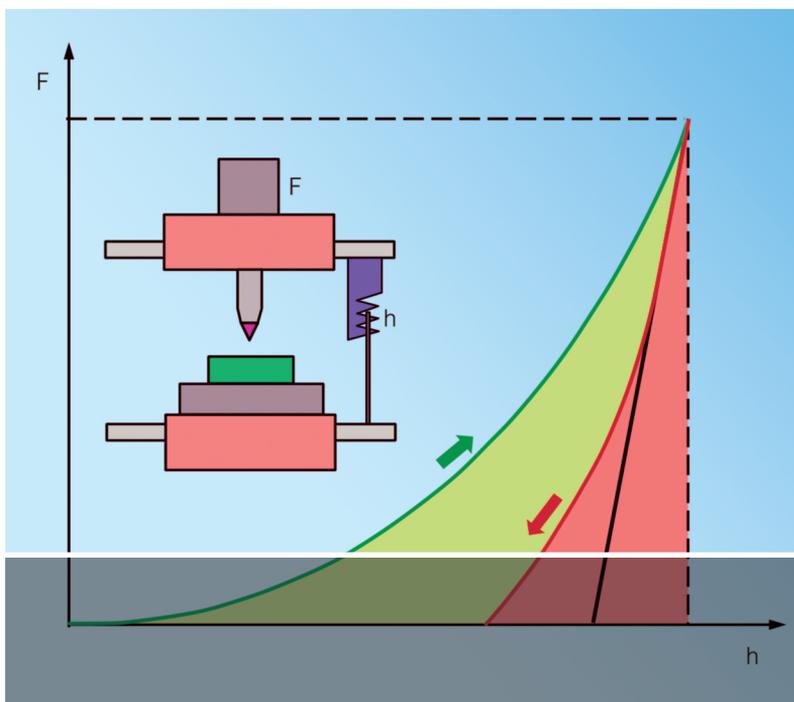


Wolfgang Grellmann
Sabine Seidler

Kunststoff- prüfung



3., aktualisierte Auflage

HANSER



bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

- **Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!
- **Richtungweisend:** Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!
- **Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.DE

Immer einen Click voraus!

Wolfgang Grellmann
Sabine Seidler (Hrsg.)

Kunststoffprüfung

3. Auflage

Unter Mitarbeit von

Volker Altstädt, Monika Bauer, Christian Bierögel, Gert Busse, Klaus Friedrich,
Henrik Höninger, Thomas Lüpke, Bernd Michel, Hans-Joachim Radusch,
Falko Ramsteiner, Andreas Schönhals, Jörg Templer

HANSER

Die Herausgeber:

Prof. Dr. rer. nat. habil. Wolfgang Grellmann,
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Zentrum für Ingenieurwissenschaften,
Professur Werkstoffdiagnostik/Werkstoffprüfung, 06099 Halle/Saale

Prof. Dr.-Ing. habil. Sabine Seidler
Technische Universität Wien, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie,
1040 Wien

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

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 Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2015 Carl Hanser Verlag München
www.hanser-fachbuch.de
Herstellung: Jörg Strohbach
Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Coverrealisierung: Stephan Rönigk
Satz, Druck und Bindung: Kösel, Krugzell
Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-44350-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-44390-7

Vorwort zur 3. Auflage

Die vorliegende 3. Auflage des Lehrbuches „*Kunststoffprüfung*“ berücksichtigt die von Fachkollegen in den zahlreichen, sehr positiven Rezensionen gegebenen Hinweise und Änderungswünsche. Darüber hinaus wurden alle Kapitel durch die Herausgeber und Mitautoren kritisch durchgesehen. Die in Kapitel 1 gegebenen Literaturhinweise für die einzelnen Fachgebiete wurden durch neu herausgegebene Lehr- und Fachbücher ergänzt. Auf dem Gebiet der nationalen und internationalen Normung und Standardisierung haben sich zahlreiche Veränderungen vollzogen, die zu insgesamt mehr als 400 Aktualisierungen mit Stand vom März 2015 geführt haben. Die vom Carl Hanser Verlag auf Anfrage erhältlichen Powerpoint-Folien der Bilder und Tabellen wurden ebenfalls überarbeitet und können im Lehrbetrieb an Universitäten und Hochschulen eingesetzt werden.

