

Reimar Unger  
Messsystem zur Charakterisierung textiler Hochleistungsfaserstoffe  
bei hohen Dehnraten

**Band 87**

Reimar Unger

**Messsystem zur Charakterisierung  
textiler Hochleistungsfaserstoffe  
bei hohen Dehnraten**

**TUD***press*

2022

Die vorliegende Arbeit wurde unter dem Titel „Messsystem zur Charakterisierung textiler Hochleistungsfaserstoffe bei hohen Dehnraten“ am 13.06.2022 als Dissertation an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden eingereicht und am 13.09.2022 verteidigt.

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. et Ing. habil. Thomas Härtling (Fraunhofer IKTS)

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach (TU Dresden)  
Prof. Dr.-Ing. Szabolcs Szatmári (BHT Berlin)

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.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek  
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-458-1

© TUDPress  
Thelem Universitätsverlag und  
Buchhandlung GmbH & Co. KG  
Dresden  
Tel.: 0351/472 14 63 | Fax: 0351/479 69 721  
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von Thelem.  
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.  
Gesetzt vom Autor.  
Printed in Germany.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung/Abstract</b>	<b>XIII</b>
<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einführung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2 Bestimmung der mechanischen Kennwerte faserförmiger Materialien mittels Zugprüfung</b>	<b>5</b>
2.1 Mechanische Grundlagen . . . . .	5
2.1.1 Dehnung . . . . .	5
2.1.2 Dehnrate . . . . .	7
2.1.3 Begriffe der Materialprüfung . . . . .	9
2.1.4 Stoß in der Materialprüfung . . . . .	11
2.1.5 Wellenausbreitung in festen Stoffen . . . . .	11
2.1.6 Geteilter Hopkinson-Kolsky-Stab . . . . .	15
2.1.7 Versagensmechanismen . . . . .	20
2.2 Kraftmessung . . . . .	21
2.3 Mechano-elektrische Wandler . . . . .	21
2.3.1 Resistive Wandler . . . . .	21
2.3.2 Piezoelektrische Wandler . . . . .	23
2.4 Messwerterfassung und Signalauswertung . . . . .	24
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>27</b>
3.1 Messsysteme für die Zugprüfung . . . . .	27
3.2 Mechano-elektrische Wandler . . . . .	35
3.2.1 Dehnungsmessstreifenbasierte Kraftaufnehmer . . . . .	37
3.2.2 Piezoelektrische Kraftaufnehmer . . . . .	38
3.3 Optoelektronische Wandler . . . . .	39
3.4 Krafteinleitungselemente . . . . .	40
3.5 Hochleistungsfaserstoffe . . . . .	42
3.5.1 Kohlenstofffasern . . . . .	43
3.5.2 Glasfasern . . . . .	45
3.5.3 Aramid . . . . .	46
3.6 Resümee . . . . .	46

<b>4</b>	<b>Messsystem für große Dehnraten</b>	<b>49</b>
4.1	Anforderungen und Randbedingungen . . . . .	49
4.2	Gerätekonzept . . . . .	52
4.2.1	Antrieb . . . . .	52
4.2.2	Probenvorlage . . . . .	65
4.2.3	Erfassen von Kraft und Bewegung . . . . .	68
4.2.4	Messabweichungen, Rauschen und Störeinkopplungen . . .	75
4.3	Entwicklungsrichtlinien . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Messsystem zur Messung der dehnratenabhängigen Material-</b>	
	<b>eigenschaften</b>	<b>81</b>
5.1	Konstruktion des Gesamtaufbaus . . . . .	81
5.2	Messsystemantrieb . . . . .	83
5.2.1	Aufbau . . . . .	83
5.2.2	Antriebsseitiger Versuchsablauf . . . . .	84
5.3	Ankopplung der Proben . . . . .	88
5.3.1	Probenpräparation . . . . .	89
5.3.2	Probenvorlage . . . . .	94
5.4	Messeinrichtungen . . . . .	95
5.4.1	Messen von Kraft und Dehnwellen . . . . .	96
5.4.2	Messen der Dehnung . . . . .	99
5.5	Signalerfassung und -auswertung . . . . .	101
5.6	Dynamik . . . . .	103
5.7	Messunsicherheit . . . . .	105
5.8	Zusammenfassung . . . . .	109
<b>6</b>	<b>Modell des Messsystems</b>	<b>111</b>
6.1	Vorüberlegungen . . . . .	111
6.2	Dehnratenquelle . . . . .	113
6.3	Amboss . . . . .	115
6.4	Probe . . . . .	116
6.5	Sensor . . . . .	118
6.5.1	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer . . . . .	119
6.5.2	Stab . . . . .	121
6.6	Gesamtmodell . . . . .	122
6.7	Simulation . . . . .	123
6.7.1	Betrachtungen zu den Simulationsergebnissen . . . . .	127

