuroProtect 5000 durchgeführt. Zur systematischen Charakterisierung der Materialien werden quasistatische und dynamische Zugversuche, Drei-Punkt-Biegeversuche und Durchstoßversuche unter dem Einfluss einer definierten Umgebungstemperatur herangezogen.

Die Versuchskonfiguration wird mit Hilfe der numerischen Simulation optimiert und die durchgeführten ballistischen Versuche für weitergehende Geschwindigkeitsbereiche ausgewertet. Zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens unter hohem hydrostatischen Druck werden Kennwerte aus der Literatur verwendet. Insgesamt können die ermittelten Werkstoffparameter genutzt werden, um die Materialien unter ballistischer Belastung zu beschreiben.

In einer abschließenden Diskussion werden die experimentellen und simulativen Ergebnisse aller Werkstoffe gegenüber gestellt und die Effektivität bewertet. Eine Steigerung der Schutzleistung konnte experimentell gezeigt und numerisch abgebildet werden. Die Ergebnisse sind geeignet, weitere Versuche zu konzipieren und einen Schutzaufbau mit gesteigertem Widerstandsgrad zu entwickeln.

Abstract

The mechanical behavior of metallic materials under high strain rates has been investigated and discussed extensively in the past. For thermoplastic polymers and thermosets there remain still some open questions.

This work presents investigations dealing with the resistance of different materials to ballistic threats. The materials are studied as thin targets, classified by their behavior of complete perforation. The targets are penetrated by the projectile and the residual velocity as well as the force response are measured on a bearing mounted on the backside of the test setup.

The scientific question of the investigation is: how do non-metallic substitute materials perform under ballistic loading in comparison to metallic materials, and how does the protection performance of the materials increase in a hybrid layer configuration? The reference materials used are the armour steel Armox 440T and the aluminum alloy AA7020-T651. Thermoplastic materials are represented by the polycarbonate Makrolon GP. As a variant of a fiber-reinforced composite material, investigations are carried out using DuroProtect 5000. For the systematic characterization of the materials, quasistatic and dynamic tensile tests, three-point bending tests and punch tests are used under the influence of different ambient temperatures.

The experimental configuration is optimized with the help of the numerical simulation. To describe the material behavior under high hydrostatic pressure, characteristic values from the literature are used. Overall, the determined material parameters can be used to describe the materials under ballistic loading.

In a concluding discussion, the experimental results and the results of the numerical simulation for all materials are compared and the effectiveness is assessed. An increase in the protection performance could be shown experimentally and numerically. The results are suitable for designing further tests and for developing a protective structure with an increased performance.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xvii
1 Einführung	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Spannungen, Verzerrungen und Konstitutivgesetz	3
2.1.1 Uniaxialer Spannungszustand	10
2.1.2 Uniaxialer Dehnungszustand	14
2.1.3 Nichtlineare Zustandsgleichung für Feststoffe	15
2.2 Wellenausbreitung und Stoßwellen	20
2.3 Faserverbundwerkstoffe	25
3 Stand von Forschung und Technik	27
3.1 Schutzsysteme	27
3.2 Analytische Methoden	28
3.3 Numerische Methoden	32
3.3.1 Materialmodelle zur Stoßwellenbeschreibung	33
3.3.2 Materialmodelle zur Beschreibung anisotroper Werkstoffe	35
4 Modellsystem	37
4.1 Kriterien der Werkstoffauswahl	37
4.2 Konzeptentwicklung für die ballistischen Versuche	39
4.3 Beschreibung des numerischen Modells	46
4.4 Netzkonvergenzstudie	47
5 Untersuchungen zu Panzerstahl Armox 440T	51
5.1 Allgemeines	51
5.2 Experimentelle Untersuchungen	53
5.3 Numerische Untersuchungen	54
6 Untersuchungen zu Aluminium AA7020-T651	61
6.1 Allgemeines	61