Eine weitere Informationsmöglichkeit zur Erläuterung von Begriffen und der praktischen Durchführung von Prüfmethoden der Kunststoffprüfung bietet das Lexikon zur „Kunststoffprüfung und Diagnostik“. Dieses Online-Lexikon nutzt das von der Wikipedia-Enzyklopädie her bekannte Wiki-System und ist unter www.psm-merseburg.de in der Version 4.0 (2014) frei verfügbar. Die wissenschaftliche Basis für dieses Wiki-Lexikon bilden die in der Merseburger Schule (siehe auch www.amk-merseburg.de) publizierten Lehr- und Fachbücher zur Kunststoffprüfung und Diagnostik sowie zur technischen Bruchmechanik von Kunststoffen und Verbundwerkstoffen mit polymerer Matrix.

Das Buch wurde in dem neuen Layoutprogramm ADOBE InDesign gestaltet, wodurch sich die äußere Ansicht des Buches sehr stark geändert hat. Für die dabei geleistete Unterstützung danken wir dem Carl Hanser Verlag, insbesondere Herrn Dr. Mark Smith, Frau Dipl.-Ing. (FH) Ulrike Wittmann und Herrn Jörg Strohbach.

Sabine Seidler, Wien
März 2015

Wolfgang Grellmann, Halle und Merseburg

Vorwort zur 2. Auflage

Das Lehrbuch „*Kunststoffprüfung*“ ist vor allem für die Ausbildung von Studierenden an Universitäten und Hochschulen gedacht. Dies erschien uns notwendig, weil sich die Kunststoffprüfung in den letzten Jahren innerhalb der Polymerwissenschaften als eigenständige Wissenschaftsdisziplin etabliert hat. Das Lehrbuch wurde erstmals 2005 in deutscher Sprache veröffentlicht. Im Jahre 2007 erfolgte die Herausgabe einer weiterentwickelten englischen Fassung und 2010 eine russische Ausgabe mit Berücksichtigung der speziellen GOST-Normen.

Die positiven Rezensionen unserer Fachkolleginnen und -kollegen beweisen, dass die Konzeption „Methode – Kennwerte – Beispiele“ den Bedürfnissen von Studierenden entspricht und gleichzeitig von der Praxis akzeptiert wird.

Seit dem Erscheinen der 1. Auflage hat es zwar keine entscheidenden Veränderungen in den prüfmethodischen Grundlagen gegeben, jedoch erhebliche Fortschritte in der Bewertung von Struktur-Eigenschafts-Korrelationen und in der Normung. Die Forderung nach der Bereitstellung von werkstoffwissenschaftlichen Kenngrößen zur Quantifizierung des Zusammenhanges zwischen Mikrostruktur und den makroskopischen Eigenschaften hat sich ständig erhöht. Deshalb erschien es notwendig, eine den gegenwärtigen Erkenntnisstand berücksichtigende 2. Auflage herauszugeben, die eine gründliche Überarbeitung darstellt und alle Änderungen der wichtigsten Normen der Kunststoffprüfung mit Stand vom April 2011 berücksichtigt.

Die Neuauflage bietet entsprechend der beibehaltenen Konzeption und methodisch orientierten Gliederung bei der Darstellung der Kunststoffprüfverfahren, der daraus gewonnenen Kennwerte und der gewählten Beispiele eine gute und schnelle Informationsmöglichkeit für Studierende in der Ausbildung. Das Buch hat deshalb an Universitäten und Hochschulen eine breite Aufnahme in die Lehre zur „Kunststoffprüfung“ gefunden.