6.7.2	Modell ohne Stab . . . . .	132
6.7.3	Modell mit Stab . . . . .	134
6.8	Zusammenfassung . . . . .	138
<b>7</b>	<b>Charakterisierung des neuen Messsystems</b>	<b>141</b>
7.1	Inbetriebnahme . . . . .	141
7.2	Untersuchung von Faktoren mit Einfluss auf das Messergebnis . .	143
7.2.1	Einfluss der Geschwindigkeit . . . . .	147
7.2.2	Einfluss der Bruchdehnung . . . . .	153
7.2.3	Einfluss der Dehnrate . . . . .	156
7.3	Ansätze für weitere Evaluationen des Messsystems . . . . .	156
7.3.1	Evaluation mit Ersatzmaterialien . . . . .	157
7.3.2	Messsystemanalyse . . . . .	157
7.4	Auswertung und Zusammenfassung . . . . .	158
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>161</b>
	<b>Normen</b>	<b>165</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>169</b>
<b>A</b>	<b>Einzelergebnisse aus der Charakterisierung</b>	<b>187</b>
<b>B</b>	<b>Anforderungsliste</b>	<b>199</b>





## Vorwort des Herausgebers

Seit Mitte des letzten Jahrhunderts sind Faserverbundwerkstoffe immer mehr in den Blickpunkt des konstruktiven Maschinenbaus gerückt, da sie als Leichtbauwerkstoffe hinsichtlich Gewicht, Steifigkeit und Tragfähigkeit große Vorteile gegenüber klassischen Konstruktionswerkstoffen wie Stahl und auch metallischen Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium aufweisen. Faserverbundwerkstoffe bestehen im Allgemeinen aus zwei Hauptkomponenten, einer bettenden Matrix und verstärkenden Fasern. Die Matrix ist im Maschinenbau meist ein Thermoplast (z.B. Epoxidharz) und – seit wenigen Jahren – im Bauwesen auch Beton. Als Fasern kommen vorrangig Kohlenstoff- und Glasfasern, aber auch Aramidfasern, zum Einsatz. Durch gegenseitige Wechselwirkungen von Matrix und Fasern erhalten die Faserverbundwerkstoffe dann höherwertige Eigenschaften als jede der beiden einzelnen Komponenten.

Stahl und Aluminium als klassische Konstruktionswerkstoffe werden seit langer Zeit verwendet, so dass ihr Materialverhalten sehr gut bekannt ist. Sie können in den meisten Fällen als homogen und oft auch als isotrop angesehen werden. Dies ist bei Faserverbundwerkstoffen durch ihren speziellen Aufbau nicht der Fall. Da die Kräfte in den Bauteilen insbesondere von den Fasern aufgenommen werden, ist die Kenntnis ihrer Materialeigenschaften von größtem Interesse, um entsprechend ihrer speziellen Belastung Bauteile lastgerecht und ressourcenschonend gestalten zu können. Allerdings sind die kurzzeitdynamischen Eigenschaften der Faserwerkstoffe bisher nur unzureichend bekannt. Dies betrifft insbesondere die Bereiche hoher und sehr hoher Dehnraten, wie sie beispielsweise durch Aufprallereignisse bei Unfällen auftreten können.