6.2	Literatur	63
6.3	Experimentelle Untersuchungen	65
6.3.1	Zugversuche	65
6.3.2	Drei-Punkt-Biegeversuche	67
6.3.3	Durchstoßversuche	69
6.3.4	FSP-Beschussversuche	71
6.4	Numerische Untersuchungen	73
7	Untersuchungen zu Polycarbonat Makrolon GP	83
7.1	Allgemeines	83
7.2	Literatur	84
7.3	Experimentelle Untersuchungen	86
7.3.1	Zugversuche	86
7.3.2	Drei-Punkt-Biegeversuche	88
7.3.3	Durchstoßversuche	90
7.3.4	FSP-Beschussversuche	93
7.4	Numerische Untersuchungen	97
8	Untersuchungen zu DuroProtect 5000	111
8.1	Allgemeines	111
8.2	Literatur	113
8.3	Experimentelle Untersuchungen	114
8.3.1	Drei-Punkt-Biegeversuche	114
8.3.2	Durchstoßversuche	117
8.3.3	FSP-Beschussversuche	118
8.4	Numerische Untersuchungen	121
9	Vergleich der Werkstoffe unter FSP-Beschuss	133
10	Zusammenfassung und Ausblick	141
	Literaturverzeichnis	143

Symbolverzeichnis

Elastizität

E	Elastizitätsmodul
e	Energie
F	Kraft
G	Schubmodul
I_i	Invariante des Spannungstensors
J_i	Invariante des Spannungsdeviators
J	rel. Volumen
K	Kompressionsmodul
m	Masse
p	Druck
t	Zeit
V	Volumen
x	Ort
ε_v	vol. Dehnung
κ	Mehrachsigkeit
ν	Querkontraktionszahl
ρ	Dichte
σ_{VM}	Vergleichsspannung
$\mathbf{1}$	Einheitstensor
\mathbf{E}	Green-Lagrange Verzerrungstensor
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Verzerrungstensor
\mathbf{F}	Deformationsgradient
\mathbf{H}	Verschiebungsgradient

\mathbf{s}	Spannungsdeviator
$\boldsymbol{\sigma}$	Spannungstensor
$\underline{\mathbf{C}}$	Elastizitätstensor

Plastizität

A_5	Bruchdehnung, $k = 5$
A_{50}	Bruchdehnung, $k = 50$
D	Schädigung
E_T	Tangentenmodul
H	Schmachtenberg-H
k	Geometrieverhältnis
m	Formparameter
n	Schädigungsexponent
R_m	Zugfestigkeit
R_{p02}	0.2% Dehngrenze
ν_p	Viskositätsparameter
ε_f	Versagensdehnung
$\dot{\varepsilon}$	Dehnrage
σ_y	Fließgrenze

Schutztechnik

A	Fläche
a	LJ-Parameter
E_M	Masseneffektivität
fg	Flächengewicht
p	LJ-Parameter
r	Radius
t	Plattendicke
TE	Dickeneffektivität
v_{50}	Grenzgeschwindigkeit
ϑ	Effektivität

Thermodynamik

c_v	vol. Wärmekapazität
α	lin. Wärmeausdehnungskoeffizient
α_v	vol. Wärmeausdehnungskoeffizient
λ	Wärmeleitfähigkeit

Verbundwerkstoffe

E_P	E-Modul parallel
f	Fasergehalt
K_c	Schlagzähigkeit parallel
S_L	Schubfestigkeit
X_c	Druckfestigkeit parallel
X_t	Zugfestigkeit parallel
Y_c	Druckfestigkeit senkrecht
Y_t	Zugfestigkeit senkrecht
σ_f	Versagensspannung

Wellenmechanik

a	Grüneisen-Korrekturfaktor
C	Wellengeschwindigkeit
S_i	Formfaktor
U_i	Geschwindigkeit
Z_i	Impedanz
γ_0	Grüneisen-Gamma
μ	Volumetrischer Parameter

Abkürzungsverzeichnis

AA	Aluminium Alloy	HL	Hohlladung
biax	biaxial	HRC	Härte nach Rockwell
BZ	Becker-Zugstab	HS	High-Speed
CS	Cowper-Symonds	HU	Halb-Unendliches Ziel
DIN	Deutsche Industrie Norm	IED	improvised explosive device
DMA	Dynamisch-Mechanische Analyse	JC	Johnson-Cook
DMS	Dehnungsmessstreifen	LASL	Los Alamos Shock Laboratory
DP	DuroProtect	lin	linear
EFP	Explosively Formed Projectile	LJ	Lambert-Jonas
elast	elastisch	MOUT	Military Operations in Urban Terrain
EN	Europäische Norm	NATO	North Atlantic Treaty Organization
EOS	Equation of State	nlin	nicht-linear
EP	Epoxidharz	PA	Polyamid
FEM	Finite-Element-Methode	PBT	Polybutylenterephthalat
FSP	Fragment Simulating Projectile	PC	Polycarbonat
GF	Glasfaserverstärkt	PE	Polyethylen
GOM	Gesellschaft für optische Messtechnik	perf	perfekt
HBW	Härte nach Brinell	PF	Phenolharz
HEL	Hugoniot Elastic Limit	plast	plastisch