Zur Unterstützung der Lehrtätigkeit von Lehrenden an Universitäten und Fachhochschulen wurde für alle Bilder und Tabellen eine Powerpoint-Präsentation erstellt, die beim Hanser Verlag von der Webseite heruntergeladen werden kann. Wir danken in diesem Zusammenhang besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Bierögel für die wertvollen Hinweise bei der Erarbeitung der vorliegenden Auflage und besonders

für die Überarbeitung der jetzt farbigen Bilder und die umfangreichen Arbeiten zur Erstellung der Powerpoint-Präsentation von allen Bildern und Tabellen.

Auf der wissenschaftlichen Basis des Buches wurde ein Lexikon „*Kunststoffprüfung und Diagnostik*“ erarbeitet, das in wesentlichen Teilen über den Inhalt des Buches hinausgeht und unter www.psm-merseburg.de für die praktische Arbeit genutzt werden kann.

Dem Carl Hanser Verlag, insbesondere Frau Dr. Christine Strohm, Frau Dipl.-Ing. (FH) Ulrike Wittmann sowie Herrn Steffen Jörg danken wir für die gute, vertrauensvolle Zusammenarbeit.

April 2011

Die Herausgeber

Vorwort zur 1. Auflage

Das vorliegende Buch basiert auf der langjährigen Erfahrung der Herausgeber in Forschung, Entwicklung und Lehre auf dem Gebiet der Werkstoffwissenschaft und speziell der Kunststoffprüfung, der Kunststoffdiagnostik und der Schadensfallanalyse. Die Arbeitsergebnisse wurden bisher in zwei Monographien zum Deformations- und Bruchverhalten von Kunststoffen, erschienen im Springer Verlag, in zahlreichen Einzelpublikationen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften und in Fortschritts-Berichten der VDI-Reihe „Mechanik/Bruchmechanik“ publiziert. Vor dem Hintergrund einer sich vollziehenden dynamischen Entwicklung des Forschungsgebietes erschien es uns folgerichtig, die erhaltenen Ergebnisse auch als Lehrbuch für Studierende aufzuarbeiten.

Die Notwendigkeit einer umfassenden Darstellung des Wissensstandes leitet sich aus folgenden Faktoren ab:

- Die wachsende Bedeutung der Werkstoffgruppe für den technischen Fortschritt führt zu einem zunehmenden Anteil an Kunststoffen und Verbunden in konstruktiven Anwendungen.
- Das erhöhte Sicherheitsbewusstsein führt zur Entwicklung von hybriden Prüfverfahren, die eine komplexe Betrachtung des Zusammenhanges zwischen Beanspruchung und Werkstoffverhalten unter anwendungsnahen Beanspruchungsbedingungen ermöglichen.
- Durch die Entwicklung von Faserverbundwerkstoffen mit thermoplastischer und duromerer Matrix ergeben sich neue Anforderungen an die Kunststoffprüfung.
- Der zunehmende Einsatz von Kunststoffen und Elastomeren in der Medizintechnik für verschiedenste Anwendungen erfordert die Entwicklung technologischer Prüfverfahren zur Funktionalitätsprüfung.
- Der Trend zur Miniaturisierung von Bauteilen (Mikrosysteme) setzt geeignete Prüfverfahren zur Bewertung des Werkstoffverhaltens (z. B. bei thermo-mechanischer Beanspruchung) in Mikrokomponenten und -systemen voraus.

Darüber hinaus wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von neuen Prüfnormen herausgegeben, so dass auch unter diesem Aspekt die Neugestaltung eines Lehrbuches für diese Wissenschaftsdisziplin ein wichtiges Erfordernis darstellt.