Hier setzt nun die vorliegende Arbeit an, indem ein schon früher vorgeschlagenes Prinzip zur Charakterisierung textiler Faserstoffe für die Anwendung bei hohen Dehnraten weiterentwickelt wird. Ausgangspunkt ist ein rotierender Antrieb, mit dem sich die Prüfgeschwindigkeit und damit die Dehnrate und die Probenlänge in einem weiten Bereich einstellen lassen. Aufbauend auf den systematisch abgeleiteten Anforderungen wird das neue Messsystem konzipiert, eine Vorzugsvariante umgesetzt und schließlich die Praxistauglichkeit des entwickelten Messsystems demonstriert.

Dieser Band der „Dresdner Beiträge zur Sensorik“ leistet damit einen außerordentlich wichtigen Beitrag zur wissenschaftlich-technischen Entwicklung dieses Fachgebiets und kann damit indirekt auch eine beträchtliche wirtschaftliche Bedeu-

tung bekommen. Aus diesem Grund wünsche ich dieser Arbeit die ihr gebührende Aufmerksamkeit!

Dresden, im September 2022

Gerald Gerlach

# Vorwort des Autors

Komplexe und umfangreiche Aufgaben gelingen ohne gutes Team selten. Zum Erfolg der vorliegenden Arbeit zählt zweifelsohne die Unterstützung, die ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textilmaschinen und textile Hochleistungswerkstofftechnik der Technischen Universität Dresden in der Projektbearbeitung erhalten habe.

Herzlich danken möchte ich an dieser Stelle allen Unterstützern, insbesondere:

- meinem wissenschaftlichen Betreuer Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach vom Institut für Festkörperelektronik für die umfangreiche und exzellente Betreuung beim Verfassen dieser Arbeit und die Bereitschaft, das Thema zu betreuen,
- Herrn Prof. Dr.-Ing. Szabolcs Szatmari für die Übernahme der Zweitbegutachtung,
- meinem Forschungsgruppenleiter Dr.-Ing. Andreas Nocke für die kontinuierliche Unterstützung und den wissenschaftlichen Austausch,
- den ehemaligen und aktuellen Mitgliedern der Forschungsgruppe Mess- und Sensortechnik, vor allem:
  - Eric Häntzsche für alle maschinenbaulichen und textiltechnischen Gespräche und sein profundes Wissen, auf das ich jederzeit zugreifen konnte,
  - Dr.-Ing. Georg Bardl für seine wertvollen Tipps und Hinweise, wie man Probleme in Matlab einfach lösen kann,
  - Dr.-Ing. Johannes Mersch für den regen Austausch bzgl. LTSpice, Python und Matlab,
  - Johannes Wendler für die Gespräche und Hinweise in allen Facetten der Konstruktion und der Bedienung von SolidWorks,
  - Hans Winger für die Vertretung während meiner Abwesenheiten,
  - Axel Kluge für seine Kollegialität und die Einführung in die Textiltechnik,
- Dr.-Ing. Uwe Hanke für den Austausch hinsichtlich aller kinematischen Probleme,

- Konrad Zierold für die gute Zusammenarbeit an den Schnittpunkten unserer Projekte,
- Peter Klug für seine wertvolle Unterstützung hinsichtlich der Automatisierung der Motorensteuerung, den intensiven inhaltlichen Austausch zum rotatorischen Versuchsstand und die kontinuierliche Motivation,
- allen technischen Mitarbeitern des ITM, insbesondere Nils Bolk, Theo Lehmann, Mirko Krziwon und André Chill für die gute Zusammenarbeit,
- Frau Zoerner für die hervorragende CAD-Umsetzung der Ideen von Herrn Waldmann,
- Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif dafür, dass er mir die Bearbeitung des Projektes am ITM ermöglicht hat,
- Herrn Prof. Dr. Wolfgang E. Nagel und Herrn Dr. Ralph Müller-Pfefferkorn, die mir die Fertigstellung der Arbeit neben meiner Tätigkeit am ZIH ermöglicht haben,
- der Deutschen Forschungsgesellschaft für die finanzielle Unterstützung des Projektes DFG CH174/41-1,
- meinen Eltern Gudrun und Ulrich Unger sowie
- vor allem meiner Frau Kati und meinen Kindern Ulrike, Linus, Richard und Gustav, die mir den Freiraum zur Ausarbeitung der vorliegenden Dissertation gegeben und mich – trotz einiger Entbehrungen – in allen Phasen unterstützt haben.