PMMA	Polymethylmetacrylat	sym	symmetrisch
POM	Polyoxymethylen		
PP	Polypropylen	UD	unidirektional
PPI	Planar-Platten Impakt Test	UP	Polyesterharz
PVC	Polyvinylchlorid	USBV	Unkonventionelle Spreng- und Brandvorrichtung
Pz	Panzer		
RHA	rolled homogeneous armor		
RI	Recht-Ipson	VE	Vinylesterharz

1 Einführung

Das Verhalten von metallischen Werkstoffe unter dynamischer Belastung wurde bereits vielfältig untersucht und erforscht. Es liegen umfangreiche Ergebnisse zu verschiedenen Legierungen unter den unterschiedlichsten Beanspruchungsarten vor. Dabei wurden die einzelnen Ergebnisse zahlreich bewertet und in der Literatur diskutiert. Als Beispiel für den Einsatz von Materialien unter einer Belastung mit hohen Dehnraten sei der Schutzaufbau gegen ballistische Bedrohungen an der äußeren Struktur eines gepanzerten Fahrzeugs genannt.

Bei einem solchen Schutzaufbau steht das Ziel, die Bedrohung für die Insassen unschädlich zu machen, im Vordergrund. Um dieses Ziel zu erreichen ist zu bedenken, dass die Wirkmechanismen von Bedrohung zu Bedrohung sehr unterschiedlich sein können. So kann die Belastung mit einem spitzen Gegenstand zu einem lateralen Auseinanderschleiben der Werkstoffstruktur führen, während ein stumpfer Gegenstand zu einem Stapeln der Struktur führt. Ein Schutzaufbau muss daher so gestaltet sein, dass polyvalent gegen verschiedene Wirkmechanismen geschützt werden kann. Dabei bringen die unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Werkstoffe Vorteile. Ein hybrider Schutzaufbau, bestehend aus mehreren Schichten verschiedener Werkstoffe, kann die polyvalente Schutzfunktion am Besten erreichen.

Als Ergänzung zu metallischen Werkstoffen kommen thermoplastische und duroplastische Polymere in Betracht. Im polyvalenten Schutz übernehmen sie andere Aufgaben als metallische Werkstoffe und beinhalten ein Leichtbau-Potential. Gleichzeitig sind fundierte Erfahrungen im Umgang mit Polymeren vorhanden, was den Einstieg in die Technologie dieser Werkstoffe erleichtert. Teilweise sind technische Polymere teurer als Stahl. Der Einsatz von Polymeren als Ersatzwerkstoff ist also vor allem dann begründet, wenn die Gewichtseinsparung zusätzlich eine bessere Schutzperformance mit sich bringt und man dadurch technisch einen alternativlosen Vorteil erreicht. Dies trifft zum Beispiel auf Anwendungen im Bereich der Luft- und Raumfahrt zu. Außerdem sind transparente Thermoplaste notwendig für die Entwicklung von transparentem Schutz in Kombination mit Glas.

Das Verhalten von thermoplastischen und duroplastischen Polymeren unter dem Einfluss hoher Verformungsgeschwindigkeiten ist ein aktuelles Forschungsfeld. Dabei steht die Frage im Vordergrund, wie sich diese Werkstoffe im Vergleich zu metallischen Legierungen verhalten. Können Polymere einen nennenswerten Beitrag in einem Schutzaufbau leisten? Wie verhält sich der Werkstoffe aufgrund einer Änderung der Dicke? Wie sieht das

Zusammenspiel der Ersatzwerkstoffe mit metallischen Werkstoffen aus? Bringen hybride Bauweisen einen Performancevorteil?

Die numerische Beschreibung der Ersatzwerkstoffe unter hohen Dehnraten ist ebenfalls Gegenstand aktueller Forschungen. Dabei steht die Betrachtung der Werkstoffe mit der Finiten Elemente Methode im Vordergrund. Modelle zum Abbilden der beobachteten Mechanismen sind aktuell in der Entwicklung. Eine zentrale Frage der Arbeit ist, wie die Charakterisierung der Werkstoffe erfolgen muss und welche Modelle zur Beschreibung des Verhaltens geeignet sind. Dabei wird auch das anisotrope Verhalten von duroplastischen Polymeren diskutiert.