Zur Aufarbeitung des umfangreichen Lehrstoffes wurden für ausgewählte Kapitel kompetente Fachkollegen aus den Universitäten, Hochschulen und der Kunststoffindustrie gewonnen. Eine Liste der Mitautoren verbunden mit dem Dank an zahlreiche Kollegen und Mitarbeiter ist in einer gesonderten Aufstellung enthalten.

Die Herausgeber und Mitautoren haben sich bemüht, die Grenzen der klassischen Kunststoffnormprüfung zu überschreiten, um die Bedeutung der Kunststoffprüftechnik für die Entwicklung und Anwendung neuer Kunststoffe und Verbundwerkstoffe sowie die Einführung neuer Technologien erkennbar werden zu lassen.

Das vorliegende Buch wendet sich bevorzugt an Studierende in den Bachelor-, Diplom- und Masterstudiengängen der Fachrichtungen Material- und Werkstoffwissenschaften, Werkstofftechnik, Maschinenbau, Kunststofftechnik und Verfahrenstechnik. Es ist weiterhin gedacht für Lehrkräfte und Studierende an Universitäten und Fachhochschulen für die Haupt-, Ergänzungs- oder Vertiefungsstudien in den Studiengängen Chemie und Wirtschaftsingenieurwesen. Die Methoden der Kunststoffprüfung sind aber auch für die Entwicklung und den Einsatz biomedizinischer Materialien oder nanostrukturierter Werkstoffe von unverzichtbarer Bedeutung.

Mit Herausgabe dieses Lehrbuches verbinden wir die Hoffnung, dass neben der Bedeutung für die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf physikalisch und werkstoffwissenschaftlich orientierten Fachgebieten auch ein Beitrag zur Weiterbildung von in der Praxis tätigen Kunststoffprüfern, Konstrukteuren und Technologen geleistet werden kann.

Wir bedanken uns beim Carl Hanser Verlag für die Möglichkeit zur Veröffentlichung dieses Lehrbuches mit dem Titel „Kunststoffprüfung“, wobei als Anregung das im Jahre 1992 von Doz. Dr.-Ing. Heinz Schmiedel verfasste „Handbuch der Kunststoffprüfung“ diente. Beibehalten haben wir die physikalisch-methodische Betrachtungsweise und vor dem Hintergrund der eigenen Forschungsarbeiten das ausführliche Kapitel zur „Bewertung der Zähigkeitseigenschaften durch bruchmechanische Kennwerte“.

Uns ist es ein besonderes Bedürfnis, Herrn Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr. e. h. Horst Blumenauer, Magdeburg, für sein langjähriges förderndes Interesse an unseren wissenschaftlichen Arbeiten, seine kritischen Hinweise und Diskussionen sowie die Motivation zur Realisierung dieses Buchprojektes, zu danken.

Sabine Seidler, Wien

Wolfgang Grellmann, Halle

Mai 2005

Die Herausgeber

■ Wolfgang Grellmann



Prof. Wolfgang Grellmann leitet seit 1995 die Professur „Werkstoffdiagnostik/Werkstoffprüfung“ am Zentrum für Ingenieurwissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Er ist Präsident der Akademie Mitteldeutsche Kunststoffinnovationen und Geschäftsführer der Polymer Service GmbH Merseburg, An-Institut an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Seine wissenschaftlichen Arbeiten beschäftigen sich mit dem Deformations- und

Bruchverhalten von Kunststoffen und Verbundwerkstoffen, der Entwicklung von Methoden der Technischen Bruchmechanik, hybriden Methoden der zerstörungsfreien Kunststoffdiagnostik und der Schadensfallanalyse. Er ist Autor und Co-Autor zahlreicher Bücher und Buchkapitel sowie Reviewer internationaler Zeitschriften.