Dresden, im September 2022

Reimar Unger

# Zusammenfassung

Ressourceneffizienter Materialeinsatz beginnt mit der genauen Kenntnis der eingesetzten Materialien und deren Verhalten unter den verschiedenen Einsatzbedingungen. Mit der Verwendung von Kohlenstoff-, Glas- und Aramidfasern in Faserverbundwerkstoffen der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie ist es deshalb notwendig, diese Fasern genau zu charakterisieren.

Die vorliegende Arbeit entwickelt ein Messsystem zur Charakterisierung textiler Hochleistungsfaserstoffe bei hohen Dehnraten, um diese Fasern mittels Zugprüfung in einem Dehnratenbereich bis zu  $1000\text{ s}^{-1}$  untersuchen zu können. Der erste Teil der Arbeit befasst sich deshalb mit den Grundlagen und dem Stand der Technik von dynamischen textilen Zugprüfungen. Danach werden die Anforderungen an das zu entwickelnde System erarbeitet. Im Fokus der Betrachtungen liegen die mechanischen und messtechnischen Herausforderungen dieser dynamischen Prozesse.

Der zweite Teil der Arbeit beschreibt dann den Aufbau, die Modellierung und die Charakterisierung des entwickelten Messsystems. Dieses besitzt eine rotierende Schwungscheibe als Antrieb und eine Kombination aus optischen und piezoelektrischen Sensoren sowie einem ‚One-Bar‘ zum Messen der mechanischen Größen. Abschließend werden beispielhaft für ausgewählte Fasern erste Untersuchungsergebnisse unter Verwendung des Messsystems geschildert.

## Abstract

Resource-efficient use of materials requires precise knowledge of the materials used and their behavior under the various conditions of use. With the use of carbon, glass and aramid fibers in the aerospace and automotive industries, it is therefore necessary to precisely characterize these fibers.

This thesis develops a measuring system for the characterization of high performance textile fibers at high strain rates to examine these fibers by means of tensile testing in a strain rate range of up to  $1000\text{ s}^{-1}$ . The first part of the paper therefore deals with the fundamentals and state of the art of dynamic textile tensile testing. Thereafter, the requirements for the system to be developed are elaborated. The focus is on the mechanical and measurement challenges of these dynamic processes.

The second part of the thesis describes the structure, the modeling and characterization of the developed measuring system. This has a rotating flywheel as a drive and a combination of optical and piezoelectric sensors as well as a one-bar for measuring the mechanical variables. Finally, the first test results for selected fibers using the measuring system are described exemplarily.



# Symbole und Abkürzungen

## Lateinische Großbuchstaben

<i>A</i>	Querschnittsfläche
<i>C</i>	Elektrische Kapazität
<i>D</i>	Durchmesser
<i>E</i>	Elastizitätsmodul
<i>E</i>	Energie
<i>F</i>	Kraft
<i>G</i>	Proportionalitätsgröße
<i>I</i>	Elektrischer Strom
<i>J</i>	Massenträgheitsmoment
<i>L</i>	Induktivität
<i>S</i>	Spannung
<i>R</i>	Elektrischer Widerstand
<i>R</i>	Mechanische Festigkeit
<i>T</i>	Dauer
<i>Tt</i>	Feinheit
<i>U</i>	Elektrische Spannung
<i>V</i>	Volumen
<i>Z</i>	Wellenwiderstand
<i>W</i>	Arbeit

## Lateinische Kleinbuchstaben

<i>a</i>	Beschleunigung
<i>c</i>	Schallgeschwindigkeit
<i>d</i>	Durchmesser
<i>f</i>	Frequenz
<i>g</i>	Fallbeschleunigung

### **Lateinische Kleinbuchstaben**

$h$	Höhe; Dicke
$h$	Reibungsadmittanz
$i$	Strom
$k$	K-Faktor
$\ell$	Länge
$n$	Drehzahl
$n$	Nachgiebigkeit
$m$	Masse
$p$	Druck
$q$	Relative Anzeigeabweichung der Kraftmesseinrichtung
$r$	Radius
$s$	Strecke; Weg
$t$	Zeit
$u$	Spannung
$v$	Geschwindigkeit
$x$	Position
$z$	Wellenimpedanz

### **Griechische Buchstaben**

$\alpha$	Winkel
$\Delta$	Änderung oder Differenz der folgenden Größe im aktuellen Kontext
$\varepsilon$	Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	Dehnrage
$\vartheta$	Temperatur in °C
$\lambda$	Wellenlänge
$\mu$	Winkel
$\rho$	Dichte des Materials
$\sigma$	Mechanische Spannung
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit



## Indizes

'	Durch den Versuch veränderte Zielgröße
0	Ausgangs-, Grundzustand
<i>Al</i>	Wert für Aluminium
<i>Bruch</i>	Angenommener Zielwert bei Materialversagen
<i>DMS</i>	Wert für Dehnmessstreifen
<i>M</i>	Maximalwert
<i>min</i>	Minimaler Wert
<i>max</i>	Maximaler Wert
<i>p0,2</i>	Wert bei 0,2% plastischer Dehnung
<i>PEFE</i>	Probenendfixierelement
<i>Prüf</i>	Zielwert der Prüfung
<i>R</i>	reflektiert
<i>rot</i>	Wert für eine rotierende Bewegung
<i>Stab</i>	Wert für Stab im Messsystem
<i>Stahl</i>	Wert für Stahl
<i>T</i>	transmittiert

## Abkürzungen

AR	Aramid <sup>I</sup>
CF	Kohlenstofffaser <sup>I</sup> (engl. <i>Carbon Fiber</i> )
CFK	Kohlenstofffaserkunststoffverbund
DIN	Deutsches Institut für Normung - hier als Herausgeber deutscher Normen
DIC	Digitale Bildkorrelation (engl. <i>digital image correlation</i> )
DMS	Dehnmessstreifen, auch Dehnungsmessstreifen (br. engl. <i>Strain Gauge</i> , am. engl. auch <i>Strain Gage</i> )
EN	Europäische Norm
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund (auch FVW, FVK)
FS	Messbereichsendwert (engl. <i>full-scale</i> )
GF	Glasfaser <sup>I</sup>
GFK	Glasfaserkunststoffverbund

## Abkürzungen

HL	Halbleiter
ISO	Internationale Organisation für Normung
MSA	Messsystemanalyse
PVDF	Polyvinylidenfluorid
SHB	Versuchseinrichtung mit geteiltem Hopkinson-Stab (engl. <i>Split-Hopkinson-Bar</i> )
SHTB	Versuchseinrichtung mit geteiltem Hopkinson-Stab für direkte Zugbeanspruchung (engl. <i>Split-Hopkinson-Tension-Bar</i> )
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCGF	Temperaturkoeffizient des k-Faktors (engl. <i>Thermal Coefficient of Gauge Factor</i> )
TCR	Temperaturkoeffizient des Widerstandes (engl. <i>Thermal Coefficient of Resistance</i> )
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. - hier als Herausgeber von Normen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure - hier als Herausgeber von Normen und Richtlinien

---

<sup>1</sup>Abkürzung gemäß DIN EN ISO 2076:2014 [N14]

# 1 Einführung und Motivation

Das Wissen um das Verhalten von Materialien – also die Kenntnis der Materialeigenschaften – ist die Voraussetzung für deren erfolgreiche Anwendung. Darüber hinaus können manche Applikationen überhaupt erst durch die deutlich besseren Eigenschaften neuer Materialien realisiert werden.