■ Sabine Seidler



(Bildquelle: ©Raimund Appel)

Prof. Sabine Seidler leitet seit 1996 den Lehrstuhl „Nichtmetallische Werkstoffe“ am Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie der Technischen Universität Wien. Sie ist Rektorin der TU Wien, Vizepräsidentin der Vereinigung der Österreichischen Technischen Universitäten „TU Austria“ und Aufsichtsratsmitglied der Austria Metall AG (AMAG) sowie des Helmholtz-Zentrums Berlin. Ihre wissenschaftlichen Arbeiten beschäftigen sich mit

Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Polymeren und Verbundwerkstoffen. Sie engagiert sich in wissenschaftlichen Beiräten außeruniversitärer Forschungseinrichtungen u. a. als Vorsitzende des Wissenschaftlichen Beirates am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. Sie ist Autorin zahlreicher Fachbeiträge in international renommierten Zeitschriften, anerkannte Reviewerin für diese und Autorin bzw. Co-Autorin verschiedener Bücher und Buchkapitel.

■ Mitautoren

- Prof. Dr.-Ing. *Volker Altstädt*
Universität Bayreuth
(Kapitel 10)
- Prof. Dr. sc. nat. *Monika Bauer*
FhG Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) Teltow
Brandenburgische Technische Universität Cottbus
(Abschnitt 11.2)
- Prof. Dr.-Ing. *Christian Bierögel*
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
(Kapitel 2, Abschnitt 4.3 und Kapitel 9)
- Prof. Dr. rer. nat. habil. *Gert Busse*
Universität Stuttgart
(Kapitel 8)
- Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. *Klaus Friedrich*
Institut für Verbundwerkstoffe, Technische Universität Kaiserslautern
(Abschnitt 4.8)
(Abschnitte 4.5, 4.6 und 11.3)
- Dr.-Ing. *Henrik Höninger*
IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH Dresden
- Dr.-Ing. *Thomas Lüpke*
Kunststoff-Zentrum in Leipzig (KUZ)
(Abschnitte 4.1 und 4.2)
- Prof. Dr. rer. nat. habil. *Bernd Michel*
FhG Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) Berlin
(Kapitel 12)
- Prof. Dr.-Ing. habil. *Hans-Joachim Radusch*
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
(Kapitel 3)
- Dr. rer. nat. *Falko Ramsteiner*
BASF AG Ludwigshafen
(Kapitel 7)
- Prof. Dr. rer. nat. habil. *Andreas Schönhals*
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Berlin
(Abschnitt 6.3)

- Dr.-Ing. *Jörg Trempler*
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
(Abschnitt 6.2)

Die Kapitel und Abschnitte, die in dieser Auflistung nicht enthalten sind, wurden von den Herausgebern verfasst.

Für die Mithilfe bei der Erarbeitung des Manuskriptes wird gedankt:

- Frau *Yvonne Chowdhury*, Inno Mat GmbH (Abschnitt 11.2),
- Frau Dipl.-Ing. *Ivonne Pegel*, TU Hamburg-Harburg (Kapitel 10) und
- Herrn Dr.-Ing. *Hans Walter*, Angewandte Micro-Messtechnik GmbH Berlin (Kapitel 12).

Unser besonderer Dank gilt dem Mitautor Herrn Prof. Dr.-Ing. *Christian Bierögel* für die über die Abfassung der oben genannten Teilabschnitte hinausgehende umfassende Mitarbeit und kritischen Hinweise bei der Abfassung des Manuskriptes.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. *Peter Grau*, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg danken wir für die fachliche Begutachtung der Abschnitte zur Härteprüfung.

Für die kritische Durchsicht einzelner Kapitel danken wir unseren langjährigen Mitarbeitern Frau Ao. Prof. Dr. mont. *Vasiliki-Maria Archodoulaki*, Herrn Dr.-techn. *Thomas Koch*, Frau Prof. Dr.-Ing. *Ines Kotter*, Herrn Dr.-Ing. *Ralf Lach*, Frau Prof. Dr.-Ing. *Beate Langer* und Frau Dr.-Ing. *Katrin Reincke*.