Mit der Entwicklung der Kunstfasern seit der Mitte des letzten Jahrhunderts hat sich auch die Materialklasse der Faserverbunde etabliert, die eine Basis für immer neue Produkte und Lösungen bildet (Abbildung 1.1). Unter Faserverbund wird dabei in der Leichtbautechnik die Kombination von Endlosfaserbündeln mit einem Matrixmaterial (z. B. Kunststoffe oder Beton) verstanden. In ihm werden die Zugkräfte vor allem durch die Fasern getragen, während die anderen Beanspruchungen durch die Matrix aufgenommen werden. Mit Hilfe dieser Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) sind neben dem Textilbeton so auch textilbasierte Lösungen möglich, die ressourcenschonend und preisgünstiger als bisherige Leichtbauprodukte sein können [1–3].



Abbildung 1.1: Alltagsprodukte mit faserverstärkten Materialverbänden und dynamischen Beanspruchungen. a) Airbus A350 XWB mit 53 % CFK-Anteil [4], b) BMW i3 mit CFK-Karosserie [5], c) glasfaserverstärkte Betonbrücke in Albstadt [6]

Dafür ist es notwendig, das Produkt anforderungsgerecht – das heißt so stabil wie nötig und so materialsparend wie möglich – auszulegen. Für altbekannte und gut erforschte Materialien, zum Beispiel Stahlbeton oder Aluminiumkonstruktionen, ist dies in der Regel mittels Normen und Auslegungs- und Berechnungsvorschriften, die die ebenfalls notwendigen Sicherheiten berücksichtigen, leicht möglich. Dies liegt darin begründet, dass diese Materialien lange bekannt und gut untersucht sind. Für neue Materialien müssen diese Daten – wenn man sie als Ersatz oder Ergänzung nutzen möchte – durch Materialuntersuchungen erst gefunden werden.

Nicht immer gelingt dies mit der vorhandenen Technik, da sich die Grenzen der vorhandenen Prüfeinrichtungen stets an den bekannten Materialeigenschaften orientiert haben.

Die Anwendungen von Hochleistungsfaserstoffen zielt auf die Verstärkung von Bauteilen ab, die sich im Zuge des Leichtbaus von massiven, einkomponentigen Werkstoffen hin zu mehrkomponentigen Materialverbänden entwickeln. Die Aufgabe der Verstärkung ist es, einen Teil der auftretenden Kräfte im Bauteil aufzunehmen. Das heißt, dass sie in Bezug auf das Matrixmaterial steifer sein und eine höhere Zugfestigkeit aufweisen müssen. Demzufolge muss das Verhalten der Komponenten für die möglichen Lastfälle bekannt sein. Im Gegensatz zu einkomponentigen Werkstoffen sind diese Materialverbände aufgrund dieser Anforderungen weder homogen noch isotrop. Ein simulationsgestütztes Beschreiben des Bauteilverhaltens bedarf somit der Materialeigenschaften in den zu betrachtenden Lastfällen. Die Kenntnis der kurzzeitdynamischen Eigenschaften von typischerweise mit Epoxidharzen imprägnierten Hochleistungsfaserstoffen ist damit von grundlegender Bedeutung für das Materialverhalten der daraus gefertigten Komposit-Bauteile. Vergleichbares gilt für die nicht imprägnierten Hochleistungsfaserstoffe im Bereich der Schutztextilien.

Kurzzeitdynamische Eigenschaften bedeuten im Automobil-, Luft- und Raumfahrtbereich Belastungen, die bei Dehnraten von über  $100 \text{ s}^{-1}$  entstehen [7, 8]. Diese Dehnraten treten nach GLOGER u. a. [9] und WERNER u. a. [10] beispielsweise bei Unfällen mit einem Anprall auf. Gegenwärtig lassen sich mit den Prinzipien der servohydraulischen Zugprüfmaschine und des Fallturms reproduzierbar nur Dehnraten von bis zu  $160 \text{ s}^{-1}$  (CHERIF u. a. [11]) bzw.  $79 \text{ s}^{-1}$  (YOUNES u. a. [12]) prüfen.

Oberhalb dieser Dehnraten können hochdynamische Belastungsszenarien zum Charakterisieren des Materials mit einem geteilten Hopkinson-Stab nachgebildet werden. Bei diesem Verfahren ist der Prüfling zwischen zwei Stäben eingespannt und ein Stab wird mit einem definierten Impuls angeregt. Der Impuls transportiert die Energie in die Probe und erzeugt dort eine Dehnrate und damit die notwendige mechanische Spannung, die zum Versagen des Prüflings führt. Zum Bestimmen von Dehnrate und wirkender mechanischer Spannung werden die durch den Impuls erzeugten Dehnwellen und deren Reflexionen in beiden Stäben aufgezeichnet. Der geteilte Hopkinson-Stab eignet sich nach GAMA u. a. [13] besonders für Dehnraten über  $500 \text{ s}^{-1}$ . Bei kleineren Dehnraten steigt der Aufwand der mechanischen Konstruktion aufgrund der ansteigenden Stablängen.

Zum Bestimmen der Materialkennwerte in einem Dehnratenbereich von  $100\text{ s}^{-1}$  bis  $1000\text{ s}^{-1}$  sind deshalb andere Prüfmethode zu bevorzugen.

Im Gegensatz zu den klassischen geteilten Hopkinson-Stab-Aufbauten eröffnet die Kombination verschiedener Kraftmesstechniken die Möglichkeit, Fasermaterialien in einem deutlich erweiterten Dehnratenbereich zu untersuchen.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Messsystems auf Basis einer rotierenden Schwungscheibe, mit dem die dehnratenabhängigen Filamentgarnfestigkeiten und -steifigkeiten<sup>1</sup> von Hochleistungsfaserstoffen zuverlässig und reproduzierbar ermittelt werden können. Ähnliche Ansätze mit rotierenden Antrieben wurden schon von MANN [14], REUMANN [15], MEYER [16] und MEYER u. a. [17] untersucht. Die Lösungen sind jedoch für die interessierenden Hochleistungsfaserstoffe nicht unmittelbar anwendbar. Als Hochleistungsfaserstoffe werden im FKV üblicherweise Filamentgarne aus Glasfaser (GF), Carbonfaser (CF) oder Aramid (AR) eingesetzt, deren zu betrachtende Beanspruchungen in Faserlängsrichtung einen Dehnratenbereich von  $1\text{ s}^{-1}$  bis  $1000\text{ s}^{-1}$  umfassen [18]. Um dies zu erreichen, müssen die Prüfgeschwindigkeit und die Probenlänge des Messsystems in einem weiten Bereich einstellbar sein. Dazu ist es notwendig, ausgehend vom bisherigen Kenntnisstand (Kapitel 3) zu den zu untersuchenden Fasern, die Anforderungen für den Antrieb, die Probenvorlage und das Messsystem abzuleiten und geeignete Lösungsansätze zu erarbeiten (Kapitel 4). Aus den erarbeiteten Lösungsansätzen wird eine Vorzugsvariante ausgewählt und umgesetzt (Kapitel 5). Parallel zur Umsetzung entsteht ein Modell zur Simulation des elektromechanischen Systems, das die Vorgänge im Messsystem hinreichend genau beschreibt (Kapitel 6). Damit kann das aufgebaute Messsystem analysiert und charakterisiert werden (Kapitel 7). Anhand der oben genannten Filamentgarne (CF, GF, AR) wird damit die Praxistauglichkeit des entwickelten Messsystems demonstriert.

---

<sup>1</sup>Als Filament beschreiben die Normen DIN 60000 und DIN 60001-2 [N3, N4] in der Textiltechnik Fasern mit einer sehr großen, also praktisch endlosen Länge (auch Endlosfasern). Garne sind nach DIN 60000 einfache linienförmige Gebilde, die aus Spinn- oder Endlosfasern bestehen. Der maximale Durchmesser für Filamente liegt nach DIN 60900-1 dabei bei rund 0,1 mm.